



PROPOSIÇÃO DE ABORDAGEM PARA IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE FRONTEIRAS DE UM SISTEMA BOP

Igor de Souza Pinto (Universidade Federal Fluminense)
igorsouzapinto@id.uff.br

Rodolfo Cardoso (Universidade Federal Fluminense)
rcardoso.uff@gmail.com

Mateus Carvalho Amaral (Universidade Federal Fluminense)
mateus_amaral@id.uff.br

Luiz Antônio de Oliveira Chaves (Universidade Federal Fluminense)
luizchaves@gmail.com

O Blowout Preventer (BOP) é um equipamento de segurança de poços de petróleo considerado um sistema complexo, e como tal, seus sistemas podem ser responsáveis por executar uma ou mais funções. Sendo assim, é fundamental identificar as fronteiras do equipamento a fim de gerenciar e analisar as interações entre os sistemas para auxiliar na análise de interfaces para que seja possível alcançar um nível de confiabilidade adequado ao sistema. Desta maneira, este artigo teve como objetivo propor uma abordagem de identificação e análise de fronteiras para auxiliar no entendimento das relações entre as funções e interfaces em um sistema BOP. Foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) que por fim resultou em três principais abordagens, e aplicadas no componente Blind Shear Ram Preventer (BSRP), visto que ele é considerado a última barreira preventiva do BOP. Estas abordagens resultaram na utilização de diferentes ferramentas, entre elas o diagrama de fronteira, principal ferramenta para se identificar e definir as fronteiras de um sistema e de suas interfaces. Ao final do trabalho, concluiu-se através das análises das sequências de falhas relativas às interfaces presentes na BSRP, que ‘erro operacional’ e ‘erro de manutenção’ são as duas causas mais recorrentes, sendo a primeira presente em sete das nove interfaces identificadas no componente.

Palavras-chave: BOP, Confiabilidade, Análise de interfaces, Diagrama de fronteira, FMMEA.

1. Introdução

As operações na perfuração de poços de petróleo em ambientes marinhos envolvem riscos de acidentes que podem ocasionar perdas humanas, ambientais e econômicas (VAN ASTEN, 2013). O ambiente *offshore*, que apresenta características particulares, torna desafiador o planejamento de projetos e processos (DRAEGBØ, 2014), e nesses cenários tão complexos, a segurança das operações é um fator fundamental a ser considerado.

Um dos maiores riscos nos processos operacionais de perfuração de poços é a ocorrência de influxo descontrolado de fluidos para a superfície, conhecido como *blowout* (MARTINS et al., 2018). Nesse caso, o equipamento *Blowout Preventer* (BOP) é utilizado e tem a função de assegurar, por meio do controle de pressão, as operações de perfuração dos poços de petróleo e gás (MUTLU et al., 2017). Em virtude da complexidade do sistema BOP existem dificuldades na identificação de falhas que devem ser prevenidas, de forma a alcançar a alta disponibilidade e confiabilidade desejada (DRAEGBØ, 2014).

Em equipamentos complexos, como o BOP, a delimitação de um componente pode não ser uma determinação segura pela equipe de manutenção ou operadores, já que os componentes se interligam com diversos outros e suas funções são transversais ao sistema (LI e MOBIN, 2015). Assim, uma definição clara das fronteiras é fundamental para que se possa coletar e analisar dados de confiabilidade e operação, auxiliando então a equipe de manutenção a uma correta interpretação das condições do sistema em análise (ISO 14.224, 2016).

Para auxiliar essa representação das fronteiras estão disponíveis diferentes abordagens, que a partir dos recortes corretos dos sistemas, devem representar adequadamente os principais itens a serem considerados em futuras análises (LI e MOBIN, 2015). Porém, é preciso definir as abordagens mais adequadas de identificação e análises das fronteiras no sistema BOP, para que estas possam auxiliar as ferramentas de análises de falhas que serão utilizadas em esforços de manutenção a serem adotados.

Dessa forma, a principal questão desta pesquisa é explicitada: qual abordagem é adequada na análise das fronteiras de um sistema BOP para diagnóstico de falhas?

2. Objeto de estudo

Segundo a API (2012, p. 11), o BOP é um “equipamento instalado nos conjuntos presentes na cabeça do poço com o objetivo de conter fluidos através de um espaço presente no anular entre sua carcaça e seus tubulares, ou por um espaço aberto durante as operações de perfuração, completação ou testes”. Os BOPs possuem diversos componentes essenciais para que suas

funções sejam realizadas com eficiência. Em uma configuração geral, os BOPs apresentam os preventores (*annular/ram*), válvulas e linhas (*choke/kill*) que representam o primeiro subsistema definido pela ISO 14.224 (2016). A norma também define outros quatro subsistemas principais do BOP: conectores hidráulicos (*wellhead connector/LMRP connector*); *Flexible Joint*; conjunto do controle primário e controle de emergência (*back-up*).

De acordo com Wu et al. (2018), o *Blowout* ocorrido em Macondo foi causado pelas sequências de falha do sistema BOP em vedar o poço, em particular a *Blind Shear Ram Preventer* (BSRP), que pertence ao primeiro subsistema definido da ISO 14.224 (2016), e é um preventor do tipo *ram*. A BSRP é a última barreira de defesa em um sistema BOP no caso em que a pressão dentro do sistema de *drilling* se tornar incontrolável. Se a BSRP estiver disponível neste contexto, um *Blowout* não ocorrerá. Porém esta componente falha em cerca de 50% dos casos em que se tentam cisalhar a *drill pipe* durante as operações reais (WU et al., 2018).

Desta forma, a BSRP é um dos componentes críticos do Sistema BOP e seus estudos e planos de manutenção devem considerar o conhecimento de suas interfaces. Assim, este artigo busca apresentar uma discussão sobre três abordagens de descrição de froteiras de sistemas ou subsistemas, bem como realizar sua aplicação no componente crítico BSRP.

3. Desenvolvimento metodológico

A metodologia empregada consiste no desenvolvimento em duas etapas contemplando a Revisão Sistemática da Literatura (RSL), cujo objetivo é identificar e aprofundar em abordagens de representação de froteiras, seguida de aplicação destas abordagens no componente BSRP de um sistema BOP específico.

3.1. Revisão sistemática da literatura (RSL)

Para a identificação e aprofundamento da abordagem de representação de froteiras foi adotada a RSL, com o objetivo de identificar os principais documentos com potenciais abordagens utilizadas para identificar e analisar as fronteiras de um equipamento ou sistema. A RSL, segundo Biolchini et al. (2005), segue um processo de passos definidos, além de uma sequência metodológica rigorosa. Para esta sequência, adotou-se oito passos propostos por Lacