NIKOLAS LUKIN

**Gestão do Risco de Falha do Preventor Anular de BOP Multiplexado
Submarino**

**São Paulo
2016**

NIKOLAS LUKIN

**Gestão do Risco de Falha do Preventor Anular de BOP Multiplexado
Submarino**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Mecânica de Projeto e Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza

São Paulo
2016

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação a versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, ____ de ____ de ____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Lukin, Nikolas

Gestão do Risco de Falha do Preventor Anular de BOP Multiplexado Submarino / N. Lukin – versão corr. – São Paulo, 2016.
115 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Equipamento de sonda de perfuração 2.Qualidade do produto
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

AGRADECIMENTOS

À minha querida mãe, Ivete Maria Duarte, agradeço pelo amor, apoio, carinho e paciência que me dedicou;

À minha estimada avó, Eugênia Lukin, pelo exemplo que me deu;

Ao Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza, pela orientação deste trabalho, pela oportunidade e pelo seu voto de confiança;

Aos meus colegas da Petrobras, agradeço pela amizade e ajuda no desenvolvimento deste trabalho;

Aos meus amigos, pelo apoio e compreensão durante a evolução deste projeto.

A diferença entre o Rico e o Risco é o
“S” da segurança. (Autor
desconhecido).

RESUMO

Após o acidente de Macondo (EUA, 2010), cujo prejuízo estimado é da ordem de US\$ 42 bilhões, a análise de risco do BOP (Preventor de *BlowOut*) ganhou grande importância nos projetos de exploração e desenvolvimento de petróleo. O presente trabalho se aprofundou na análise de risco de falha no acionamento do preventor anular de BOP (uma das funções do BOP), mapeando a sensibilidade da manutenção, redundâncias do projeto e da vida útil dos componentes no risco de falha inerente ao seu funcionamento. Este estudo seguiu os fundamentos da inspeção baseada no risco e da manutenção centrada na confiabilidade, a partir das diretrizes das normas ISO 31.000 (gestão do risco) e API 581 (inspeção baseada no risco). Um modelo de confiabilidade foi construído com base na árvore de falhas do equipamento, a qual, por sua vez, foi construída com base no diagrama hidráulico do sistema e do respectivo FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*). Neste modelo, pressupõe-se uma taxa de falhas constante dos componentes ao longo do tempo para calcular o tempo médio entre falhas do sistema. O trabalho atendeu seus objetivos ao comprovar que o modelo numérico de confiabilidade é aderente às falhas de campo e da literatura. A análise de sensibilidade do modelo por meio da simulação numérica, mostrou que o aumento da qualidade das manutenções preventiva é a melhor estratégia para reduzir o risco de falha do BOP anular. Verificou-se ainda que o aumento da vida útil de alguns componentes é tão relevante quanto o incremento de redundâncias para a confiabilidade do BOP anular.

Palavras-Chave: Qualidade do produto. Equipamento de sonda de perfuração.

ABSTRACT

After Macondo accident (USA, April 2010), with an estimated loss of US \$ 42 billion, the failure risk analysis of the BOP (BlowOut Preventor) gained great importance in oil exploration and development projects. This work has deepened in BOP annular preventer (one of BOP functions) failure risk analysis, mapping sensitivity of maintenance of its components in the probability of equipment failure, according to the guidelines of RBI techniques (Risk Based Inspection) and RCM (Reliability Centered Maintenance). Therefore, the methodology used is proposed by API 580 (2009) and API 581 (2008) standards of risk based inspection applied on a reliability model of annular BOP. This reliability model, in turn, was based on fault tree analysis (FTA) and FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) over the equipment hydraulic diagram. As hypothesis, it is assumed a constant failure rate of components over time, in order to calculate the mean time between failures. It was proved that reliability calculated by numerical model is coherent to field failures observations and literature data. The sensitivity analysis by numerical simulation shows that improving inspections and preventive maintenance quality in some of BOP components can markedly reduce the risk of failure of annular BOP.

Keywords: Product quality. Drilling rig equipment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquemático de um BOP instalado na cabeça de poço	18
Figura 2 - Blowout de Macondo em 2010.....	19
Figura 3 - Sonda DeepWater Horizon incendiada pelo <i>blowout</i> de Macondo	19
Figura 4 - Desenho esquemático de um BOP	23
Figura 5 - Representação do mecanismo de funcionamento do BOP anular.....	25
Figura 6 - Representação do mecanismo de atuação do BOP anular	26
Figura 7 - Diagrama de funcionamento da válvula reguladora de pressão manual...27	
Figura 8 - Diagrama de funcionamento das linhas de alimentação (<i>Conduit lines</i>)...28	
Figura 9 - Diagrama de funcionamento da válvula remota reguladora de pressão ...28	
Figura 10 - Esquema de funcionamento das válvulas solenoide e SPM.....29	
Figura 11 - Descrição das etapas de construção do modelo de funcionamento do BOP anular	31
Figura 12 - Diagrama eletro-hidráulico resultante da pesquisa	32
Figura 13 - Esquema de acionamento eletro-hidráulico do BOP anular.....	33
Figura 14 - Diagrama de estado dos componentes do sistema na situação BOP anular aberto	34
Figura 15 - Diagrama de estado dos componentes do sistema na situação BOP anular fechado	35
Figura 16 - Comparação dos estados dos componentes do BOP anular para as situações aberto e fechado	36
Figura 17 - Diagrama de Pareto das maiores causas de falha em BOPs	38
Figura 18 - Riser colapsado	39
Figura 19 - Ferramenta de perfuração danificada devido à passagem por um BOP anular que não abriu completamente	39
Figura 20 - Mecanismo do dano em uma ferramenta de perfuração provocada por um preventor anular de BOP que não abriu completamente	40
Figura 21 - Causas de tempo perdido em sondas de perfuração, excluindo tempo perdido aguardando condição de mar.....	40
Figura 22 - Curva da banheira (taxa de falha em função do tempo)	43
Figura 23 - Representação de componentes ligados em série	44
Figura 24 - Representação de redundâncias ativas	45

Figura 25 - Representação de redundâncias passivas (<i>stand by</i>).....	47
Figura 26 - Representação do efeito da manutenção na confiabilidade de um sistema sem e com manutenção (depois de 360 dias acumulados de uso).....	48
Figura 27 - Variação do preço do petróleo entre 2005 e 2015	49
Figura 28 - Fluxograma de desenvolvimento e tratamento do risco.....	51
Figura 29 - Comportamento do risco após a manutenção de um sistema, conforme API 581	52
Figura 30 - Fluxograma de desenvolvimento do trabalho	56
Figura 31 - FMEA para o acionamento do BOP anular	58
Figura 32 - (cont) FMEA para o acionamento do BOP anular	59
Figura 33 - FTA da falha do sistema anular	61
Figura 34 - FTA do acionamento de um preventor anular	62
Figura 35 - FTA de um POD.....	63
Figura 36 - Inserto de BOP anular novo.....	64
Figura 37 - Inserto de BOP anular danificado com as marcas de desgaste identificadas por setas.....	64
Figura 38 - Diagrama de blocos de confiabilidade resultante da análise do sistema	65
Figura 39 - Resumo dos modelos utilizados no cálculo da confiabilidade do sistema	66
Figura 40 - Diagrama de blocos de confiabilidade do modelo A	67
Figura 41 - Diagrama de blocos de confiabilidade do bloco An do modelo A	67
Figura 42 - Diagrama de blocos de confiabilidade do bloco Bn do modelo A	67
Figura 43 - Diagrama de blocos de confiabilidade do bloco Cn do modelo A	67
Figura 44 - Diagrama de blocos de confiabilidade do modelo B	70
Figura 45 - Diagrama de blocos de confiabilidade do bloco An do modelo B	70
Figura 46 - Diagrama de blocos de confiabilidade do modelo C	72
Figura 47 - Diagrama de blocos de confiabilidade do modelo C com n redundâncias	72
Figura 48 - Taxa de falha (incluindo todas as falhas) em função do tempo de uso do BOP	80
Figura 49 - Taxa de falha (falhas apenas do modo de falha 1) em função do tempo de uso do BOP	81
Figura 50 - Taxa de falha (falhas apenas do modo de falha 2) em função do tempo de uso do BOP	81

Figura 51 - Taxa de falha (falhas apenas não intermitentes) em função do tempo de uso do BOP	82
Figura 52 - Taxa de falha (falhas apenas intermitentes) em função do tempo de uso do BOP	83
Figura 53 - Taxa de falha (falhas apenas no anular superior) em função do tempo de uso do BOP	84
Figura 54 - Taxa de falha (falhas apenas no anular inferior) em função do tempo de uso do BOP	84
Figura 55 - Comparação da confiabilidade calculada pelos modelos A, B e C e de Zengkey (2013) do BOP anular em função dos dias de operação do BOP (eixo x).	88
Figura 56 – Taxa de falha instantânea em função do tempo acumulado de operação do BOP	90
Figura 57 - Gráfico de $-\ln(R)$ dos modelos A, B, C e de Liu Zengkey para o BOP anular em função do tempo do BOP em operação, em dias de operação.	91
Figura 58 - Comparação do valor de TMEF para o BOP anular segundo os modelos numéricos e estatísticas de falha de campo e da literatura	94
Figura 59 - Comparação do valor de TMEF para cada modo de falha para o BOP anular segundo os modelos numéricos e estatísticas de falha de campo e da literatura	95
Figura 60 - Representação das redundâncias do sistema de acionamento do BOP anular	96
Figura 61 - Variação do TMEF do BOP anular em função do número de redundâncias	98
Figura 62 - Impacto da redundância no TMEF do BOP anular	98
Figura 63 - Análise da variação do TMEF dos componentes e sua influência na variação do TMEF do sistema	99
Figura 64 - Impacto da melhoria da confiabilidade dos componentes no TMEF do preventor anular (horas de BOP)	100
Figura 65 - Matriz de falha dos componentes do BOP	101
Figura 66 - Representação do risco de falha dos componentes no diagrama hidráulico	101
Figura 67 - Gráfico do TMEF do BOP anular x intervalo entre a manutenção preventiva	102

Figura 68 - Fator de qualidade da manutenção em função do SCORE obtido pela gestão de manutenção	103
Figura 69 - Comparação dos resultados de propostas para a melhoria do BOP anular	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipo de preventor do BOP utilizado em cada situação para fechamento do poço.....	24
Tabela 2 - Componentes do sistema BOP anular	32
Tabela 3 - Relação entre causas da falha, modo de falha e possível consequência	54
Tabela 4 - Resultados das estatísticas de falha obtidos por Per HOLAND (1987, 1997, 1999 e 2012)	55
Tabela 5 - Cutsets encontrados no modelo.....	68
Tabela 6 - Trecho da Tabela de combinações dos estados dos componentes para o cálculo pelo método booleano.....	69
Tabela 7 - Cálculo da confiabilidade dos componentes ao longo do tempo acumulado de operação	74
Tabela 8 - Dados dos preventores anulares estudados em campo	75
Tabela 9 - Dados das falhas nos preventores anulares durante a amostragem	76
Tabela 10 - Dados das falhas nos preventores anulares durante a amostragem	77
Tabela 11 - Classificação das falhas.....	79
Tabela 12 - Medidas de posição da taxa de falha, considerando todas as falhas	80
Tabela 13 - Medidas da posição das taxas de falha em função do modo de falha ...	82
Tabela 14 - Medidas da posição das taxas de falha em função do tipo de falha	83
Tabela 15 - Medidas da posição das taxas de falha em função do local da falha.....	84
Tabela 16 - Resultados da análise de falhas em campo.....	85
Tabela 17 - Resultado do cálculo de confiabilidade para o modelo A (resolvido por cutsets).....	86
Tabela 18 - Resultado do cálculo de confiabilidade para o modelo A (resolvido pelo método booleano).....	87
Tabela 19 - Resultado do cálculo de confiabilidade para o modelo B	87
Tabela 20 - Resultado do cálculo de confiabilidade para o modelo C.....	87
Tabela 21 – Polinômios interpoladores para representar a confiabilidade dos modelos A, B e C e de Zengkay (2013) do BOP anular em função dos dias de operação do BOP.....	89
Tabela 22 – Primeira derivada dos polinômios interpoladores para representar a confiabilidade dos modelos A, B e C e de Zengkay (2013) do BOP anular	

em função dos dias de operação do BOP.....	89
Tabela 23 - Resultados do TMEF calculado dos diferentes modelos da análise numérica.....	91
Tabela 24 - Comparação dos TMEF dos resultados obtidos pela aplicação dos modelos numéricos com os dados de campo com os resultados encontrados na literatura, por falhas gerais.	93
Tabela 25 - Comparação dos TMEF dos resultados obtidos pela aplicação dos modelos numéricos com os dados de campo com os resultados encontrados na literatura, dividido por modo de falha.....	93
Tabela 26 - Tabela de cálculo para a análise de sensibilidade das redundâncias no TMEF do sistema	97
Tabela 27: variação do Fms e <i>SCORE</i> para cada classificação de falha obtida.....	104

LISTA DE SIGLAS

API – American Petroleum Institute

BOP – Blowout Preventer

FMEA – Análise de Modos e Efeitos de Falha

FTA – Análise de Árvores de Falhas

ISO – International Organization for Standardization

LMRP – Lower Marine Riser Package

MAX – Máximo

MED – Médio

MIN – Mínimo

POD – Point of Distribution

TMEF – Tempo Médio Entre Falhas

TMEM – Tempo Médio Entre Manutenções

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	18
1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	18
1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO	20
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	20
2 DESCRIÇÃO DO BOP (BLOWOUT PREVENTER)	22
2.1 TERMOS E DEFINIÇÕES.....	22
2.2 PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM BOP.....	23
2.3 PREVENTOR ANULAR	24
2.4 FUNCIONAMENTO DO BOP ANULAR	27
2.4.1 Patentes relacionadas.....	27
2.4.2 Requisitos técnicos.....	29
2.4.3 Modelo de funcionamento do BOP anular	31
2.5 USO DO BOP	37
2.6 FALHAS DO BOP	37
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	42
3.1 ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE.....	42
3.1.1 Definição de confiabilidade e taxa de falha acumulada.....	42
3.1.2 Definição de taxa de falha	43
3.1.3 Sistemas em série	44
3.1.4 Sistemas em paralelo.....	44
3.1.5 Efeito da manutenção preventiva	47
3.2 ESTATÍSTICAS DE FALHA DO SISTEMA	49
3.3 GESTÃO DE RISCOS.....	50
3.3.1 ISO 31.000 (2009): Gestão de riscos	50
3.3.2 API 581 (API, 2008): inspeção baseada no risco	51
3.3.3 Modos de falha	54

3.4 ESTUDOS DE CONFIABILIDADE DO BOP	55
4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DO CÁLCULO DE CONFIABILIDADE DO BOP ANULAR	56
4.1 ETAPAS DO TRABALHO	56
4.2 IDENTIFICAÇÃO DO RISCO.....	57
4.2.1 Detectando a falha	57
4.2.2 FMEA (Análise de Modo e Efeito de Falha)	57
4.3 ANÁLISE DO RISCO	60
4.3.1 Falha do sistema BOP anular	60
4.3.2 Falha de um anular.....	61
4.3.3 Falha do acionamento dentro de um POD	62
4.3.4 Falha do elemento de vedação	64
4.4 AVALIAÇÃO DO RISCO	65
4.4.1 Modelo A	66
4.4.2 Modelo B	69
4.4.3 Modelo C	71
4.5 METODOLOGIA DE CÁLCULO DA CONFIABILIDADE DO MODELO	73
4.6 PARÂMETROS DE REFERÊNCIA.....	74
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS	75
5.1.1 Estudo de casos de falha reais	75
5.1.2 Modelo numérico de confiabilidade.....	86
5.1.3 Validação do modelo.....	92
5.1.4 Variação do número de redundâncias.....	96
5.1.5 Análise de sensibilidade dos componentes do sistema anular	99
5.1.6 Variação da periodicidade da manutenção preventiva	102
5.1.7 Variação da qualidade da gestão da manutenção preventiva	103

5.2 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	105
6 CONCLUSÕES	107
7 SUGESTÕES DE MELHORIA	109
REFERÊNCIAS.....	110
ANEXO A: TRECHO DA LISTA PARA CÁLCULO DO SCORE, SEGUNDO API 581 (2008).....	115
APÊNDICE A: ALGORITMO EM C++ PARA O CÁLCULO DO MODELO “A” PELO MÉTODO BOOLEANO	116

INTRODUÇÃO

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O principal equipamento da segurança do trabalho de perfuração utilizado na construção de poços de petróleo é o BOP (*BlowOut Preventer*), ilustrado na Figura 1. Este equipamento nada mais é que uma válvula de poço, constituída por múltiplos preventores acionados hidraulicamente, instalado na cabeça de um poço, destinada a isolar o poço da superfície (sonda), quando necessário e pode ser desconectada em duas partes (*LMRP* e *Stack*) em caso de emergência (em geral, perda de posicionamento dinâmico da plataforma). Nesta situação, o *stack* permanece conectado ao poço, enquanto o *LMRP* é solidário aos *risers* e à sonda.

Figura 1 - Esquemático de um BOP instalado na cabeça de poço

Fonte: autor desconhecido

A falha deste equipamento pode levar a consequências catastróficas. Um exemplo recente que ilustra este problema foi o acidente de Macondo em 22 de abril de 2010 nos Estados Unidos (Figuras 2 e 3) que causou a morte de onze pessoas e de centenas de milhares de animais, o derramamento de aproximadamente 800 milhões de litros de óleo no mar e gerou prejuízos estimados em US\$ 42 bilhões (MORETZSOHN, 2012).

Figura 2 - *Blowout* de Macondo em 2010

Fonte: (OCEANEERING, 2010)

Figura 3 - Sonda DeepWater Horizon incendiada pelo *blowout* de Macondo

Fonte: (U.S. CHEMICAL SAFETY BOARD (CSB), 2014)

Além da possível falha catastrófica causada pela associação de um *kick* com a falha do equipamento, os prejuízos não se limitam a esse caso. Em muitas ocorrências, quando a falha do BOP é detectada, o equipamento deve ser retirado de operação para reparo, cujo retorno pode demorar até uma semana ou mais dependendo da disponibilidade do reparo a bordo. Considerando que o custo diário de uma sonda pode ultrapassar os U\$500.000,00 (RIG ZONE, 2016), pode-se ter uma ideia do prejuízo causado pela falha do BOP.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

Tendo em vista a severidade de uma possível falha neste equipamento, objetiva-se desenvolver tanto uma metodologia para a análise da confiabilidade de um BOP anular a partir de seus componentes quanto um modelo de cálculo do tempo médio entre falhas (TMEF) do sistema preventor anular. Este modelo será validado, comparando os resultados obtidos com as estatísticas de falha encontradas na literatura e na sua operação. Posteriormente, este será utilizado para propor medidas de projeto e manutenção no intento de aumentar a confiabilidade do preventor anular.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi dividida nos seguintes capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução do problema, os objetivos e a organização do texto. O Capítulo 2 descreve o equipamento e apresenta seus principais componentes. Em seguida, delimita-se um subsistema para análise (preventor anular), as situações em que deve ser utilizado e os seus respectivos modos de falha juntamente com as possíveis consequências destas falhas. Discorre-se sobre os requisitos técnicos e as patentes do equipamento encontrados na literatura. Além de ser demonstrado um modelo eletro-hidráulico de funcionamento do equipamento.

No Capítulo 3, intitulado Fundamentação Teórica, foram pesquisadas não só as patentes relacionadas ao equipamento em estudo, bem como os seus respectivos requisitos técnicos (previstos em normas) e estudos encontrados na literatura. Ademais, apresenta-se toda a teoria e conceitos da engenharia de confiabilidade

necessários para desenvolver este trabalho. Sintetizam-se as estatísticas de falha encontradas na literatura, as premissas relevantes da norma API 581 (2008) para a inclusão dos efeitos da manutenção de sistemas e, finalmente, a norma ISO 31.000 (2009), que descreve a gestão de risco, para estruturar a metodologia da análise proposta neste trabalho. Enquanto o Capítulo 4 é dedicado à Metodologia, isto é, como os resultados serão alcançados e quais os parâmetros de referência para a comparação da sensibilidade de variáveis de projeto e de manutenção. Além disso, modelos de confiabilidade do equipamento são propostos para a análise.

O Capítulo 5, Resultados e Discussão, em que baseado nos modelos de funcionamento e de confiabilidade gerados a partir das informações encontradas na literatura e dos métodos definidos são feitos estudos (utilizando as ferramentas de análise de riscos) para identificar as principais causas de falha. *A priori*, esse modelo é validado comparando-se o comportamento da taxa de falha ao longo do tempo e a expectativa do tempo de falha por ele calculada com dados obtidos da análise de campo e da literatura. Cabe notar que esta foi a forma encontrada para observar o modelo, uma vez que o equipamento tem custo elevado e as condições de trabalho a que está submetido são impraticáveis de serem reproduzidas em laboratório. Nem sequer os fabricantes de BOP possuem dados para serem analisados. Tendo o modelo sido validado, os seus componentes e subsistemas são analisados na tentativa de melhorar a confiabilidade do sistema como um todo. Esta análise contempla também os efeitos da manutenção (qualidade e frequência).

Finalmente, nas Conclusões, os resultados obtidos foram ordenados de modo a identificar as prioridades para a melhoria do sistema, em que são discutidos o significado destes resultados. Nas Sugestões de melhoria, são propostas melhorias na manutenção e no projeto baseadas nas conclusões obtidas.

2 DESCRIÇÃO DO BOP (BLOWOUT PREVENTER)

2.1 TERMOS E DEFINIÇÕES

Antes de iniciar o estudo do BOP, torna-se oportuno introduzir os seguintes termos e definições que serão utilizados no presente trabalho, cujas definições foram extraídas da norma Petrobras N-2753 (2015).

Acumulador: vaso de pressão carregado com gás inerte (nitrogênio ou hélio) e utilizado para armazenar fluido hidráulico sob pressão;

Blowout: fluxo descontrolado de fluidos de uma formação exposta no interior do poço para a atmosfera, fundo do mar ou outra formação (*underground blowout*);

Blowout Preventer (BOP): dispositivo de segurança que permite o fechamento do poço;

BOP stack: conjunto de equipamentos de controle de poço montados sobre a cabeça do poço, tais como: BOP gaveta, válvula gaveta, linha do *kill* e *choke*, conector hidráulico e junta flexível;

Conduit line: tubulação que conduz o fluido hidráulico de controle do BOP *stack* da superfície até o fundo do mar;

Controle multiplexado: sistema de controle de BOP submarino, cujo acionamento e monitoramento são transmitidos através de sinais eletro-eletrônicos;

Kick: influxo indesejável de fluidos de uma formação para o interior do poço;

Lower Marine Riser Package (LMRP): conjunto de equipamentos que compõe a parte superior do BOP *stack*, tais como: conector hidráulico, BOP anular, POD e junta flexível;

POD: central submarina de monitoramento e controle do BOP *stack*.

2.2 PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM BOP

A Figura 4 mostra esquematicamente os principais preventores de um BOP, que são os anulares (*Upper Annular* e *Lower Annular*) utilizados para fechar o poço contra colunas de perfuração ou no vazio, a gaveta cega-cisalhante ou de corte (*Blind Shear Ram*) utilizada para fechar o poço no vazio ou eventualmente cortar uma coluna de perfuração e as gavetas de tubo (*Pipe Rams*), utilizadas para fechar o poço em torno de uma coluna de perfuração.

Fonte: adaptado de (HOLAND, 2012)

Em síntese, há três tipos principais de preventores no BOP destinados a fechar o poço: gavetas de corte, gavetas de tubo e anulares. Dependendo do elemento que se encontra dentro do BOP (por exemplo, coluna de perfuração) e da operação corrente, um desses preventores é acionado para fechar o poço. Além disso, alguns deles são redundantes propositadamente para garantir maior confiabilidade ao

sistema. A Tabela 1 relaciona o tipo de preventor utilizado em cada situação de fechamento do poço.

Tabela 1 - Tipo de preventor do BOP utilizado em cada situação para fechamento do poço

Preventor	Uso
Anular	Pode fechar o poço em torno de qualquer diâmetro de coluna (sem que a coluna seja danificada) ou até mesmo no vazio. Primeiro elemento a ser fechado quando um <i>kick</i> ¹ é detectado durante a perfuração.
Gaveta de tubo	Somente pode fechar o poço em torno de uma faixa específica de diâmetro de coluna (gaveta de tubo variável) ou em um diâmetro específico de coluna (gaveta de tubo fixa).
Gaveta de corte cega-cisalhante	Pode fechar e vedar o poço em torno de qualquer diâmetro de coluna cisalhável (todavia, cortando permanentemente a coluna) ou até mesmo no vazio. O primeiro caso, geralmente, ocorre quando a sonda perde a capacidade de se manter na posição desejada.
Gaveta de revestimento	Semelhante à gaveta de corte cega-cisalhante, todavia, não veda o poço, embora seja capaz de cortar revestimentos e colunas que uma cega-cisalhante não seria capaz de cortar.

Fonte: arquivo pessoal

2.3 PREVENTOR ANULAR

O preventor anular em um BOP submarino costuma ser o primeiro elemento destinado a fechar o poço, como recomenda a norma API RP 59 (API, 2012). Este preventor atua como uma borracha comprimida por um pistão e pode fechar e isolar

¹ *Kick* é o nome atribuído a todo influxo (formado por óleo, água ou gás) vindo do exterior do poço para o interior do poço.

o poço com ou sem coluna dentro do BOP, conforme ilustra a Figura 5. Esta Figura ainda ilustra o mecanismo de vedação do BOP anular. Seus principais componentes são o inserto (ou borracha) e os pistões da câmara de acionamento. Quando estes pistões, de dupla ação, são pressurizados pela câmara de fechamento, forçam a borracha a se expandir radialmente para dentro do poço, vedando-o contra o que estiver dentro do BOP. É possível obter vedação contra o vazio, no entanto, isso pode ser prejudicial para a vida útil da borracha.

Figura 5 - Representação do mecanismo de funcionamento do BOP anular

Fonte: adaptado de WIKIPEDIA (2015)

Esse pistão é acionado por um dispositivo eletro-hidráulico esquematizado na mesma Figura. Apesar deste dispositivo conter componentes que se encontram na superfície da embarcação (sonda), tais como painéis de acionamento e seus cabos elétricos, este trabalho está centrado nos elementos submersos, devido a maior frequência de falha (uma vez que estão expostos a condições de operação mais severas), complexidade de detecção de falha e dificuldade de reparo (Figura 6).

Figura 6 - Representação do mecanismo de atuação do BOP anular

Fonte: adaptado de ROCHE (1997)

O mecanismo de acionamento do BOP anular é descrito sucintamente. A seguir apresenta-se o passo a passo para o acionamento do BOP anular:

- 1) Inicialmente um operador comanda o acionamento do BOP anular por um painel localizado na embarcação.
- 2) O painel transmite o comando por cabos elétricos para o computador central (*Central Control Unit*) que codifica o comando em um sinal multiplexado transmitido para o BOP via fibra ótica (através do cabo MUX).
- 3) Este sinal é recebido pelo POD (*Point of Distribution*) que, através de um conjunto de válvulas, direciona a energia hidráulica contida nos acumuladores de superfície (*surface accumulators*) para a câmara de fechamento do BOP anular.
- 4) Estes acumuladores de superfície são recarregados pelas bombas HPU que, por sua vez, são alimentadas pelo reservatório com fluido hidráulico.

2.4 FUNCIONAMENTO DO BOP ANULAR

O modelo de acionamento eletro-hidráulico de um BOP anular foi construído com base nas patentes encontradas na literatura e normas técnicas que regulamentam o seu funcionamento.

2.4.1 Patentes relacionadas

Inicialmente, foram pesquisadas na literatura as patentes relacionadas com o sistema eletro-mecânico em estudo. O objetivo desta pesquisa é identificar os componentes deste sistema e descrever o seu funcionamento sem se comprometer com os direitos autorais de fabricantes de BOPs.

2.4.1.1 US 2148844 A (HYDRIL, 1939)

Primeiro BOP anular, cujo conceito não mudou até os dias de hoje. Consiste em um inserto que, quando pressionado por um pistão, veda o poço, conforme visto anteriormente.

2.4.1.2 US 2524264 (GRANVILLE, 1950)

Define o sistema regulador de pressão (manual) de acionamento de preventores de BOPs (Figura 7). Esta válvula é necessária para reduzir a pressão que chega das linhas de alimentação dos *risers* (em geral, 5.000psi) para a pressão máxima que os PODs e o BOP anular podem operar (em geral, 3.000psi).

Figura 7 - Diagrama de funcionamento da válvula reguladora de pressão manual

Fonte: acervo próprio

Vale notar que a pressão à jusante desta válvula MKR é regulada na superfície e não pode ser alterada remotamente.

2.4.1.3 US 3319923 (FOSTER, et al., 1967)

Define o conceito de BOP submarino, instalado na cabeça de poços submarinos. Propõe preventores atuados por comando eletro-hidráulicos.

2.4.1.4 US 409542 (SILCOX, 1978)

Define o sistema de suprimento hidráulico de um BOP submarino para substituir os atuadores elétricos (pouco confiáveis). Propõe um conjunto de linhas de alimentação que conectam os atuadores aos acumuladores de superfície (Figura 8).

Figura 8 - Diagrama de funcionamento das linhas de alimentação (*Conduit lines*)

Fonte: acervo próprio

2.4.1.5 US 4565349 (TOMLIN, 1984)

Define o sistema regulador de pressão remoto (HKR) de acionamento de preventores de BOP submarinos (Figura 9). Esta válvula é necessária para ajustar remotamente (ou seja, a partir dos painéis de superfície) a pressão de entrada nos PODs (em geral, 3.000psi) para uma pressão menor, com o intento de executar as funções requeridas com a menor pressão possível.

Figura 9 - Diagrama de funcionamento da válvula remota reguladora de pressão

Fonte: acervo próprio

Este ajuste para reduzir a pressão de operação dos PODs e do BOP anular tem a vantagem de reduzir o desgaste dos componentes pela redução da vazão de fluido hidráulico e golpes de aríete.

2.4.1.6 US 488002 (MCMAHAN, et al., 1989)

Define os principais componentes do sistema de controle eletro-hidráulico de

um BOP submarino. Define válvulas SPMs (*Subsea Plated Mounted*) normalmente fechadas que são acionadas por pilotos hidráulicos comandados por válvulas solenoides (normalmente fechadas também). Após serem acionadas pelas solenoides, as válvulas SPM se abrem permitindo a passagem do suprimento hidráulico para o BOP anular (Figura 10).

2.4.2 Requisitos Técnicos

Foram pesquisados na literatura técnica especializada os requisitos funcionais do BOP anular. Para cada norma técnica correlata, foram listados os artigos correspondentes aos requisitos do BOP anular.

2.4.2.1 API STD 53 (API, 2012)

A norma API STD 53 (*Blowout Prevention Equipment Systems For Drilling Wells*) relaciona os requisitos mínimos funcionais e de projeto para os equipamentos de segurança de poço, entre eles, os do BOP anular. Os itens mais relevantes no que tange ao BOP anular são destacados.

- 7.1.3.1: Fechar, vedar e possibilitar *stripping*;²
- 7.3.4.10: Tempo de fechamento inferior a 60s;
- 7.3.13.2.7: Pressão de fechamento regulada;

Convém ressaltar que se o volume para abrir ou fechar o BOP anular situa-se na faixa de 250l, então, a vazão de fluido hidráulico para cumprir com o requisito da norma deve ser no mínimo de 4,3l/s. Considerando que as linhas de acionamento do preventor são padronizadas em 1" (25,4mm) e que o fluido hidráulico tem as mesmas

² *Stripping* é a operação de movimentar a coluna de perfuração com o BOP anular fechado em torno dela. Compreende uma operação crítica no controle de poço que pode levar ao desgaste do preventor.

propriedades da água industrial, o número de Reynolds para o escoamento é calculado de acordo com a equação (1).

$$Re = \frac{\delta.V.D}{\mu} \approx 2.10^5 (\text{escoamento turbulento}) \quad (1)$$

Sendo,

Densidade (δ) = 1.000kg/m³

Velocidade média de escoamento (V) = 8,5m/s;

Diâmetro da tubulação (D) = 25,4mm;

Viscosidade (μ) = 1,0.10⁻³ Pa.s

Resultando em escoamentos turbulentos com possibilidade de golpes de aríete.

2.4.2.2 API SPEC 16D (API, 2004)

A norma API SPEC 16D (*Specification for Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment Second Edition*) relaciona outros requisitos de projeto para os equipamentos de segurança de poço, entre eles, os do BOP anular. Em especial, destaca-se o item 4.3.2.2 ao determinar que o sistema de controle hidráulico possua uma reguladora remota e outra manual como *backup*;

2.4.2.3 API RP 59 (API, 2006)

A norma API RP 59 (*Recommended Practice for Well Control Operations*) relaciona as boas práticas no controle de poço, entre elas, as recomendações para o uso do BOP anular. Como boa prática, o preventor anular deve ser capaz de fechar e vedar o poço até contra uma coluna de revestimento (12.4.2). O item 10.2.3.2 estabelece a necessidade do BOP anular prover meios de regular a pressão de acionamento para evitar o desgaste do inserto em caso de operações de *stripping*.

2.4.3 Modelo de funcionamento do BOP anular

Tendo em vista as informações disponíveis na literatura (normas, patentes e Figuras encontradas), um modelo funcional do sistema BOP anular foi elaborado. Neste modelo, representa-se o estado de cada componente do sistema (acionado ou ventilado) em cada um dos estados possíveis do BOP anular (aberto ou fechado). O modelo funcional é imprescindível para se chegar ao modelo de confiabilidade do sistema. As etapas percorridas para se chegar a este se encontram ilustradas na Figura 11.

Figura 11 - Descrição das etapas de construção do modelo de funcionamento do BOP anular

Fonte: acervo próprio

A partir das informações obtidas na literatura, projetou-se o diagrama hidráulico de atuação do BOP anular indicado na Figura 12.

Figura 12 - Diagrama eletro-hidráulico resultante da pesquisa

Fonte: arquivo pessoal

Os componentes deste sistema são listados na Tabela 2.

Tabela 2 - Componentes do sistema BOP anular

ITEM	SIGLA	DESCRIÇÃO
1	SL	Linha de suprimento do <i>riser</i>
2	SPM PS	SPM de seleção do POD ativo
3	MKR 1	Reguladora Manual de Pressão 5k/3k psi
4	SOL PS	Solenóide que atua SPM PS
5	MKR 2	Válvula Reguladora Manual 5k/3k psi
6	HKR	Válvula Reguladora de Pressão Remota
7	SPM 1	Válvula SPM para fechamento do BOP anular
8	SOL 1	Solenóide de ativação da SPM 1
9	SPM 2	Válvula SPM para abertura do BOP anular
10	SOL 2	Válvula solenóide para ativação da SPM 2
11	SV1	Shuttle valve 1
12	SV 2	Shuttle valve 2
13	Pistão do BOP anular	Câmara de abertura do BOP anular
14	SEM A	Processador de sinal A
15	SEM B	Processador de sinal B
16	Cabo MUX	Cabo óptico transmissor de sinal para o BOP
17	CC	Painel central de controle
18	ACC	Banco de acumuladores de superfície
19	HPU	Bomba hidráulica de recarga

Fonte: arquivo pessoal

Posteriormente, os componentes deste diagrama são representados por blocos, exibindo a sequência funcional de acionamento do BOP anular (Figura 13). O sistema eletro-hidráulico de controle para o fechamento e abertura do BOP anular é constituído por um suprimento de pressão, uma linha de alimentação, um POD (*Point Of Distribution*), sendo este constituído pela SEM (*Subsea Electronic Module*), *manifold*, pelo cabo MUX e as câmaras do BOP anular e o seu respectivo inserto (“borracha”). O *manifold* do POD é constituído por um conjunto de válvulas reguladoras de pressão, solenóides e SPMs.

Fonte: arquivo pessoal

A sequência de acionamento do BOP anular é descrita pela transição dos seus dois estados: aberto e fechado. Inicialmente, o sistema permanece com a câmara de abertura do anular pressurizada, enquanto a câmara de fechamento é mantida sem pressão, de modo a manter o BOP anular aberto (Figura 14). Em caso de ocorrência de *kick* (influxo da formação para o poço), o BOP anular é fechado, drenando-se a pressão da câmara de abertura e pressurizando a câmara de fechamento, evitando que o influxo chegue à superfície.

Figura 14 - Diagrama de estado dos componentes do sistema na situação BOP anular aberto

Fonte: arquivo pessoal

Para direcionar a pressão para uma câmara do BOP anular, o comando atuado pelo painel é codificado pelo computador central (CCC) e transmitido por um cabo MUX até a SEM do POD. A SEM é responsável por decodificar o sinal multiplexado recebido e acionar a válvula solenoide correspondente à função desejada (localizada na linha piloto) que, por sua vez, direciona a pressão para o piloto da sua respectiva válvula SPM comandada, fazendo-a se abrir. Quando a SPM se abre, transmite a pressão hidráulica dos acumuladores de superfície para a câmara do BOP anular. A câmara possui um pistão que pressiona o inserto ("borracha") fazendo-o se comprimir e vedar o poço (Figura 15).

Figura 15 - Diagrama de estado dos componentes do sistema na situação BOP anular fechado

Fonte: arquivo pessoal

A Figura 16 resume o estado dos componentes do sistema BOP anular nos estados aberto (inicial) e fechado (final).

Figura 16 - Comparação dos estados dos componentes do BOP anular para as situações aberto e fechado³

No	Função	Estado inicial		Estado final	
		Lado da Câmara de abertura	Lado da Câmara de fechamento	Lado da Câmara de abertura	Lado da Câmara de fechamento
CL	Transmitir a energia hidráulica armazenada na superfície para o BOP	Pressurizado	Pressurizado	Pressurizado	Pressurizado
SSV1	Seleciona o POD que está sendo utilizado. N/A	Atuada	Atuada	Atuada	Atuada
MKR1	Reguladora manual da linha principal (reduz a pressão de 5.000psi para 3.000psi)	Atuada	Atuada	Atuada	Atuada
MKR2	Reguladora manual da linha piloto (reduz a pressão de 5.000psi para 3.000psi)	Atuada	Atuada	Atuada	Atuada
HKR2	Reguladora hidráulica remota da linha principal (reduz a pressão de 3.000psi para a pressão de fechamento desejada)	Atuada	Atuada	Atuada	Atuada
SSV2	Solenóide de atuação da SPM 1 (N/F)	Desenergizada (fechada)	Atuada	Atuada	Desenergizada (fechada)
SPM 1	SPM (N/F). Comunicar a pressão para a câmara de fechamento do BOP anular	Desenergizada (fechada)	Atuada	Atuada	Desenergizada (fechada)
SSV3	Solenóide de atuação da SPM 2 (N/F)	Atuada	Desenergizada (fechada)	Desenergizada (fechada)	Atuada
SPM 2	SPM (N/F). Comunicar a pressão para a câmara de abertura do BOP anular	Atuada	Desenergizada (fechada)	Desenergizada (fechada)	Atuada
SV	Shuttle Valve. Valvula que permite a atuação da câmara do anular por um OU outro POD	Atuada	Desenergizada	Desenergizada	Atuada
Câmara de fechamento	Camãra do lado de fechamento do pistão do BOP anular	Atuada	Ventilada	Ventilada	Atuada
Câmara de abertura	Camãra do lado de abertura do pistão do BOP anular	Ventilada	Atuada	Atuada	Ventilada
Inserto	Borracha de vedação do BOP anular	Desenergizada (aberta)	Desenergizada (aberta)	Energizada (fechada)	Energizada (fechada)
SEM	Subsea Eletrônico Modulo. Módulo que converte o sinal enviado pelo painel em um sinal elétrico para a solenóide.	Energizado	Energizado	Energizado	Energizado
MUX	Cabo que envia o sinal do painel do operador à SEM.	Energizado	Energizado	Energizado	Energizado

Fonte: arquivo pessoal

³ N/A corresponde à normalmente aberto e N/F corresponde à normalmente fechado.

2.5 USO DO BOP

A principal necessidade de fechar o poço utilizando o BOP acontece com um *kick*, nome dado a um influxo indesejado, ou seja, quando há um influxo (que pode ser de óleo, gás ou até mesmo água a alta pressão) contido nos poros da rocha que está sendo perfurada para dentro do poço. A causa básica mais comum de um *kick* consiste em um desequilíbrio entre a pressão hidrostática do fluido de perfuração e a pressão de poros da rocha perfurada. Quando a pressão de poros torna-se maior que a pressão hidrostática da lama de perfuração, a rocha tende a expulsar o fluido confinado em seus poros para dentro do poço. Note-se que esta não é a única causa de um *kick*. Outras causas menos comuns, de acordo com a norma API RP 59 (API, 2012), que relaciona boas práticas de controle de poço, são resumidas a seguir:

1. Peso da lama insuficiente;
2. Falta de abastecimento do poço;
3. Lama cortada por gás;
4. *Swabbing*⁴ (pistoneio);
5. Ganho/perda no anular;
6. Gás trapeado no BOP;
7. Expansão térmica da lama em poço aberto por longo tempo;

Cabe destacar que se o *kick* não for controlado, pode evoluir para um *blowout*, situação em que ocorre um influxo descontrolado que pode ter graves consequências não somente para o meio ambiente e para os equipamentos, assim como para as pessoas que trabalham na sonda em questão.

2.6 FALHAS DO BOP

O risco de falha do preventor anular é particularmente importante, pois, de

⁴ Efeito decorrente da movimentação da coluna de perfuração no sentido para fora do poço que causa a redução de pressão no fundo do poço, em analogia ao movimento do êmbolo de uma seringa.

acordo com dados encontrados na literatura, o índice de falha neste preventor (e nos componentes envolvidos no seu acionamento) é um dos maiores registrados de todas as falhas no BOP (HOLAND, 2012). De acordo com a Figura 17, o BOP anular e os componentes do seu acionamento (sistema de controle, cabo MUX) representam mais de 50% das falhas de BOPs.

Figura 17 - Diagrama de Pareto das maiores causas de falha em BOPs

Fonte: (HOLAND et al., 2012)

A falha de vedação ou o não fechamento do BOP anular pode fazer com que este influxo chegue ao *riser*. Se este influxo for um gás, em um primeiro momento o *riser* pode colapsar devido ao desequilíbrio hidrostático causado entre a pressão hidrostática da água do mar do lado externo e a pressão do gás no seu interior (Figura 18). Se este influxo for inflamável, ao chegar à superfície, pode provocar uma explosão na superfície da embarcação como aconteceu no caso de Macondo.

Figura 18 - *Riser* colapsado

Fonte: (JOHNSON, 2013)

Outro possível modo de falha refere-se à falha no acionamento. Além de, eventualmente, não fechar o BOP anular, pode não abrir adequadamente. Neste caso, ferramentas com diâmetros maiores podem ficar presas e se danificarem após a sua passagem pelo preventor anular (Figuras 19 e 20).

Figura 19 - Ferramenta de perfuração danificada devido à passagem por um BOP anular que não abriu completamente

Fonte: acervo pessoal

Figura 20 - Mecanismo do dano em uma ferramenta de perfuração provocada por um preventor anular de BOP que não abriu completamente

Fonte: acervo pessoal

Além do prejuízo associado à possível catástrofe ambiental decorrente de um *blowout* e danos em outras ferramentas que a falha deste equipamento pode causar, há ainda a perda de tempo (e dinheiro) gasto para consertá-lo.

Figura 21 - Causas de tempo perdido em sondas de perfuração, excluindo tempo perdido aguardando condição de mar

Fonte: (PRITCHARD, 2012)

Embora de forma genérica, a Figura 21 mostra que dentre as falhas de equipamentos de sonda, o BOP representa um equipamento crítico, pois pode levar a parada total das operações quando falha. Um efeito indesejável disso refere-se ao fato de que, eventualmente, equipes e material de substituição para a execução do

reparo precisam vir de terra por helicóptero, isto, sem dúvida, encarece e atrasa o retorno do BOP à operação. Situação pior ocorre quando o BOP encontra-se submerso e falha, precisando ser retirado do fundo do mar para o reparo na superfície (geralmente, é inviável repará-lo no fundo). Esta manutenção corretiva pode durar mais de uma semana até que o BOP volte a operar normalmente.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são compilados os conhecimentos disponíveis na literatura a respeito do BOP, mais precisamente, do preventor anular, da teoria de análise de riscos, da teoria de inspeção e da teoria de confiabilidade.

3.1 ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE

Neste item, são discutidas as bases teóricas da engenharia de confiabilidade.

3.1.1 Definição de confiabilidade e taxa de falha acumulada

O embasamento teórico dos fundamentos da engenharia de confiabilidade foi utilizado para a formulação da confiabilidade do sistema em estudo (MODARRES, et al., 2010), (LEWIS, 1987). A confiabilidade, simbolizada por R , representa a probabilidade de um sistema em realizar com sucesso a sua função durante um dado intervalo de tempo. A confiabilidade é calculada (ou seja, não pode ser medida), adimensional e possui um valor limitado entre zero e um, sendo que quanto maior seu valor, mais confiável configura-se o sistema.

Por outro lado, a taxa de falha acumulada, simbolizada por F , é a probabilidade acumulada de um dado sistema falhar durante um dado intervalo de tempo. A taxa de falha acumulada também é calculada (ou seja, não pode ser medida), adimensional e possui um valor limitado entre zero e um, sendo que quanto maior seu valor, menos confiável é o sistema.

Pela definição, a relação entre a probabilidade acumulada de falhas (F) e a confiabilidade (R) de um componente qualquer são complementares, como indicado na equação (2):

$$F = 1 - R \quad (2)$$

Para os estudos de confiabilidade, faz-se necessário definir o significado de falha. De acordo com a norma NBR 5462 (ABNT, 1994), falha é o “término da capacidade de um item desempenhar a função requerida”. No presente trabalho,

serão considerados todos os tipos de falhas definidas na referida norma que, no entanto, possam ser detectáveis.

3.1.2 Definição de taxa de falha

A taxa de falha no intervalo $[t_1, t_2]$, simbolizada por λ , é definida como a probabilidade de que a falha ocorra neste intervalo (dado que a falha não ocorreu antes de t_1) dividido pelo comprimento do intervalo. Assim, demonstra-se (LEWIS, 1987) que a taxa de falha no intervalo infinitesimal compreendido entre $[t_1, t_2]$ é expressa pela equação (3).

$$\lambda(t) = \frac{dF(t)/dt}{R(t)} = -\frac{dR(t)/dt}{R(t)} \quad (3)$$

A priori, por uma questão de simplicidade, conservadorismo e falta de uma maior quantidade de informação, admite-se a hipótese de que a taxa de falha dos componentes em estudo é constante. Normalmente, a taxa de falha apresenta um comportamento constante ao longo da vida útil do equipamento, decorrente de falhas aleatórias no sistema, após as falhas prematuras (por exemplo, danos provocados pelo transporte ou falhas de fabricação) terem sido depuradas e antes das falhas por envelhecimento (como desgaste e corrosão) se manifestarem, conforme indicado na Figura 22, também conhecida como “curva da banheira”. A confiabilidade de um componente cuja taxa de falha (λ) é constante é dada pela equação (4).

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (4)$$

Figura 22 - Curva da banheira (taxa de falha em função do tempo)

Fonte: (BATISTA, et al., 2013)

Considera-se esta hipótese adequada para modelar o problema. Como justificativa, o BOP é testado antes do seu uso (etapa de comissionamento) e opera até o início do aumento da taxa de falha devido ao desgaste quando então passa por um processo de *overhaul* (etapa em que o BOP é completamente desmontado, inspecionado e os componentes sujeitos ao envelhecimento são substituídos). Pressupõe-se que eventuais falhas causadas por mecanismos aleatórios podem ser modelados por uma taxa de falha constante. Esta hipótese será validada a *posteriori* por meio de dados obtidos em campo.

3.1.3 Sistemas em série

Os sistemas em série (Figura 23) são aqueles em que a falha de um único componente causa a falha de todo sistema. A confiabilidade (R) de um sistema formado por componentes em série é o produto das confiabilidades individuais destes componentes (r_i), como indicado na equação (5).

$$R = \prod_{i=1}^n r_i \quad (5)$$

Figura 23 - Representação de componentes ligados em série

Fonte: acervo próprio

3.1.4 Sistemas em paralelo

Os sistemas em paralelo são aqueles em que a falha ocorre apenas quando todos os seus componentes falham, sendo a falha deste componente suprimida pela sua redundância. Há dois tipos de redundância: ativas e passivas.

3.1.4.1 Redundâncias ativas

Redundâncias ativas são aquelas que funcionam em conjunto o tempo todo e o seu funcionamento não depende da falha da sua respectiva redundância (Figura 24). A não-confiabilidade (F) de um sistema formado por componentes ativos em paralelo é o produto das não-confiabilidades destes componentes (f), como indicado na equação (6).

$$R = 1 - \prod_{i=1}^n f_i \quad (6)$$

Figura 24 - Representação de redundâncias ativas

Fonte: acervo próprio

3.1.4.2 Redundâncias passivas

Redundâncias passivas (ou *stand-by*) são aquelas que são ativadas somente quando há a falha de um dos componentes do sistema (conforme representado na Figura 25). Na formulação da confiabilidade deste tipo de sistema deve-se levar em conta tanto a confiabilidade do conjunto de detecção da falha quanto a confiabilidade do conjunto de comunicação para a sua redundância. A confiabilidade de duas redundâncias em *stand-by* é demonstrada por Modarres (2010) na equação (7):

$$R_s = R_1(t) + \int_0^t f_1(t_1) R_{ss}(t_1) R_2'(t_1) R_2(t - t_1) dt_1 \quad (7)$$

Onde,

$R_1(t)$ é a confiabilidade do componente 1 em um dado instante t .

$f_1(t)$ é a função densidade de probabilidade de falha do componente 1.

$R_{ss}(t_1)$ é a confiabilidade no permutado do componente 1 para o componente 2. Para este trabalho, considera este valor é constante e igual a um.

$R_2'(t_1)$ é a confiabilidade do componente 2, em um dado instante t , no modo passivo.

$R_2(t - t_1)$ é a confiabilidade do componente 2, após a permuta para sua operação (no instante t_1).

Caso as duas redundâncias sejam exatamente iguais e não haja possibilidade de falha na detecção de uma falha no seu funcionamento, na redundância que está em modo passivo e na comutação de uma redundância para outra, então, a equação anterior pode ser simplificada para a equação (8) (MODARRES, et al., 2010).

$$R = (1 + \lambda t) e^{-\lambda t} \quad (8)$$

Onde λ é a taxa de falha do referido componente, numericamente igual ao inverso do TMEF para taxas de falha constantes (MODARRES, et al., 2010). Considera-se que esta taxa de falha seja a mesma para as redundâncias que estão passivas e as que estão ativas. A comutação dos PODs ao longo da operação do BOP e o fato das válvulas que compõe os PODs operarem em sincronia (apesar do POD em *stand by* não receber o suprimento hidráulico) justificam esta hipótese.

Figura 25 - Representação de redundâncias passivas (*stand by*)

Fonte: acervo próprio

3.1.5 Efeito da manutenção preventiva

A manutenção preventiva tende a reduzir a degradação da confiabilidade do equipamento. De acordo com Lewis (1987), considerando a hipótese do efeito *as-good-as-new* (ou seja, após a manutenção preventiva, o sistema se torna tão confiável como novo), seu efeito sobre a confiabilidade pode ser descrito matematicamente como indicado nas equações (9) e (10).

$$R(t) = R(T).R(2T - T).R(3T - 2T) \dots R(t - n.T) \quad (9)$$

$$R(t) = R(T)^n . R(t - n.T) \quad (10)$$

Onde T é o intervalo médio entre manutenções (TMEM) e n é o inteiro do quociente entre t e T . Cabe notar que este efeito é válido apenas para componentes e sistemas que possuem taxa de falha crescente no tempo, ou seja, falham devido à ação de mecanismos de dano acumulativo.

Figura 26 - Representação do efeito da manutenção na confiabilidade de um sistema sem e com manutenção (depois de 360 dias acumulados de uso)

Fonte: acervo próprio

Para sistemas com a taxa de falha constante, o seu TMEF pode ser calculado pela equação (11).

$$TMEF = \frac{-t}{\ln(R(t))} \quad (11)$$

De acordo com a equação (10), pode-se considerar que para intervalos de tempo consideravelmente longos, a confiabilidade é função exclusiva do tempo médio entre as manutenções (TMEM):

$$R(t) = R(TMEM)^{\frac{t}{TMEM}} \quad (12)$$

Substituindo (11) em (12), pode-se deduzir o efeito da manutenção no limite de TMEF de sistemas com taxa de falha aproximadamente constante para um tempo suficientemente longo (13), utilizando a regra de L'Hospital resultando na equação (14).

$$\lim_{t \rightarrow \infty} TMEF = \frac{-t}{\ln \left(R(TMEM)^{\frac{t}{TMEM}} \right)} \quad (13)$$

$$\therefore TMEF = \frac{-TMEM}{\ln(R(TMEM))} \quad (14)$$

3.2 ESTATÍSTICAS DE FALHA DO SISTEMA

Há poucas bases de dados acerca do funcionamento de BOPs submarinos e as estatísticas existentes são pouco precisas. Isso se deve principalmente a três fatores. Primeiramente, a exploração de petróleo em águas submarinas tem sido relativamente recente, visto que o BOP submarino foi desenvolvido apenas em 1967 (FOSTER, et al., 1967). Há de se considerar que a exploração de petróleo em águas submarinas somente se tornou intensa com o aumento do preço do petróleo, a partir de 2003. De acordo com especialistas no assunto, o pré-sal brasileiro, por exemplo, tem a sua viabilidade apenas com o barril de petróleo valendo mais de US\$ 45 (DEUTSCHE WELLE, 2016), o que ocorreu apenas entre o período de 2005 a 2014, como indicado na Figura 27. Finalmente, muitas estatísticas de falha não são divulgadas por fabricantes e operadores de BOPs.

Figura 27 - Variação do preço do petróleo entre 2005 e 2015

Os poucos dados de confiabilidade disponíveis são de autoria da organização Oreda⁵ (*Offshore and Onshore Reliability Data*) e da agência reguladora norte-americana BSEE⁶ (*Bureau of Safety and Environmental Enforcement*).

3.3 GESTÃO DE RISCOS

Por definição, risco é o efeito das incertezas, sejam decorrentes de fatores internos ou externos, sobre os objetivos. Gerenciar o risco significa identificá-lo, analisá-lo e, em seguida, avaliar se este deve ser modificado pelo seu tratamento a fim de atender a seus critérios (ISO, 2009). Para tornar isso possível, atribui-se um valor numérico para o risco fazendo o produto da sua probabilidade de ocorrência (P_f) com a sua consequência C (em geral, expressa em unidades monetárias), como indica a equação (15).

$$Risco_{ISO31.000} = P_f(t) \cdot C \quad (15)$$

No contexto do BOP, gerenciar o risco significa não só identificar seus modos de falha, bem como sua(s) causa(s). Tendo o conhecimento do caminho que levam a estas falhas, faz-se necessário atribuir uma probabilidade para a sua ocorrência e a consequência gerada por cada uma destas falhas.

3.3.1 ISO 31.000 (2009): Gestão de riscos

A metodologia deste trabalho está estruturada nas diretrizes e orientações da norma ISO 31.000 (2009) para gerenciar o risco de falha do BOP anular. De acordo com esta norma, é necessário contextualizar o risco (1), identificá-lo (2), analisá-lo (3), avaliá-lo (4) e tratá-lo (5). As etapas 2, 3 e 4 são denominadas gestão do risco (Figura 28). Verificada a existência e o contexto do risco, os esforços são direcionados para

⁵ OREDA (*Offshore Reliability Data Handbook*) trata-se de uma Organização Não Governamental que reúne oito companhias de óleo e gás (dentre elas, a Petrobras) com o objetivo de compartilhar dados sobre falhas e confiabilidades de seus equipamentos.

⁶ BSEE (*Bureau of Safety and Environmental Enforcement*) denominação da agência norte-americana para a fiscalização de atividades de exploração de recursos naturais.

criar um modelo para entender e gerenciar o risco.

Figura 28 - Fluxograma de desenvolvimento e tratamento do risco

Fonte: (ISO, 2009)

Esta norma indica ferramentas para a análise e avaliação de riscos que são utilizadas neste trabalho, como o FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) e a FTA (Análise da Árvore de Falhas). Em que a primeira consiste em mapear todos os processos da atividade para identificar as possíveis falhas em cada etapa e o efeito destas sobre a etapa seguinte do processo e sobre o sistema, tendo por objetivo a melhoria do processo e a redução das falhas. Neste estudo, esta técnica será utilizada para relacionar falhas dos componentes sobre o preventor anular do BOP.

Enquanto a FTA consiste em mapear todos os processos da atividade para identificar o efeito das combinações de falhas destes sobre todo o sistema de forma lógica e sistemática, utilizando para a sua construção portas lógicas e para a sua solução a álgebra booliana, em analogia com circuitos elétricos.

3.3.2 API 581 (API, 2008): inspeção baseada no risco

O Documento API 581 – Risk Based Inspection é, até o momento, a única metodologia publicada em seus detalhes, formando um conjunto de procedimentos de cálculo que permitem a determinação tanto das consequências quanto da probabilidade de uma falha estrutural, em função das características de projeto, operação e de inspeção dos equipamentos. É sempre importante ressaltar que as consequências são função[sic], principalmente, das condições operacionais e das medidas de prevenção e mitigação de acidentes, não sendo influenciadas pelos planos de inspeção, que são agentes redutores da probabilidade de falha estrutural (ECKSTEIN *et al.*, 2002).

A contribuição desta norma para este trabalho está na avaliação do efeito da manutenção sobre o risco de falha. A premissa fundamental desta norma reside na manutenção e na inspeção preventiva, as quais podem tornar o sistema tão bom como se estivesse novo (*as-good-as-new*) ao restaurar a taxa de falha ao seu valor inicial. Essa premissa é utilizada para dimensionar a periodicidade das manutenções e inspeções sobre o sistema a fim de que o risco de falha não ultrapasse um determinado valor limite, conforme ilustra a Figura 29.

Figura 29 - Comportamento do risco após a manutenção de um sistema, conforme API 581

Fonte: adaptado de (API, 2008)

Outra premissa imprescindível extraída desta norma refere-se ao efeito da qualidade da manutenção sobre a taxa de falha do sistema. A API 581 prevê uma lista de verificação para acompanhar a qualidade da manutenção e para cada item, em conformidade com a norma, atribui-se uma pontuação ponderada por um coeficiente em função da sua relevância. O somatório da pontuação (*score*) obtida em todos os itens desta lista é ajustado em uma escala de 0 a 100% e é utilizado para calcular o coeficiente do fator de gestão da manutenção (F_{ms}) (16). Este coeficiente é multiplicado na taxa de falha do componente ou sistema (17). Para ilustrar o cálculo do F_{ms} , apresenta-se no Anexo A um trecho da lista de verificação da API 581 para o cálculo do SCORE.

$$F_{ms} = 10^{(-0,02 * SCORE + 1)} \quad (16)$$

Segundo a norma ISO 31.000, o risco é composto por dois componentes: o produto da probabilidade da falha e da sua consequência, como mostrado na equação (15). Por outro lado, de acordo com a norma API 581, a taxa de falha também é ponderada pelo fator de danos e pelo fator de qualidade de manutenção, como apontado na equação (17).

$$P_f(t)_{API581} = g_{ff} \cdot F_{ms} \cdot D_{ft}(t) \quad (17)$$

Onde,

g_{ff} é a taxa de falha (número de falhas/unidade de tempo);

F_{ms} é o fator de manutenção do sistema (adimensional);

D_{ft} é o fator de danos (unidade de tempo);

Uma vez que o risco de falha do sistema aumenta naturalmente com o tempo, esta norma estabelece um critério para limitar este risco, prevendo um dimensionamento da periodicidade de ações da manutenção e inspeção preventiva. Todavia, devido à dificuldade encontrada de calcular o fator de custo (FC) ou a consequência (C) em função da peculiaridade de estimar o custo de limpeza de um *blowout* para cada poço (ETKIN, 1999), o risco de falha envolvido não será calculado diretamente neste trabalho. No estudo das mudanças de projeto e manutenção, será analisado o impacto das mudanças no tempo médio entre falhas (TMEF) do sistema decorrentes destas modificações.

O fator de danos (D_f) é um coeficiente que avalia a quantidade de danos cumulativos e que pode alterar a taxa de falha do componente. Estes danos se devem ao processo de construção e das condições de trabalho (temperatura, pressão, esforços etc.). Neste estudo, considera-se que os mecanismos de falha (corrosão, fadiga, fragilização etc.) agem uniformemente sobre todas as redundâncias adicionadas ao sistema do BOP anular. Por hipótese, consideram-se aqui desprezíveis os efeitos de envelhecimento do BOP e que não haja diferença entre as redundâncias adicionadas ao sistema e, portanto, o fator de danos pode ser considerado o mesmo para todos os componentes e sistemas. Assim, o fator de danos independe das redundâncias adicionadas (equação (18)) e estará incorporado junto à taxa de falha de cada componente, conforme a equação (19).

$$D_{ft1} = D_{ft0} \quad (18)$$

$$P_f(t) = g_{ff} \cdot F_{ms} \cdot t \quad (19)$$

3.3.3 Modos de falha

No intento de gerir o risco, antes de tudo, convém identificar os modos de falha do sistema. Os principais modos de falha (falha no acionamento e falha na vedação) e as suas possíveis consequências imediatas estão resumidos a seguir na Tabela 3. Por hipótese, o inserto (elemento de vedação) é perfeitamente elástico e não sofre efeitos de histerese, fazendo com que a sua falha cause exclusivamente a falha na vedação do BOP anular.

Tabela 3 - Relação entre causas da falha, modo de falha e possível consequência

Causa da falha	Modo de falha	Possível consequência
Acionamento	Não fecha adequadamente	Gás no <i>riser</i>
	Não abre adequadamente	Dano em ferramentas
Vedação	Não veda	Gás no <i>riser</i>

Fonte: acervo próprio

Na literatura foram encontradas estatísticas de falha de cada um destes modos de falha (HOLAND *et al.*, 1987) (HOLAND *et al.*, 2012), indicados na Tabela 4. Para cada um dos quatro estudos conduzidos por Per HOLAND, relacionam-se os anos em que os dados foram coletados com o tempo acumulado de operação de todos os preventores anulares no estudo (tempo de anular), a quantidade de falhas do BOP anular registrada no período e o tempo médio entre falhas (TMEF). Em conformidade com a hipótese da taxa de falha constante, o TMEF é o inverso da taxa de falha do equipamento. Nestes estudos, a taxa de falha foi calculada como o quociente entre o número de falhas registradas no período estudado pelo tempo decorrido (20).

$$\text{Taxa de falha} = \frac{\text{Número de falhas acumuladas imediatamente após a falha}}{\text{Tempo de uso acumulado do BOP anular embaixo d'água (em dias)}} \quad (20)$$

Quando os dados permitem, calculam-se os TMEF para cada modo de falha, nas últimas colunas da Tabela 4. Caso contrário, são representados por uma interrogação. Todos estes dados estão expressos em dias acumulados de uso do BOP anular.

Tabela 4 - Resultados das estatísticas de falha obtidos por Per HOLAND (1987, 1997, 1999 e 2012)

Referência	Ano	Tempo de anular	n falhas	TMEF	TMEF MF 1 (acionamento)	TMEF MF2 (vedação)
Per HOLAND 1	1978-1986	16560*	?	200	?	?
Per HOLAND 2	1992-1996	3191*	?	333	?	?
Per HOLAND 3	1997-1998	7452	12	621	1242	1242
Per HOLAND 4	2007-2009	28150	24	1173	2166	2559

Fonte: acervo próprio

3.4 ESTUDOS DE CONFIABILIDADE DO BOP

Apesar dos notáveis acidentes ambientais e prejuízos envolvendo BOPs, relativamente poucos estudos foram feitos a respeito da sua confiabilidade e da análise de risco do seu funcionamento. Entre eles, os principais foram realizados por HOLAND e RAUSAND (1987) e HOLAND e AWAN (2012) que analisaram nas últimas quatro décadas a estatística de falhas de BOP, como já mencionado anteriormente. Seguindo esta abordagem estatística de falha, MIDÉ (2010) propôs uma árvore de falhas para o BOP e correlacionou a sua confiabilidade com a ocorrência de *blowouts*. Junuarilham (2012) estudou o risco de falha dos componentes críticos de um BOP operado por comando hidráulico discreto, para as operações de controle de poço e testes. Para calcular a confiabilidade do preventor anular, ZENGKAY (2013) aplicou a teoria das Redes de Petri na construção de um modelo, enquanto Lukin e Souza (2015) utilizaram as ferramentas da norma ISO 31.000 (2009) para a construção de um modelo que pudesse ser resolvido analiticamente. Todavia, ainda não há na literatura nenhuma análise centrada na relação entre a confiabilidade dos componentes e os sistemas do BOP, para a definição de estratégias de seu projeto e manutenção.

4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DO CÁLCULO DE CONFIABILIDADE DO BOP ANULAR

Este capítulo propõe uma metodologia de análise e cálculo da confiabilidade de um BOP anular que, posteriormente, poderá ser estendida a outros componentes do BOP.

4.1 ETAPAS DO TRABALHO

A sequência de etapas do trabalho é exposta na Figura 30, tendo como base a norma ISO 31.000.

Fonte: acervo próprio

As etapas são descritas detalhadamente a seguir. Com o risco relacionado à falha do BOP anular previamente contextualizado pelo acidente de Macondo (2010), a princípio, é proposto um modelo do funcionamento do equipamento em estudo com base nas patentes e normas encontradas na literatura. A identificação do risco de falha é feita pela construção de uma avaliação FMEA (Análise do Modo e Efeito de Falha) para se identificar os modos de falha dos componentes deste modelo (e suas consequências para a operação do BOP) em associação com a construção de uma árvore de falhas (FTA) para se identificar o efeito combinado destas falhas sobre o sistema.

A avaliação do risco de falha consiste em torná-lo quantitativo, fazendo-se uso de ferramentas da confiabilidade. A fim de garantir a confiabilidade dos resultados, o modelo matemático obtido é submetido a uma validação comparando-se o comportamento da taxa de falha e o tempo médio entre falhas previsto por este modelo com o tempo médio entre falhas do mesmo sistema encontrado em estatísticas na literatura. Na falta de dados disponíveis na literatura, serão estudadas falhas em campo de um BOP anular. Finalmente, com o modelo validado, são feitas propostas de mudanças no sistema, tanto em termos de projeto, como de gestão da manutenção para o tratamento do risco de falha. Estas propostas são simuladas no intento de se verificar quais delas causam maior impacto na melhoria da confiabilidade.

4.2 IDENTIFICAÇÃO DO RISCO

4.2.1 Detectando a falha

Quando em operação, há duas formas de detectar falhas ocultas no BOP: quando é demandado em um *kick* e não funciona ou através de testes periódicos. Quando em operação, os testes de acionamento e vedação são conduzidos geralmente entre duas e três semanas testando todos os PODs e anulares. Pressupõe-se que a execução destes testes periódicos não impacta na confiabilidade (e no TMEF) do sistema.

4.2.2 FMEA (Análise de Modo e Efeito de Falha)

Em seguida, faz-se necessário a construção de um FMEA (Análise de Modo e Efeito de Falha). Para cada componente envolvido no sistema de acionamento do BOP anular, foi identificado o principal mecanismo de falha, as causas desta, o efeito da falha sobre outros componentes e sobre o sistema como um todo (utilizando o diagrama de funcionamento do sistema e considerando que as falhas afetam apenas os componentes que estão à jusante do componente com falha), o TMEF (tomado como um indicativo da confiabilidade do componente) encontrado na literatura, os modos de detecção da falha (tendo como base a experiência profissional) e as práticas operacionais utilizadas para contornar este problema. O resultado da análise FMEA está mostrado nas Figuras 31 e 32.

Figura 31 - FMEA para o acionamento do BOP anular

No	Modo de falha	Causa	Efeito sobre		Medida da confiabilidade		Detecção	Proteção
			Outro componente	Sistema	TMEF (horas de BOP)	Fonte		
SV	Vazamento	Vazamento	Não fecha o anular	Não aciona	2515694	BSEE 2013	Indicação pelo ROV	Alterna para outro anular
							Anular não veda pressão	
							Mais fluido que o necessário para fechar o anular	
Câmara	Vazamento	Vazamento	Não fecha o anular adequadamente	Não aciona	185185	Nilo Jorge	Mais fluido que o necessário para fechar o anular	Alterna para outro anular
Vedação	Vazamento interno	Desgaste	Anular não veda	Não veda	61416	BSEE 2013	Anular não veda pressão	Alterna para outro anular
SEM	Falha no comando da SEM	Falha elétrica	SSV PS, SSV 1, SSV 2 não atuam	Não aciona	43827	BSEE 2013	Anular não veda pressão	Alterna para outro POD
MUX	Falha na passagem de sinal para o POD	Falha elétrica	SSV PS, SSV 1, SSV 2 não atuam	Não aciona	63938	OREDA 2009	Anular não veda pressão	Alterna para outro POD

Fonte: arquivo pessoal

Figura 32 - (cont.) FMEA para o acionamento do BOP anular

No	Modo de falha	Causa	Efeito sobre		Medida da confiabilidade		Detecção	Proteção
			Outro componente	Sistema	TMEF (horas de BOP)	Fonte		
CL	Vazamento	Erosão	Perda de pressão hidráulica nos PODs	Não aciona	2439024	OREDA 2009	Entrada frequente de bombas	Alterna para outra linha de suprimento
		Corrosão					Reduz pressão nos PODs	
		Vibração						
SSV PS	Trava na posição aberto / fechado	Não energiza a solenóide	Perda de pressão hidráulica nos PODs	Não aciona	66358	OREDA 2009	Não há indicação de fluxo ao atuar uma função	Alterna para outro POD
		Vazamento					Entrada frequente de bombas	
		Quebra da mola						
SPM PS	Trava na posição aberto / fechado	Não recebe pressão do piloto	Perda de pressão hidráulica nos PODs	Não aciona	1011404	OREDA 2009	Não há indicação de fluxo ao atuar uma função	Alterna para outro POD
		Vazamento						
		Quebra da mola						
MKR1	Pressão de saída inadequada	Quebra da mola	Perda ou ganho excessivo de pressão hidráulica no piloto do POD (SSV1)	Não aciona	117997	BSEE 2013	Pressão nos PODs	Alterna para outro POD
		Vazamento						Alterna para outro anular
		Ajuste inadequado						
MKR2	Pressão de saída inadequada	Quebra da mola	Perda ou ganho excessivo de pressão hidráulica na atuação do POD/ anular	Não aciona	117997	BSEE 2013	Pressão nos PODs	Alterna para outro POD
		Vazamento						Alterna para outro anular
		Ajuste inadequado						
HKR	Pressão de saída inadequada	Quebra do diafragma	Perda ou ganho excessivo de pressão hidráulica na atuação do POD/ anular	Não aciona	117997	BSEE 2013	Pressão nos PODs	Alterna para outro POD
		Vazamento						
		Ajuste inadequado						
SSV1	Trava na posição aberto / fechado	Não energiza a solenóide	Não atua a SPM 1	Não aciona	66358	OREDA 2009	Não há indicação de fluxo ao atuar uma função	Alterna para outro POD
		Vazamento					Entrada frequente de bombas	Alterna para outro anular
		Quebra da mola						
SPM 1	Trava na posição aberto / fechado	Não recebe pressão do piloto	Não fecha o anular	Não aciona	1011404	BSEE 2013	Indicação pelo ROV	Alterna para outro POD
		Vazamento					Não há indicação de fluxo ao atuar uma função	Alterna para outro anular
		Quebra da mola						
SSV2	Trava na posição aberto / fechado	Não energiza a solenóide	Não atua a SPM 2	Não aciona	66358	OREDA 2009	Não há indicação de fluxo ao atuar uma função	Alterna para outro POD
		Vazamento					Entrada frequente de bombas	Alterna para outro anular
		Quebra da mola						
SPM 2	Trava na posição aberto / fechado	Não recebe pressão do piloto	Não abre o anular	Não aciona	1011404	BSEE 2013	Indicação pelo ROV	Alterna para outro POD
		Vazamento					Não há indicação de fluxo ao atuar uma função	Alterna para outro anular
		Quebra da mola						

Fonte: arquivo pessoal

4.3 ANÁLISE DO RISCO

As árvores de falha (FTA) do BOP anular e seus subsistemas foram construídas com base no modelo de funcionamento dos seus componentes e do respectivo FMEA desenvolvido. Para a construção das FTAs, considera-se que o evento topo é a falha em vedar o poço com o anular em situação de *kick*. Parte-se do pressuposto que é necessário, pelo menos, um anular isento de falha para fechar e vedar o poço (ou seja, cria-se a possibilidade de ocorrência de *blowout* quando todos os anulares falham e a perfuração toma um *kick*).

4.3.1 Falha do sistema BOP anular

Tendo como base os modos de falha encontrados na literatura, foi construída a árvore de falha para um único BOP anular e para o conjunto destes, uma vez que a falha de um pode ser contornada alternando-se para outro anular. Considera-se que um anular falha quando o sistema de acionamento é incapaz de fechá-lo ou a sua borracha (inserto) não é capaz de vedar o poço (Figura 33). Estas falhas são detectáveis nos testes periódicos do BOP, no entanto, caso todos os anulares falhem durante a operação e ocorra um *kick*, cria-se a possibilidade de um *blowout*.

Todavia, esta análise apresenta uma limitação: caso um anular falhe no modo falha no acionamento, ainda que outro esteja funcionando perfeitamente cria-se o risco de dano em ferramenta (conforme descrito anteriormente). Este risco não será levado em conta nesta FTA. Apesar desta lacuna na análise, a melhoria da confiabilidade de um preventor anular também aumentará consequentemente a confiabilidade do preventor contra o modo de falha no acionamento de abertura.

Figura 33 - FTA da falha do sistema anular

Fonte: arquivo pessoal

4.3.2 Falha de um anular

Tendo como base a análise FMEA, foram identificadas as principais causas que levam um anular a não fechar adequadamente. Essa falha se deve principalmente aos componentes usados no acionamento que não fornecem pressão suficiente para o fechamento do anular (causadas por vazamento ou pela formação de um calço hidráulico, por exemplo), conforme indica a Figura 34. Por hipótese, considera-se que as causas que levam o BOP anular a não fechar adequadamente são as mesmas que o levam a não abrir completamente.

Figura 34 - FTA do acionamento de um preventor anular

Fonte: arquivo pessoal

4.3.3 Falha do acionamento dentro de um POD

Em face da complexidade de um POD, foi construída uma árvore de falha exclusiva para este, identificando os componentes que podem falhar e levar ao acionamento incompleto do sistema, como indicado na Figura 35.

Figura 35 - FTA de um POD

Fonte: arquivo pessoal

4.3.4 Falha do elemento de vedação

Outro fator que pode acarretar o funcionamento inadequado do BOP anular é o seu elemento de vedação (inserto), pois, conforme descrito anteriormente, pode falhar devido ao desgaste provocado pelo atrito com a coluna de perfuração (*stripping*) ou pelo contato com cascalhos abrasivos resultantes da perfuração. Pode-se observar a diferença entre um inserto novo (isento de dano) e um inserto danificado por desgaste nas Figuras 36 e 37 respectivamente. Na formulação do modelo, não se considera o efeito de histerese e da temperatura nas falhas do inserto, fazendo com que a falha na vedação seja o único modo de falha possível decorrente do seu desgaste. Em outras palavras, não se considera a possibilidade da falha do inserto causar a falha na abertura do BOP anular.

Figura 36: Inserto de BOP anular novo

Fonte: arquivo pessoal

Figura 37 - Inserto de BOP anular danificado com as marcas de desgaste identificadas por setas

Fonte: arquivo pessoal

4.4 AVALIAÇÃO DO RISCO

A norma ISO 31.000 prevê que o risco seja avaliado e, por definição, que lhe seja atribuído um valor. Após os modos de falha terem sido identificados, a próxima etapa deste trabalho consiste em quantificar e estimar a ocorrência de falha. O modelo de confiabilidade obtido com base na análise do sistema está ilustrado na Figura 38, com o emprego do diagrama de blocos de confiabilidade. Nota-se que apesar deste modelo apresentar um sistema com dois preventores anulares de BOP redundantes, a análise de confiabilidade é feita para apenas um deles.

Figura 38 - Diagrama de blocos de confiabilidade resultante da análise do sistema

Fonte: arquivo pessoal

Para o cálculo da confiabilidade, são propostos diferentes métodos para a solução dos modelos de confiabilidade exibidos na Figura 39. A composição dos blocos “A”, “B” e “C” serão detalhadas adiante para cada modelo.

Figura 39 - Resumo dos modelos utilizados no cálculo da confiabilidade do sistema

Fonte: arquivo pessoal

4.4.1 Modelo A

Com base nas árvores de falha obtidas, chega-se a três modelos de acionamento do BOP anular. O primeiro deles (modelo A) consiste em um modelo detalhado (e similar ao real) do mecanismo para o acionamento de um preventor anular de BOP com dois PODs e dois anulares. Este se caracteriza por possuir dois PODs, cada qual com duas funções (fechar anular superior e inferior), contudo, com quatro elementos do sistema comum para estas duas funções (SPM PS, SSV PS, MKR 1 e MKR 2), sendo que a falha em qualquer um destes causa a falha generalizada no POD onde se encontra. Destaca-se que todas as redundâncias são modeladas como ativas. Seu diagrama de blocos está representado na Figura 40.

Figura 40 - Diagrama de blocos de confiabilidade do modelo A

Fonte: arquivo pessoal

Os blocos A, B e C reúnem componentes do sistema e são descritos respectivamente na Figuras 41 a 43.

Figura 41 - Diagrama de blocos de confiabilidade do bloco An do modelo A

Fonte: arquivo pessoal

Figura 42 - Diagrama de blocos de confiabilidade do bloco Bn do modelo A

Fonte: arquivo pessoal

Figura 43 - Diagrama de blocos de confiabilidade do bloco Cn do modelo A

Fonte: arquivo pessoal

Usualmente, os modelos de confiabilidade complexos e de difícil solução

analítica podem ser resolvidos por métodos iterativos. As principais ferramentas iterativas para a sua resolução são o método dos *cutsets* e o método booleano (MODARRES, et al., 2010). O primeiro método consiste em calcular o complemento do somatório da probabilidade de falha dos componentes que levem à falha do sistema, no caso, o preventor anular. O segundo considera todas as possíveis combinações de falha e funcionamento dos blocos do sistema e o impacto de cada uma delas na funcionalidade do sistema. Os *cutsets* encontrados no modelo A são demonstrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Cutsets encontrados no modelo

Cutset	Blocos com falha
E1	(CI1, CI2, CI3);
E2	(C1, C2);
E3	(C1, A3);
E4	(C2, A1);
E5	(A1, A3);
E6	(B1);

Fonte: arquivo pessoal

No primeiro método, considera-se ser improvável que ocorram mais que dois *cutsets* simultaneamente. Assim, a confiabilidade pode ser calculada pela equação (21).

$$R(t) = 1 - \Pr(E_1 \cup E_2 \cup E_3 \cup E_4 \cup E_5 \cup E_6) \quad (21)$$

Onde E_n é a probabilidade de falha de um dado *cutset*. De acordo com a lógica booleana, a probabilidade de pelo menos um *cutset* ocorrer é dado pela Equação (22).

$$P(E_1 \cup E_2 \cup E_3 \cup E_4 \cup E_5 \cup E_6) = \prod_{i=1}^6 P(E_i) - \sum_{i \neq n} E_i \cdot E_n \quad (22)$$

O segundo método de cálculo (booleano) consiste em calcular a probabilidade de todas as combinações de cada um dos estados dos componentes e o estado geral do sistema em cada uma destas combinações. De acordo com Moderres (2010), este

método pode ser parcialmente ilustrado pela Tabela 6 em que o estado 1 corresponde ao componente operacional (sem falha), enquanto que no estado 0 o componente apresenta falha.

Tabela 6 - Trecho da Tabela de combinações dos estados dos componentes para o cálculo pelo método booleano

Combinação	Cl	C1	C2	A1	A1	B1	Status do sistema	Probabilidade em t (360 dias)
1	1	1	1	1	1	1	1	0,134
2	1	1	1	1	1	0	0	0,040
3	1	1	1	1	0	1	1	0,106

Fonte: arquivo pessoal

A Tabela 6 mostra as três primeiras combinações para o cálculo. Para calcular a probabilidade de ocorrência ao longo do tempo das 2^6 combinações possíveis, foi desenvolvido um algoritmo em C++ (Apêndice A).

4.4.2 Modelo B

O segundo modelo (modelo B) foi formulado com base em uma simplificação do primeiro. Neste, considera-se que as válvulas reguladoras de pressão, SEM, cabo MUX e as válvulas do *manifold* das linhas de alimentação hidráulica são independentes em cada função do POD, sendo, portanto, duplicados em cada função do POD. Em outras palavras, os blocos “C” são incorporados aos blocos “A” do modelo anterior, conforme ilustram as Figuras 44 e 45.

n_{CL} é a quantidade de linhas de alimentação;

R_2 é a confiabilidade da câmara hidráulica do preventor anular;

R_{pt} é a confiabilidade de pelo menos um POD funcionar;

R_3 é a confiabilidade da *shuttle valve*;

R_{ins} é a confiabilidade do inserto;

R_P é a confiabilidade de um POD;

n_P é a quantidade de PODs;

R_{REG} é a confiabilidade da válvula reguladora (MKR e HKR);

R_{SPM} é a confiabilidade da válvula SPM;

R_{SSV} é a confiabilidade da válvula solenoide (SSV);

R_{SEM} é a confiabilidade da SEM (Subsea Eletronic Module);

n_{SEM} é a quantidade de SEMs por POD;

R_8 é a confiabilidade do cabo MUX;

λ_{POD} é a taxa de falha de um POD (considerada constante);

4.4.3 Modelo C

A simplificação proposta pelo modelo B permite uma solução analítica para o mecanismo real de acionamento. Todavia, para o estudo do incremento de redundâncias, a dedução analítica ainda é complexa neste modelo. Para viabilizar o estudo, propõe-se uma nova simplificação em que todas as redundâncias são tratadas como ativas, isto é, funcionam em paralelo o tempo todo. O diagrama de blocos para o funcionamento do modelo C é mostrado na Figura 46.

Figura 46 - Diagrama de blocos de confiabilidade do modelo C

Fonte: arquivo pessoal

Assim, para um múltiplo de redundâncias ele pode ser simplificado conforme demonstra a Figura 47.

Figura 47 - Diagrama de blocos de confiabilidade do modelo C com n redundâncias

Fonte: arquivo pessoal

Cujas equações constitutivas se reduzem a:

Confiabilidade de um anular:

$$R_a = \left(\left(1 - (1 - R_{CL})^{n_{CL}} \right) R_2 \cdot R_{pt} \cdot R_3^{(np-1)} \right) R_{ns} \quad (26)$$

Confiabilidade de todos os PODs:

$$R_{pt} = 1 - (1 - R_p)^{np} \quad (27)$$

Confiabilidade da função em um POD:

$$R_p = R_{REG}^3 \cdot R_{SPM}^3 \cdot R_{SSV}^3 \cdot \left(1 - (1 - R_{SEM})^{n_{sem}}\right) \cdot R_8 \quad (28)$$

Onde os termos das equações anteriores são os mesmos do modelo B.

A finalidade deste modelo será mostrar o efeito da variação das redundâncias (linha de alimentação, dos PODs e das SEMs) na vida média (TMEF) do sistema.

4.5 METODOLOGIA DE CÁLCULO DA CONFIABILIDADE DO MODELO

Baseada nas formulações anteriormente descritas, a confiabilidade do sistema estudado (preventor anular) pode ser modelada matematicamente a partir da confiabilidade dos seus componentes ao longo de um intervalo de tempo de operação. A confiabilidade dos componentes foi calculada tendo como base o intervalo de tempo e o seu tempo médio entre falhas encontrado na literatura (considerando a hipótese de taxa de falha constante e que o equipamento encontra-se plenamente confiável no início da sua operação). O cálculo foi executado em planilhas Excel e a confiabilidade dos componentes do BOP ao longo do tempo pode ser vista na Tabela 7.

Tabela 7 - Cálculo da confiabilidade dos componentes ao longo do tempo acumulado de operação

Elemento					Intervalo de tempo acumulado (em dias)					
Número	Sigla	Componente	TMEF (horas)	Fonte	7	14	21	28	120	360
1	SL	Linha de suprimento	2439024	OREDA 2009	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	Cam	Câmara (externo / interno)	185185	Nilo Jorge	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,95
3	SV	Shuttle valve	2515694	BSEE	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	Reg	Reguladora	117997	BSEE	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,93
5	SPM	SPM	1011404	BSEE	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99
6	SSSV	Solenóide	66358	OREDA 2009	1,00	0,99	0,99	0,99	0,96	0,88
7	SEM	SEM	43827	BSEE	1,00	0,99	0,99	0,98	0,94	0,82
8	MUX	Cabo MUX	63938	OREDA 2009	1,00	0,99	0,99	0,99	0,96	0,87
ns	Ins	Inserto	40083	BSEE	1,00	0,99	0,99	0,98	0,93	0,81

Fonte: acervo próprio

A confiabilidade dos componentes calculada é, então, utilizada nas equações de confiabilidade desenvolvidas para calcular a confiabilidade do BOP anular. O cálculo que considera as variáveis de projeto também foi executado em planilhas Excel e será demonstrado a seguir.

4.6 PARÂMETROS DE REFERÊNCIA

Como referência, nas etapas de avaliação e tratamento do risco, o impacto das mudanças no projeto e na manutenção será comparado com o TMEF de um BOP de referência que possui os seguintes parâmetros:

- 3 Linhas de alimentação;
- 2 PODs, cada POD com 2 SEMs;
- 2 Preventores anulares de BOP;
- Manutenção preventiva completa (TMEM) a cada 720 dias de uso do BOP;
- Gestão de manutenção mediana (score de 50%);
- TMEF dos componentes extraídos do OREDA (2009) apud HOLAND *et. al.* (2012) e do trabalho de MOURA *et. al.* (2001);

Esses parâmetros se baseiam em um BOP usualmente encontrado em operação, enquanto o TMEM, por sua vez, em um dado encontrado no manual de um fabricante de BOP anular.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1.1 Estudo de casos de falha reais

Inicialmente, a hipótese de taxa de falhas constante foi verificada. Portanto, foram interpretados dados de falha em seis sondas operadas pela Petrobras no período de 2009 a 2014, totalizando 11.802 dias de uso do BOP anular⁷. Os dados dos equipamentos estudados são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Dados dos preventores anulares estudados em campo

Sonda	Modelo anular	Classe de pressão	Dias de BOP ⁸	Poços ⁹
1	B	10.000psi	1491	13
2	B	10.000psi	1306	13
3	B	10.000psi	1071	12
4	A	10.000psi	696	8
5	A	10.000psi	674	6
6	A	10.000psi	663	7

Fonte: arquivo pessoal

Em seguida, as falhas registradas em cada uma das sondas escolhidas são classificadas de acordo com a sua localização (anular superior ou inferior), modo de falha (acionamento ou vedação), intermitência (intermitente ou contínuo) e

⁷ Cada dia acumulado de uso do BOP corresponde à dois dias acumulados de uso do preventor anular, haja vista que há dois preventores anulares em cada BOP.

⁸ Corresponde ao total de dias acumulados de operação (em que o BOP encontra-se embaixo d'água).

⁹ Corresponde ao total de poços perfurados durante o período em análise.

necessidade de reparo corretivo imediato. Ainda são calculados os dias acumulados de operação com BOP (desde o início da sua entrada em operação) no momento da falha e a duração da falha. Os resultados são mostrados nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 - Dados das falhas nos preventores anulares durante a amostragem

Sonda	n falha na sonda	Descrição	Duraçã o (dias)	Tempo ocorrido do começo da falha (dias de BOP)
1	1	Não fechou adequadamente. Funcionou depois de dois ciclos de abertura e fechamento.	0,02	760
	2	Observado vazamento no BOP, de fluido do poço para o mar, durante a realização do teste de pressão do anular superior.	8,00	910
	3	Durante o teste do BOP foi observado vazamento pelo anular superior. Depois, com várias ciclagens de abertura e fechamento, ele vedou.	0,01	987
	4	Realizado um novo teste funcional do BOP antes de iniciar a sua movimentação e descobriu-se vazamento no POD amarelo na função “Abre anular superior”.	2,00	1.129
	5	Durante o teste do BOP anular, tanto superior quanto inferior, foi detectado vazamento da pressão do poço para o fundo do mar pelo orifício chorão do anular inferior.	7,00	1.261
	6	Tentando passar com ferramenta de diâmetro de 18 3/4" pelo anular superior sem sucesso.	2,00	1.278
2	1	Vazamento no anular superior	0,17	494
	2	Observado vazamento de água do bore do BOP pelo orifício de ventilação do anular superior durante o teste de pressão do mesmo.	4,00	799
	3	Gabarito passou com dificuldade pelo BOP anular inferior. Decidiu-se reparar o BOP anular inferior.	3,00	799
	4	Houve vazamento no BOP anular inferior no teste de alta pressão (6000 psi) do BOP após instalação, provocando a retirada deste.	14,00	1.306
3	1	Tentativa de teste do Anular superior do BOP, sem sucesso e observado ganho no <i>trip-tank</i> - passagem pelo anular/ Detectado vazamento no Anular Superior no teste contra o DP 5". Solucionou-se alterando a pressão de fechamento do mesmo para 2150 psi.	0,15	720

2	Ao fechar o BOP Anular Inferior utilizando o POD Azul, ocorre vazamento de fluido hidráulico na taxa de 4 GPM.	0,10	803
3	Tentou-se testar o Anular Superior com 300 psi, sem êxito. Foi necessário ciclar três vezes para se conseguir teste OK.	0,02	1.014

Fonte: arquivo pessoal

Tabela 10 - Dados das falhas nos preventores anulares durante a amostragem

Son-da	n falha na sonda	Descrição	Duração (dias)	Tempo ocorrido do começo da falha (dias de BOP)
4	1	Retirado BOP para reparo nos vazamentos das gavetas #2 e #3, na <i>shuttle valve</i> e na câmara de abertura de <i>lower anular</i>.	11,00	30
	2	Durante o teste do BOP anular superior observou-se a ocorrência de ganho de pressão no anular superior.	0,10	187
	3	Topada da ferramenta de diâmetro de 18 3/4" no BOP anular.	0,10	379
5	1	Durante o teste de estanqueidade do BOP, foi observado um vazamento do interior do BOP para a câmara de acionamento do pistão de fechamento do anular superior. O BOP anular precisou ser desconectado para a substituição dos selos do atuador.	7,00	303
	2	Dano na borracha do elemento de vedação do anular superior. Foi observado um pedaço de borracha ao se iniciar içamento do conjunto para o transportador. Repetido o teste, evidenciou-se a falha do elemento de vedação.	2,00	563
	3	BOP anular superior obstruindo a passagem da ferramenta de diâmetro de 18 3/4".	0,55	650
6	1	Ao passar uma ferramenta de diâmetro de 18 3/4" pelo BOP a ferramenta topou no anular superior. Como as leituras de inclinação do BOP e da <i>flex joint</i> mostravam 0º, não havia desalinhamento da ferramenta, o que indica que o anular superior não estava completamente aberto.	0,10	239
	2	Realizado o primeiro teste do BOP anular inferior, com resultado falho. Drenada a pressão, ciclado o	0,01	271

	BOP anular várias vezes e, posteriormente, repetido o teste com resultado positivo.		
3	Ao descer a última seção para assentar uma ferramenta na cabeça do poço, a ferramenta topou 10 m acima do ponto de assentamento, onde está o topo do anular superior.	2,00	505

Fonte: arquivo pessoal

A classificação de cada uma das falhas encontra-se exposta na Tabela 11.

Tabela 11 - Classificação das falhas

Sonda	no falha geral	Localização (Superior = 1, Inferior = 2)	Modo de falha (1 = acionamento, 2 = vedação)	Falha intermitente? (Sim = 2, Não = 1)	Puxou BOP para reparo? (Sim = 2, Não = 1)
1	1		2	2	1
	2	1	2	1	2
	3	1	2	2	1
	4	1	1	1	2
	5	1	1	1	2
	6	1	1	2	1
2	7	1	2	2	1
	8	1	1	1	2
	9	2	1	1	2
	10	2	2	1	2
3	11	1	2	2	1
	12	2	1	2	1
	13	1	2	2	1
4	14	2	1	1	2
	15	1	1	2	1
	16	?	1	1	1
5	17	1	1	1	2
	18	1	2	1	2
	19	1	1	1	1
6	20	1	1	1	1
	21	2	2	2	1
	22	1	1	1	2

Fonte: arquivo pessoal

A taxa de falha instantânea (conforme a classificação) é calculada dividindo-se o número de falhas acumuladas pelo dobro do número de dias acumulados de uso (dias de BOP molhado), uma vez que todos os BOPs estudados possuem dois preventores anulares.

5.1.1.1 Taxa de falha geral

Inicialmente todos os dados de taxa de falha são compilados em um único gráfico da taxa de falha em função do tempo. Os resultados são mostrados na Figura 48. Observa-se, em todos gráficos obtidos, que a taxa de falha apresenta um decaimento rápido nos primeiros dias e em um segundo momento seu valor torna-se

praticamente constante, a partir do 200º. dia acumulado de uso. No entanto, há uma ligeira tendência de aumento da taxa de falha a partir do 1.000º. dia acumulado de uso, conforme pode ser visto na Figura 48. Interpola-se um polinômio de 4ª ordem para representar o comportamento da taxa de falha.

Figura 48 - Taxa de falha (incluindo todas as falhas) em função do tempo de uso do BOP

Fonte: arquivo pessoal

Excluindo os primeiros 200 dias, a magnitude da taxa de falha pode ser resumida na Tabela 11. Nesta Tabela, são mostrados o maior (*Max*) e o menor (*Min*) valor da taxa de falha registrada encontrados no intervalo de tempo entre 200 e 1.400 dias acumulados de uso de BOP.

Tabela 12 - Medidas de posição da taxa de falha, considerando todas as falhas

Geral	Taxa de falha (x10 ⁻³ /Dia de uso do BOP anular)		
	Média	Max	Min
Todos os dados	1,85	3,96	0,66

Fonte: arquivo pessoal

5.1.1.2 Taxa de falha por modo de falha

Os dados de falha são divididos por modo de falha nas Figuras 49 e 50.

Figura 49 - Taxa de falha (falhas apenas do modo de falha 1) em função do tempo de uso do BOP

Fonte: arquivo pessoal

Figura 50 - Taxa de falha (falhas apenas do modo de falha 2) em função do tempo de uso do BOP

Fonte: arquivo pessoal

Excluindo os primeiros 200 dias, a magnitude das taxas de falha pode ser resumida na Tabela 13 em função do modo de falha.

Tabela 13 - Medidas da posição das taxas de falha em função do modo de falha

Modo de falha	Taxa de falha ($\times 10^{-3}$ /Dia de uso do BOP anular)		
	Média	Max	Min
1	1,97	3,96	0,44
2	1,05	1,85	0,66

Fonte: arquivo pessoal

5.1.1.3 Taxa de falha por tipo de falha

Os dados de falha são divididos por tipo de falha (intermitente ou não intermitente) nas Figuras 51 e 52.

Figura 51 - Taxa de falha (falhas apenas não intermitentes) em função do tempo de uso do BOP

Fonte: arquivo pessoal

Figura 52 - Taxa de falha (falhas apenas intermitentes) em função do tempo de uso do BOP

Fonte: arquivo pessoal

Excluindo os primeiros 200 dias, a magnitude das taxas de falha pode ser resumida na Tabela 14 em função do modo de falha.

Tabela 14 - Medidas da posição das taxas de falha em função do tipo de falha

Tipo de falha	Taxa de falha ($\times 10^{-3}$ /Dia de uso do BOP anular)		
	Média	Max	Min
Intermitente	1,31	2,67	0,66
Não intermitente	1,69	2,64	0,55

Fonte: arquivo pessoal

5.1.1.4 Taxa de falha por localização da falha

Os dados de falha são divididos por localização da falha (no anular superior ou inferior) nas Figuras 53 e 54.

Figura 53 - Taxa de falha (falhas apenas no anular superior) em função do tempo de uso do BOP

Fonte: arquivo pessoal

Figura 54 - Taxa de falha (falhas apenas no anular inferior) em função do tempo de uso do BOP

Fonte: arquivo pessoal

Excluindo os primeiros 200 dias, a magnitude das taxas de falha pode ser resumida na Tabela 15 em função do modo de falha.

Tabela 15 - Medidas da posição das taxas de falha em função do local da falha

Local	Taxa de falha (x10 ⁻³ /Dia de uso do BOP anular)		
	Média	Max	Min
Superior	2,65	4,18	1,10
Inferior	1,93	3,69	1,25

Fonte: arquivo pessoal

5.1.1.5 Análise dos resultados obtidos em campo

Resumidamente, os resultados do TMEF obtidos em função da classificação da falha, excluindo os primeiros 200 dias de operação (período transiente), são mostrados na Tabela 16:

Tabela 16 - Resultados da análise de falhas em campo

Classificação da falha	TMEF (dias de uso do BOP)
Todas as falhas	536
Modo de falha 1	908
Modo de falha 2	1.311
Falhas intermitentes	1.311
Falhas não intermitentes	908
Anular superior	843
Anular inferior	1.967

Fonte: arquivo pessoal

Observa-se uma discrepância entre os resultados, quando classificados segundo os critérios anteriormente definidos em comparação com a taxa de falha média do BOP anular. As hipóteses para esta discrepância são apresentadas a seguir como modo de falha, tipo de falha e localização de falha.

O modo de falha: observa-se que a falha no sistema de acionamento é mais prematura que a falha no elemento de vedação (inserto). Atribui-se a isso a maior complexidade do sistema envolvido no acionamento (número e complexidade dos componentes envolvidos) do que os componentes associados à vedação (tendo em vista que, hipoteticamente, a falha na vedação é causada exclusivamente pela falha no inserto).

Tipo de falha: observa-se que falhas intermitentes são menos comuns que as falhas contínuas (não-intermitentes). Conjectura-se que a discrepância observada nos valores de TMEF é causada pela capacidade de observar e de registrar este tipo de falha. Partindo-se deste pressuposto, acredita-se que valores de TMEF atribuídos ao preventor anular no estudo de *HOLAND et. al.* (2012) terem sido maiores que nos estudos anteriores devido ao fato de sua base de dados omitir este tipo de falha.

E, finalmente, localização da falha. Curiosamente, as falhas nos anulares superiores tendem a ser mais frequentes do que nos anulares inferiores. Uma possível

explicação para isto deve-se ao fato do anular superior ser utilizado prioritariamente no fechamento do poço, o que se traduz em maior uso. Isso ocorre por dois motivos: primeiro, quando um preventor dispõe de redundâncias, via de regra, fecham-se aquelas que estão mais acima (caso haja um vazamento entre os preventores, aciona-se a sua redundância localizada imediatamente abaixo). Segundo, nos BOPs em estudo, o anular superior encontra-se localizado no LMRP, enquanto o anular inferior está no *stack* (assim, em caso de falha em operação, é preferível desconectar o LMRP do *stack* para retirada e reparo do que retirar todo o BOP para reparar o anular inferior). Para contornar esta diferença, no modelo numérico ambos preventores anulares estarão situados no LMRP.

5.1.2 Modelo numérico de confiabilidade

Introduzindo os valores de TMEF dos componentes compilados de HOLLAND (2012) *apud* OREDA, (2009) nas equações constitutivas do sistema, calcula-se a confiabilidade de um preventor anular para valores de tempo acumulado de operação de BOP predefinidos. Cabe notar que este cálculo não leva em conta os efeitos da manutenção. Os resultados do cálculo da confiabilidade do preventor anular (R_a) para os modelos A, B e C são mostrados nas Tabelas 16 a 19.

Tabela 17 - Resultado do cálculo de confiabilidade para o modelo A (resolvido por *cutsets*)

Modelo A (Cutsets)	Cálculo\ Dias acumulados de uso do BOP	7	14	21	28	120	360	720	1080	1440	1800
	Confiabilidade de um anular (R_a)	0,99	0,99	0,98	0,98	0,84	0,29	*	*	*	*
	Ln (Confiabilidade de um anular)	-0,01	-	-	-	-	-	*	*	*	*
	TMEF com manutenção	1302	1237	1179	1126	711	293				

Fonte: arquivo pessoal

No modelo A resolvido por *cutsets*, foi observado que, para intervalos de tempo maiores que 720 dias de uso de BOP, o cálculo da confiabilidade do anular resultou em números negativos. Atribui-se a isso o fato deste modelo simplificado não considerar a combinação da ocorrência de mais de dois *cutsets* simultaneamente no seu cálculo.

Tabela 18 - Resultado do cálculo de confiabilidade para o modelo A (resolvido pelo método booleano)

Modelo A (Booleano)	Cálculo\ Dias acumulados de uso do BOP	7	14	21	28	120	360	720	1080	1440	1800
	Confiabilidade de um anular (R_a)					0,86	0,50	0,19	0,06	0,02	
	Ln (Confiabilidade de um anular)					-0,15	-0,69	-1,66	-2,81	-3,91	
	TMEF com manutenção					796	519	434	384	368	

Fonte: arquivo pessoal

Tabela 19 - Resultado do cálculo de confiabilidade para o modelo B

Modelo B	Cálculo\ Dias acumulados de uso do BOP	7	14	21	28	120	360	720	1080	1440	1800
	Confiabilidade da função no POD	0,99	0,97	0,96	0,94	0,77	0,45	0,19	0,08	0,03	0,01
	Ln (Confiabilidade da função no POD)	-0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Confiabilidade da função em ambos os PODs	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	0,79	0,48	0,27	0,14	0,07
	Ln (Confiabilidade da função em ambos os PODs)	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-
	Confiabilidade de um anular (R_a)	0,99	0,99	0,98	0,98	0,88	0,60	0,28	0,12	0,05	0,02
	Ln (Confiabilidade de um anular)	-0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	TMEF com manutenção	1319	1286	1255	1226	971	709	572	511	475	452

Fonte: arquivo pessoal

Tabela 20 - Resultado do cálculo de confiabilidade para o modelo C

Modelo C	Cálculo\ Dias acumulados de uso do BOP	7	14	21	28	120	360	720	1080	1440	1800
	Confiabilidade da função no POD	0,99	0,97	0,96	0,94	0,77	0,45	0,19	0,08	0,03	0,01
	Ln (Confiabilidade da função no POD)	-0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Confiabilidade da função em ambos os PODs	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95	0,69	0,35	0,15	0,06	0,03
	Ln (Confiabilidade da função em ambos os PODs)	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-
	Confiabilidade de um anular	0,99	0,99	0,98	0,98	0,87	0,53	0,20	0,07	0,02	0,01
	Ln (Confiabilidade de um anular)	-0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	TMEF com manutenção	1299	1249	1204	1163	840	572	452	403	377	360

Fonte: arquivo pessoal

Os resultados da confiabilidade calculada são compilados e comparados no gráfico da Figura 55. A confiabilidade do BOP anular ainda é comparada com o modelo de confiabilidade baseado em rede de Petri desenvolvido por Zengkay (2013).

Figura 55 - Comparação da confiabilidade calculada pelos modelos A, B e C e de Zengkay (2013) do BOP anular em função dos dias de operação do BOP (eixo x).

Fonte: arquivo pessoal

A partir da confiabilidade obtida, interpola-se, com boa correlação, polinômios de ordem 3 para representar a curva de confiabilidade no tempo descrita por cada um dos modelos. Estes polinômios juntamente com as suas derivadas de primeira ordem são mostrados a seguir nas Tabelas 20 e 21.

Tabela 21 – Polinômios interpoladores para representar a confiabilidade dos modelos A, B e C e de Zengkay (2013) do BOP anular em função dos dias de operação do BOP.

Modelo	Polinômio interpolador
A (cutsets)	$R(t) = 5.10^{-9}.x^3 - 5.10^{-6}.x^2 - 7.10^{-4}.x + 1$
A (booleano)	$R(t) = -7.10^{-11}.x^3 + 8.10^{-7}.x^2 - 1,6.10^{-3}.x + 1$
B	$R(t) = -4.10^{-11}.x^3 + 5.10^{-7}.x^2 - 1,3.10^{-3}.x + 1$
C	$R(t) = -1.10^{-10}.x^3 + 8.10^{-7}.x^2 - 1,6.10^{-3}.x + 1$
Zengkay (2013)	$R(t) = -3.10^{-11}.x^3 + 5.10^{-8}.x^2 - 6.10^{-4}.x + 1$

Fonte: arquivo pessoal

Tabela 22 – Primeira derivada dos polinômios interpoladores para representar a confiabilidade dos modelos A, B e C e de Zengkay (2013) do BOP anular em função dos dias de operação do BOP.

Modelo	Polinômio interpolador
A (cutsets)	$R'(t) = 1,5.10^{-8}.x^2 - 1.10^{-5}.x - 7.10^{-4}$
A (booleano)	$R'(t) = -2,1.10^{-10}.x^2 + 1,6.10^{-6}.x - 1,6.10^{-3}$
B	$R'(t) = -1,2.10^{-10}.x^2 + 1.10^{-6}.x - 1,3.10^{-3}$
C	$R'(t) = -3.10^{-10}.x^2 + 1,6.10^{-6}.x - 1,6.10^{-3}$
Zengkay (2013)	$R'(t) = -9.10^{-11}.x^2 + 1.10^{-7}.x - 6.10^{-4}$

Fonte: arquivo pessoal

Com estes polinômios, calcula-se a taxa de falha instantânea de cada modelo do preventor anular ao longo do tempo utilizando a equação (2). Os resultados do cálculo da taxa de falha instantânea para os modelos B, C e do modelo proposto por Zengkay (2013) estão mostrados na Figura 56. Nesta mesma Figura, demonstram-se as taxas de falha medidas em campo juntamente com a sua linha de tendência para efeito de validação dos modelos.

Figura 56 – Taxa de falha instantânea em função do tempo acumulado de operação do BOP.

Fonte: arquivo pessoal

Observa-se que na maior parte do intervalo analisado, há uma boa aderência dos resultados dos modelos quando comparados com as taxas de falha em campo. Os modelos desenvolvidos apresentaram uma taxa de falha crescente ao longo do tempo, com exceção do modelo C que teve uma queda na taxa a partir de 1.000 dias acumulados de uso. É possível notar um ligeiro incremento da taxa de falha após o BOP completar 900 dias acumulados de uso, cujo comportamento idêntico se verifica no modelo de Zengkay (2013) no modelo B. Os dados de campo, entretanto, exibiram uma queda na taxa nos primeiros 200 dias acumulados de operação (período de mortalidade infantil) que não é verificada em nenhum dos modelos.

Apesar da taxa de falha do sistema não ser invariável, os valores de TMEF dos modelos numéricos foram calculados partindo-se do pressuposto que possuem uma taxa de falha aproximadamente constante. Verifica-se uma boa aderência desta hipótese pela correlação linear observada quando o logaritmo da confiabilidade é plotada em função do tempo (em dias de operação de BOP), como indicado na Figura 57.

$$\ln(R) = -\frac{1}{TMEF} \cdot t \quad (29)$$

Figura 57 - Gráfico de $-\ln(R)$ dos modelos A, B, C e de Liu Zengkay para o BOP anular em função do tempo do BOP em operação, em dias de operação.

Fonte: arquivo pessoal

Os resultados obtidos pela análise numérica são expostos na Tabela 22.

Tabela 23 - Resultados do TMEF calculado dos diferentes modelos da análise numérica.

Modelo	TMEF sem manutenção (em dias de uso do BOP)	TMEF considerando manutenção a cada 720 dias (em dias de uso do BOP)
A (cutset)	288	293
A (booleano)	361	424
B	460	572
C	365	452
Liu Zengkay	1.436	*

Fonte: arquivo pessoal

5.1.3 Validação do modelo

Em seguida, os TMEF calculados foram validados comparando a estatística de falha do sistema encontrada na literatura com os resultados das simulações. Nas colunas da Tabela 24, são mostrados, respectivamente, a fonte da informação, o ano ou período de obtenção do dado, o tempo de funcionamento do BOP anular, a quantidade de falhas observadas no período, o TMEF do sistema e dos modos de falha de acionamento e vedação. O TMEF é calculado conforme a equação (30), proposta por HOLAND (1987).

$$TMEF_{calc} = \frac{s}{n} \quad (30)$$

Onde s é o tempo total em que o sistema ou componentes está em operação e n é o número de falhas registradas no período. Uma vez que o TMEF do sistema é obtido estatisticamente, são calculados os limites de confiança superior (max) e inferior (min) com base na distribuição de Chi-quadrado (considerando 95% de confiança), também de acordo por HOLAND (1987).

$$TMEF_{sup} = \left(\frac{1}{2s} \chi^2_{0.95, 2n} \right)^{-1} \quad (31)$$

$$TMEF_{inf} = \max \left[0; \left(\frac{1}{2s} \chi^2_{0.05, 2(n+1)} \right)^{-1} \right] \quad (32)$$

Os dados de TMEF obtidos pelos modelos numéricos são comparados com os obtidos da literatura. São comparados os dados do TMEF do sistema (Figura 58) quanto do TMEF esperado para cada modo de falha (Figura 59).

Tabela 24 - Comparação dos TMEF dos resultados obtidos pela aplicação dos modelos numéricos com os dados de campo com os resultados encontrados na literatura, por falhas gerais.

TMEF BOP anular (dias de uso)						
Referência	Ano	Tempo de uso do anular	n falhas	Todas as falhas		
				Max	Med	Min
Per HOLAND 1	1978-1986	16.560*	?	250	200	166
Per HOLAND 2	1992-1996	3.191*	?	?	333	?
Per HOLAND 3	1997-1998	7.452	12	1.076	621	383
Per HOLAND 4	2007-2009	28.150	24	1.619	1.173	834
Dados PETROBRAS	2005-2014	11.802	22	843	536	350
Modelo A, cutsets (LUKIN)	2015	-	-	-	293	-
Modelo A, booleano (LUKIN)	2015	-	-	-	434	-
Modelo B (LUKIN)	2015	-	-	-	572	-
Modelo C (LUKIN)	2015	-	-	-	452	-
Modelo Liu ZENGKAY	2013	-	-	-	1436	-

Fonte: arquivo pessoal

Tabela 25 - Comparação dos TMEF dos resultados obtidos pela aplicação dos modelos numéricos com os dados de campo com os resultados encontrados na literatura, dividido por modo de falha.

TMEF BOP anular (dias de uso)					
Referência	Ano	Tempo de uso do anular	n falhas	MF 1 (acionamento)	MF2 (vedação)
Per HOLAND 1	1978-1986	16.560*	?	?	?
Per HOLAND 2	1992-1996	3.191*	?	?	?
Per HOLAND 3	1997-1998	7.452	12	1.242	1.242
Per HOLAND 4	2007-2009	28.150	24	2.166	2.559
Dados PETROBRAS	2005-2014	11.802	22	908	1.311
Modelo A, cutsets (LUKIN)	2015	-	-	354	1.670
Modelo A, booleano (LUKIN)	2015	-	-	747	1.670
Modelo B (LUKIN)	2015	-	-	1.216	1.670
Modelo C (LUKIN)	2015	-	-	862	1.670
Modelo Liu ZENGKAY	2013	-	-	?	?

Fonte: arquivo pessoal

Uma vez verificado que nos trabalhos 1 a 3 de Per HOLAND incluem-se dados de falha de BOPs com mecanismo de controle hidráulico discreto (tecnologia anterior ao controle multiplexado)¹⁰, estes não serão utilizados para a análise.

¹⁰ Neste mecanismo de controle dos PODs, as válvulas solenoides ficam na superfície (embarcação), não há cabo MUX e, no lugar deste, há um cabo umbilical que contém as linhas piloto a justante das válvulas solenoides que comandam as válvulas SPM.

Figura 58 - Comparação do valor de TMEF para o BOP anular segundo os modelos numéricos e estatísticas de falha de campo e da literatura

Fonte: arquivo pessoal

Figura 59 - Comparação do valor de TMEF para cada modo de falha para o BOP anular segundo os modelos numéricos e estatísticas de falha de campo e da literatura

Fonte: arquivo pessoal

Observa-se uma boa aderência do TMEF do sistema de todos modelos propostos em relação ao obtido pela análise em campo, considerando-se os intervalos de confiança. Nota-se que o valor do TMEF do quarto estudo de HOLLAND *et al.* (2012) foi maior que os observados pelas sondas que operam para Petrobras. Uma explicação é que os dados em que ele se baseou foram da agência de fiscalização (BSEE) e não do operador de BOP e, conseqüentemente, podem ter sido omitidas falhas intermitentes.

Ao se analisar o TMEF de cada modo de falha, verifica-se que o modelo B apresentou melhores resultados no modo de falha do acionamento. Os demais modelos apresentaram TMEF menores que o do modelo B neste quesito. Desta constatação, pode-se afirmar que a hipótese de PODs em redundância passiva se mostrou melhor que a consideração de todas as redundâncias serem ativas. Cabe notar que, apesar de válvulas solenoides (com exceção da SSV PS) se movimentam igualmente em ambos os PODs, o POD que está inativo não recebe suprimento hidráulico e a sua maior confiabilidade pode ser explicada pela ausência de golpes de aríete e vibrações provocadas pelo fluxo hidráulico nesta situação. Destas observações, recomenda-se o modelo B para análises futuras.

Com o modelo validado, simula-se a influência da adição de redundâncias, da

redução na periodicidade das manutenções preventivas, além da melhoria da qualidade da manutenção e da vida útil dos componentes do sistema na variação do risco de acionamento do BOP anular.

5.1.4 Variação do número de redundâncias

Inicialmente variou-se o número de redundâncias do sistema e procurou-se saber sobre sua influência no incremento do risco de falha. Foram estudados o impacto das linhas de alimentação (*conduit lines* e *hot lines*), quantidade de PODs e quantidade de SEMs/POD, no incremento do TMEF do preventor anular do modelo C, conforme ilustra a Figura 60.

Figura 60 - Representação das redundâncias do sistema de acionamento do BOP anular

Fonte: arquivo pessoal

Os resultados das simulações do impacto da variação do número de redundâncias no TMEF do preventor anular podem ser vistos nas Figuras 61 e 62. Nesta simulação, uma dada redundância é adicionada ou reduzida de cada vez. Os resultados desta análise de sensibilidade são mostrados a seguir na Tabela 26.

Tabela 26 - Tabela de cálculo para a análise de sensibilidade das redundâncias no TMEF do sistema

QTD de PODs	QTD de linhas de alimentação	QTD de SEM/POD	Confiabilidade da função no POD	Confiabilidade de um anular
1	3	2	0,448	0,427
2	3	2	0,448	0,661
3	3	2	0,448	0,788
4	3	2	0,448	0,857
2	3	2	0,448	0,661
2	1	2	0,448	0,659
2	2	2	0,448	0,661
2	3	2	0,448	0,661
2	4	2	0,448	0,661
2	3	3	0,460	0,674
2	3	1	0,380	0,585
2	3	4	0,462	0,676

Fonte: arquivo pessoal

Os resultados obtidos são ilustrados nos gráficos das Figuras 61 e 62.

Figura 61 - Variação do TMEF do BOP anular em função do número de redundâncias

Fonte: arquivo pessoal

O gráfico da Figura 62 resume o quanto a adição de uma redundância ao sistema provoca no TMEF do sistema (em termos relativos ao TMEF original).

Figura 62 - Impacto da redundância no TMEF do BOP anular

Fonte: arquivo pessoal

De acordo com o modelo C, a simulação mostrou que a adição de um POD se mostrou mais eficiente para aumentar a confiabilidade seguida pela adição de uma SEM e de linhas de alimentação (*supply lines*).

5.1.5 Análise de sensibilidade dos componentes do sistema anular

Uma possibilidade encontrada para reduzir o risco de falha no acionamento do BOP anular foi melhorar a confiabilidade dos seus componentes (medido pelos seus TMEF). O resultado do estudo da variação do risco de falha do sistema em função da variação do TMEF de cada componente do modelo B pode ser visto na Figura 63. Neste estudo, o impacto no TMEF do sistema foi calculado variando-se individualmente o valor do TMEF de cada componente para 400%, 200%, 50% e 25% do seu valor original.

Figura 63 - Análise da variação do TMEF dos componentes e sua influência na variação do TMEF do sistema

Fonte: arquivo pessoal

Observa-se que alguns componentes causam maior impacto no TMEF do

sistema do que outros e que a melhoria da confiabilidade dos componentes que apresentam os menores TMEF não necessariamente causa o maior impacto na redução do risco do sistema, conforme ilustra a Figura 63. Em especial, para um BOP anular, o inserto (borracha de vedação) e as válvulas solenoides e as válvulas reguladoras são os mais críticos no impacto do tempo médio entre as falhas do preventor. Atribui-se a criticidade de falha destes componentes ao fato do primeiro não ter redundância e possuir um baixo TMEF, enquanto que o segundo, apesar de possuir redundância em outro POD, está presente em múltiplos em série (precisamente três) para acionar um BOP anular.

Figura 64 - Impacto da melhoria da confiabilidade dos componentes no TMEF do preventor anular (horas de BOP)

Fonte: arquivo pessoal

O efeito da variação do TMEF dos componentes sobre o TMEF do sistema também pode ser expresso na forma de uma matriz de risco (Figura 65). Representa-se a probabilidade de falha de um dado componente em dois anos (tempo entre manutenções recomendado por um fabricante) em função do impacto da variação do TMEF do componente sobre o TMEF do sistema (impacto no risco de falha), obtido na Figura 64.

Figura 65 - Matriz de falha dos componentes do BOP

Pode-se ainda representar o resultado desta matriz de risco nos componentes do diagrama hidráulico, como mostrado na Figura 66.

Figura 66 - Representação do risco de falha dos componentes no diagrama hidráulico

Fonte: arquivo pessoal

A melhoria do tempo médio entre falhas de um componente também pode ser obtida pela melhoria do seu projeto ou da sua manutenção. A última opção é o escopo da manutenção centrada na confiabilidade (RCM).

5.1.6 Variação da periodicidade da manutenção preventiva

De acordo com a formulação do efeito da manutenção preventiva na confiabilidade indicada pela equação (14), a manutenção preventiva tende a aumentar o intervalo entre falhas do equipamento para taxas de falha crescentes com o tempo, conforme indica a aplicação da equação (33). A seguir, utilizando o modelo B, simula-se o efeito do impacto da variação do intervalo de manutenção (TMEM) sobre o TMEF do preventor anular, sendo os valores obtidos indicados na Figura 67.

$$TMEF = \frac{-TMEM}{\ln(R_a(TMEM))} \quad (33)$$

Figura 67 - Gráfico do TMEF do BOP anular x intervalo entre a manutenção preventiva

Fonte: arquivo pessoal

Observa-se que o tempo médio entre manutenção (TMEM) possui uma relação aproximadamente exponencial com o tempo médio entre falhas (TMEF). Para valores muito grandes de TMEM, o TMEF converge assintoticamente para um valor calculado

pelo modelo de confiabilidade.

5.1.7 Variação da qualidade da gestão da manutenção preventiva

Conforme a formulação da norma API 581 (2008), a competência da manutenção pode melhorar ou piorar a taxa de falha em até 99%. De acordo com esta norma, essa competência pode ser modelada e a variação do F_{ms} em função do score esta mostrada na Figura 68.

Figura 68 - Fator de qualidade da manutenção em função do SCORE obtido pela gestão de manutenção

Fonte: arquivo pessoal

Na prática, a referida norma prevê tarefas que podem aumentar o F_{ms} . No Anexo II da API 581, há um catálogo de atividades de gestão e para cada uma delas associa-se uma nota de acordo com critérios preestabelecidos. Um trecho do Anexo II encontra-se no Anexo A e o score corresponde ao somatório destas notas. As atividades de gestão previstas na norma estão relacionadas à liderança e administração, à informação da segurança do processo, à análise do risco do processo, à gestão de mudança, aos procedimentos de operação, às práticas de trabalho seguras, ao treinamento, à integridade mecânica, às revisões antes do início de trabalho, à resposta de emergência, à investigação de incidentes, às exigências do contratante e à auditoria do sistema de gestão. Baseado na experiência profissional do autor, a gestão destes quesitos normalmente não é igual entre os operadores de BOP.

Assim, utilizando este modelo, pode-se atribuir à qualidade da gestão da manutenção à dispersão das taxas de falha observadas em campo, pressupondo-se

que as condições de operação (lâmina d'água e quantidade de uso) dos BOPs são similares. Foi feita uma análise detalhada da variação do fator de manutenção (F_{ms}) para cada classificação de falha, considerando que o fator de danos permanece constante. Com base nas Tabelas de magnitude das falhas apresentadas anteriormente, o valor máximo de F_{ms} é obtido dividindo-se o valor médio pelo menor valor da taxa de falha, enquanto o valor mínimo de F_{ms} é obtido dividindo-se o valor médio pelo maior valor da taxa. O valor de *SCORE* (nota) correspondente é calculado rearranjando a equação (16).

Os resultados desta análise são demonstrados na Tabela 27.

Tabela 27: variação do F_{ms} e *SCORE* para cada classificação de falha obtida

	Referência	Valor	F_{ms}	<i>SCORE</i> (%)
Modelo	API 581	Mínimo	0,10	100
		Máximo	10,00	0
Dados de campo	Todas as falhas	Mínimo	0,36	72
		Máximo	2,14	33
	Modo de falha 1	Mínimo	0,22	82
		Máximo	2,01	35
	Modo de falha 2	Mínimo	0,63	60
		Máximo	1,75	38
	Falha intermitente	Mínimo	0,50	65
		Máximo	2,04	35
	Falha não-intermitente	Mínimo	0,33	74
		Máximo	1,56	40
	Falha superior	Mínimo	0,41	69
		Máximo	1,58	40
	Falha inferior	Mínimo	0,65	60
		Máximo	1,91	36

Fonte: arquivo pessoal

Onde, para a construção da Tabela 27 foram utilizadas as seguintes relações:

$$F_{ms_{\max}} = \frac{\lambda_{med}}{\lambda_{\min}} \quad (34)$$

$$F_{ms_{\min}} = \frac{\lambda_{med}}{\lambda_{\max}} \quad (35)$$

$$SCORE = -\frac{\log(F_{ms}) + 1}{0,02} \quad (36)$$

Nota-se que a variação do F_{ms} observada nas falhas em campo dos preventores anulares está de acordo com os limites previstos pela norma API 581 (2008). Enquanto a norma limita os valores de F_{ms} entre 0,1 a 10, as falhas observadas em campo apresentam F_{ms} contidos entre 0,2 a 2,2. Para uma gestão mediana de manutenção, o F_{ms} vale 1.

Verifica-se também que a escolha de um *score* de 50% para o BOP de referência é compatível com o *score* calculado. Em todas as classificações, este valor de referência encontra-se aproximadamente entre os valores mínimo e máximo observados.

5.2 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Finalmente, a norma ISO 31.000 recomenda ranquear as medidas de controle de risco propostas. O resultado das medidas de projeto e manutenção em análise, a melhoria relativa do TMEF proporcionada por cada uma destas medidas é comparada aumentando-se em 50% ou 100% do valor da sua base. A comparação encontra-se na Figura 69.

Figura 69: Comparação dos resultados de propostas para a melhoria do BOP anular

Fonte: arquivo pessoal

Observa-se que no sistema em estudo, o aperfeiçoamento na manutenção (melhoria na qualidade e redução dos intervalos de manutenção) provocou um maior impacto na vida útil do sistema (TMEF) quando comparados com modificações no projeto (aumento da vida útil dos componentes e redução do intervalo entre a manutenção).

6 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi atingido ao se desenvolver um modelo de gerenciamento para o risco de falha do preventor anular de BOP segundo a metodologia da gestão do risco e da inspeção baseada no risco. Modelos de confiabilidade do sistema foram desenvolvidos e validados comparando os respectivos TMEF calculados com aqueles encontrados em registros de operação em campo e na literatura. Estes modelos subsidiaram propostas melhorias de projeto e manutenção no sistema avaliando-as conforme as diretrizes da engenharia da confiabilidade.

Do estudo de falhas em campo, verificou-se que a taxa de falha do BOP anular é praticamente constante após o 200º dia acumulado de uso, depois de um período de mortalidade infantil. Nota-se um início de aumento da taxa de falha a partir do 900º dia acumulado de uso, indicando o envelhecimento do equipamento. Do estudo da operação do BOP em campo, verificou-se que o tempo médio entre falha mensurado se mostrou compatível com os valores encontrados na literatura.

Dos modelos numéricos de confiabilidade do preventor anular, de um modo geral, a solução analítica apresentou uma boa aderência aos dados estatísticos, considerando o intervalo de confiança. Tanto o TMEF calculado quanto o comportamento da taxa de falha ao longo do tempo apresentaram valores coerentes com os valores da literatura e medidos em campo. Entretanto, o modelo que apresentou melhor aderência considerando os modos de falha foi o que considera os PODs modelados como redundâncias passivas, indicando o efeito do fluxo hidráulico nas falhas do BOP. Esse resultado sugere que as altas pressões e vazões no seu acionamento podem provocar vibrações e golpes de aríete nos componentes do BOP causando a sua falha. Ressalta-se que as redundâncias que não estão ativas não recebem este fluxo hidráulico.

Para a elevação da confiabilidade do preventor anular foram analisados tanto o aumento de redundâncias no sistema quanto o da confiabilidade dos componentes do seu sistema como melhorias de projeto. Das redundâncias de projeto estudadas, aquela que obteve melhores resultados na redução do risco foi a adição de novos PODs, seguida da adição de novas SEM e linhas de suprimento. Dos componentes do sistema estudados, a melhoria da vida útil das válvulas solenoides, elemento de vedação, válvulas reguladoras e do cabo MUX impactariam, respectivamente, em um

maior incremento de confiabilidade do sistema como um todo. Nesta última análise, verificou-se que a melhoria da vida útil dos componentes com os menores TMEFs não necessariamente causam maior redução do risco de falha do sistema.

Como melhorias de gestão de manutenção, foram analisadas a redução no intervalo entre as manutenções e a melhoria da gestão da manutenção. Ao se variar o intervalo entre as manutenções preventivas, em princípio a sua redução poderia ajudar a reduzir o risco de falha de acionamento do BOP anular. No entanto, observa-se que a manutenção preventiva pode adicionar mortalidade infantil ao sistema e deve-se considerar a disponibilidade do BOP para a manutenção feita no intervalo entre poços. A simulação da melhoria da gestão da manutenção, por outro lado, teoricamente pode reduzir a taxa de falha em até 90%. Em campo, foi comprovado que há uma dispersão de taxas de falha que chega a 11,4% decorrentes, provavelmente, da diferença da gestão e da qualidade da manutenção entre os operadores de BOP.

De acordo com a análise dos modelos, a melhoria da gestão da manutenção é mais significativa que a melhoria no projeto e o aumento da confiabilidade de alguns componentes do sistema pode ser tão impactantes na confiabilidade do sistema quanto à adição de redundâncias. Baseado nesta constatação propõe-se aumentar, prioritariamente, a confiabilidade das válvulas solenoides e do inserto do BOP anular através da melhoria da gestão da manutenção e do monitoramento destes componentes.

7 SUGESTÕES DE MELHORIA

De acordo com as conclusões desta dissertação, o impacto da manutenção (frequência e qualidade) na confiabilidade é mais significativo que as melhorias no próprio projeto. Assim, para incrementar a confiabilidade do sistema propõe-se adotar as seguintes medidas:

1. Utilizar (com as devidas adaptações) a folha de verificação do Anexo II da norma API 581 no controle de qualidade da manutenção do BOP.
2. Igualmente, outra sugestão baseada nas dificuldades encontradas até aqui, seria o compartilhamento dos dados de manutenção (sobre o que foi feito e quando o fez), além de uma investigação mais profunda das causas das falhas encontradas.
3. Considerando a manutenção centrada na confiabilidade (RCM), utilizar a manutenção preditiva no controle de qualidade do BOP, fazendo uso de métodos para detectar indícios de falha. Com base na análise de sensibilidade da falha dos componentes, são feitas as seguintes propostas:
 - a. Detecção de traços de ferro no fluido hidráulico ventilados após o acionamento das funções (que podem indicar o desgaste de válvulas SPM e reguladoras).
 - b. Medição da pressão na linha piloto à jusante da válvula solenoide após o acionamento de uma função (que pode indicar o seu desgaste).
 - c. Medição e controle do tempo de fechamento, monitoração da pressão de acionamento do piloto das SPMs e verificação por buroscopia da qualidade da borracha do inserto do anular (que podem indicar o desgaste do inserto).

REFERÊNCIAS

ABNT. 1994. **ABNT NBR 5462 Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994.

AMERICAN BUREAU OF SHIPPING; ABSG CONSULTING INC. 2013. **Blowout Preventer (BOP) Maintenance and Inspection Study Final Report for the Bureau of Safety and Environmental Enforcement. American Bureau of Shipping**. New Orleans: (BSEE), Bureau of Safety and Environmental Enforcement, 2013.

API. 2002. **API 580, Risk-Based Inspection**. Washington: (API), American Petroleum Institute, 2009.

—. 2008. **API RP 581, Risk Based Inspection Technology**. (API), American Petroleum Institute. Washington: (API), American Petroleum Institute, 2008.

—. 2012. **API RP 59, Recommended Practice for Well Control Operations, Second Edition**. Washington: (API), American Petroleum Institute, 2012.

—. 2004. **API SPEC 16D, Specification for Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment**. Washington: (API), American Petroleum Institute, 2004.

—. 2012. **API STD 53 Blowout Prevention Equipment Systems for Drilling Wells Fourth Edition**. Washington: (API), American Petroleum Institute, 2012.

BATISTA, J. A.; LIMA, C. R. C. A abordagem nebulosa nos processos de manutenção centrada em confiabilidade. **Revista Espacios**. [Online] 2013. Disponível em: <<http://www.revistaespacios.com/a13v34n04/13340402.html>> Acesso em: 24 mar. 2015.

BIZLEY, D. Cameron introduces new, high-availability BOP control system. **Oilfield Technology**, 2014. Disponível em: <http://www.energyglobal.com/upstream/exploration/16072014/Cameron_introduces

_new_high_availability_BOP_control_system/. Acesso em: 24 mar. 2015.

CBC NEWS. **TSX closes down 360 points as oil trades below \$50 a barrel.** Disponível em: <<http://www.cbc.ca/news/business/tsx-closes-down-360-points-as-oil-trades-below-50-a-barrel-1.2889823>> Acesso em: 11 ago. 2015.

DEUTSCHE WELLE. **Petróleo a US\$ 30 lança dúvidas sobre viabilidade do pré-sal.** Disponível em: <<http://noticias.terra.com.br/brasil/petroleo-a-us-30-lanca-duvidas-sobre-viabilidade-do-pre-sal,8a67804c808e2f3182ac11a5ee58512bs83pghu4.html>> Acesso em: 22 mar. 2016.

DRILL QUIP. **Marine Drilling Riser Connector.** Disponível em: <http://www.drillquip.com/marine_drilling_riser_connector.html> Acesso em: 24 mar. 2015.

DRILLING FORMULAS.COM. **Annular Preventers** – Well Control Equipment. Drilling Formulas.com. Disponível em: <<http://www.drillingformulas.com/annular-preventers>> Acesso em: 24 mar. 2015.

ECKSTEIN, C. B.; JATKOSKI, E.; ETTER, J. A. N. **INSPEÇÃO BASEADA EM RISCO SEGUNDO API 581 APLICAÇÃO DO API-RBI SOFTWARE**, Conferência internacional sobre avaliação de integridade e extensão de vida dos equipamentos industriais, 2002, Salvador/BA. Anais... Salvador, IEV 2002, s.n., p. 1-10.

ETKIN, D. S. **Estimating Cleanup Costs For Oil Spills.** Arlington, Massachusetts, U.S.: Cutter Information Corp., 1999.

FOSTER, K. W.; HAEBER, J. A. **Electro-hydraulic blowout preventer.** US 3319923 EUA, 1967.

GRANVILLE, K. **Regulator valve.** US 2524264 EUA, 1950.

HOLAND, P.; RAUSAND, M. Reliability of Subsea BOP Systems. **Reliability Engineering**, 19, p. 263-275. 1987.

HOLAND, P.; AWAN, H. **Reliability of Deepwater Subsea BOP Systems and Well Kicks**. Trondheim: Exprosoft, 2012.

HUFF, P. A.; KHANDOKER, S.; BUTUC, S. **Annular BOP packing unit**. US 8176933 EUA, 2012.

HYDRIL. **Packing head for oil wells**. US 2148844 A 28 de fevereiro de 1939.

HYNES, JOSEPH H. E BURTON, JAMES A. 1987. **Annular packing unit and insert**. US 4657263 EUA, 1987.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). 2009. **ISO 31.000 - Risk Management**. Genebra: International Organization for Standardization (ISO), 2009.

JOHNSON, L. **Riser pipe collapses on Ensco rig off Angola**. Upstream. Disponível em: <<http://www.upstreamonline.com/live/article1334043.ece>> Acesso em: 13 ago. 2015.

LEWIS, E. E. **Introduction to reliability engineering**. 1. Evaston, Illinois: John Willey & Sons, 1987.

McMAHAN, J. M.; ROLAND Jr., G. H. **BOP control system and methods for using same**. US 4880025 EUA, 1989.

MIDÉ TECHNOLOGY CORPORATION. **Deep Water Drilling Risk Reduction Assessment**. Cambridge: s.n., 2010.

MODARRES, M.; KAMINSKIY, M.; KRIVTSOV, V. **Reability Engineering and Risk Analysis**. 2. Boca Raton: CRC Press, 2010.

MORETZSOHN, F. Vazamento no Golfo do México deixa marcas profundas na biodiversidade marinha. **Ecoagencia**. Disponível em:

<<http://www.ecoagencia.com.br/?open=noticias&id=VZISXRVVONIYHZFTT1GdXJFbKVVVB1TP>> Acesso em: 9 jan. 2015.

MOURA, J. N.; CLARK, P.; WOLFRAM, J. **Reliability Assessment Of Subsea Blowout Preventers**. Tóquio: OMAE 2001, s.n., p. S&R-2139, 2001.

LUKIN, N.; SOUZA, G. F. M. Risk analysis of annular preventer performance in multiplexed submarines BOP based on ISO 31.000 and API 581 standards. **Proceedings...** Proceedings of the Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference. 21-26 de junho de 2015, p. 746.

OCEANEERING. 2010. **Blowout Preventer top opening right after riser was cut (unevenly) with giant shears**. Disponível em: <<http://ikonstantin.com/2010/06/mc252-bop-and-well-schematics/>> Acesso em: 23 mar. 2015.

PETROBRAS. 2015. **N-2753 Recursos Críticos em Segurança de Poço: Equipamentos e Capacitação de Pessoal**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2015. vol. Rev D.

PRITCHARD, D. **Real-time data offers critical tool to redefine well control, safety. Drilling Contractor**. Disponível em: <<http://www.drillingcontractor.org/real-time-data-offers-critical-tool-to-redefine-well-control-safety-19320>> Acesso em: 24 mar. 2015.

RIG ZONE. 2016. **Offshore Rig Day Rates**. Rig Zone. Disponível em: <<http://www.rigzone.com/data/dayrates/>> Acesso em: 7 jan. 2016.

ROCHE, J. R. Multiplex BOP system utilizes updated technology, decreases riser disconnect time. **Oil and Gas Journal**. Disponível em: <<http://www.ogj.com/articles/print/volume-95/issue-48/in-this-issue/general-interest/multiplex-bop-system-utilizes-updated-technology-decreases-riser-disconnect-time.html>> Acesso em: 23 mar. 2015.

SCHULUMBERGER. 2015. annular blowout preventer. **Oilfield Glossary**.

Disponível

em:

<http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/a/annular_blowout_preventer.aspx>

Acesso em: 7 jan. 2016.

SILCOX, W. H. **Subsea energy power supply**. US4095421 A EUA, 1978.

SMITH, G. D.; RELYEA, R. D. **Blowout preventer control system**. US 4413642 EUA, 1983.

TOMLIN, J. B. Fail safe hydraulic piloted pressure reducing and regulating valve. US 4565349 A EUA, 1984.

TOMLIN, J.; PESEK, D.; PETERMAN, C. P. Blowout preventer control system. US 6032742 EUA, 2000.

U.S. CHEMICAL SAFETY BOARD (CSB). 2014. **CSB Board Approves Final Report Finding Deepwater Horizon Blowout Preventer Failed Due to Unrecognized Pipe Buckling Phenomenon During Emergency Well-Control Efforts on April 20, 2010, Leading to Environmental Disaster in Gulf of Mexico**. General News - News. Disponível em: <<http://www.csb.gov/csb-board-approves-final-report-finding-deepwater-horizon-blowout-preventer-failed-due-to-unrecognized-pipe-buckling-phenomenon-during-emergency-well-control-efforts-on-april-20-2010-leading-to-environmental-disaster-in-gulf-of-mexico/>> Acesso em: 24 mar. 2015.

ZENGKAI, L. **Availability and Reliability Analysis of Subsea Annular Blowout Preventer**. THE 2ND THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY (ICE 2013). 2013.. Proceedings... 2013, X p.

WIKIPEDIA.

Blowout

preventer.

Disponível

em:

<http://en.wikipedia.org/wiki/Blowout_preventer> Acesso em: 23 mar. 2015.

ANEXO A: TRECHO DA LISTA PARA CÁLCULO DO SCORE, SEGUNDO API 581 (2008)

API RP 581 RISK-BASED INSPECTION TECHNOLOGY

Table 2.A.8 – Mechanical Integrity

	Questions	Possible Score	Actual Score
1	Has a written inspection plan for the process unit been developed that includes the following elements:		
	a. All equipment needing inspection has been identified?	2	
	b. The responsibilities to conduct the inspections have been assigned?	2	
	c. Inspection frequencies have been established?	2	
	d. The inspection methods and locations have been specified?	2	
	e. Inspection reporting requirements have been defined?	2	
2	Does the inspection plan referred to in Question 1 include a formal, external visual inspection program for all process units?	2	
	a. Are all the following factors considered in the visual inspection program: the condition of the outside of equipment, insulation, painting/coatings, supports and attachments, and identifying mechanical damage, corrosion, vibration, leakage or improper components or repairs?	1	
	b. Based on the inspection plan referred to in Question 1, do all pressure vessels in the unit receive such a visual external inspection at least every 5 years?	2	
	c. Based on this inspection plan, do all on-site piping systems that handle volatile, flammable products, toxins, acids and caustics, and other similar materials receive a visual external inspection at least every 5 years?	2	
3	Based on the inspection plan, do all pressure vessels in the unit receive an internal or detailed inspection using appropriate nondestructive examination procedures at least every 10 years?	5	
4	Has each item of process equipment been reviewed by appropriate personnel to identify the probable causes of deterioration or failure?	5	
	a. Has this information been used to establish the inspection methods, locations, and frequencies and the preventive maintenance programs?	1	
	b. Have defect limits been established, based on fitness for service considerations?	1	

APÊNDICE A: ALGORITMO EM C++ PARA O CÁLCULO DO MODELO “A” PELO MÉTODO BOOLEANO

```

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
//      Projeto de mestrado          */
//Simulação numérica de falha do BOP anular */
//                                  */
// Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza*/
// Nikolas Lukin   - 5381328          */
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

m1[1][t] = m2[1][t] = exp(-t*120/30295);

m1[0][t] = m2[0][t] = 1 - m1[1][t];

p1[1][t] = p2[1][t] = p3[1][t] = p4[1][t] = exp(-t*120/14784);

p1[0][t] = p2[0][t] = p3[0][t] = p4[0][t] = 1 - p1[1][t];

a1[1][t] = a2[1][t] = exp(-t*120/32995);

a1[0][t] = a2[0][t] = 1 - a1[1][t];

}

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

// Calculo da probabilidade de falha no tempo

ResultSim = fopen("resultsim.txt", "w");

fprintf (ResultSim, "i S M1 M2 P1 P2 A1 Status Prob(360)\n");

i=0;

for(S=1;S--;S>=0)

{

    for(M1=1;M1--;M1>=0)

    {

        for(M2=1;M2--;M2>=0)

        {

            for(P1=1;P1--;P1>=0)

            {

                for(P2=1;P2--;P2>=0)

                {

                    {

                        for(A1=1;A1--;A1>=0)

                        {

                            for(t=0;t++;i<15)

                            {

                                s[1][t] = exp(-t*120/2439024);

                                s[0][t] = 1-s[1][t];

                                for(t=0;t++;i<15)

                                {

```

```

    prob[i][t]=s[S][t]*m1[M1][t]*m2[M2][t]*p1[P1][t]*p2[P2][t]*a1[A1][t];

    }

    status[i]=1;

    if(S==0 || (M1==0 && M2==0) ||
(M1==0 && P2==0) || (M2==0 && P1==0) || (P1==0 && P2==0) || A1==0)

    {

        status[i]=0;

    }

    fprintf (ResultSim, "%d %d %d %d
%d %d %d %d %f\n",i, S, M1, M2, P1, P2, A1, status[i], prob[i][3]);

    i++;

}

}

}

}

fclose (ResultSim);

return 0;

}

```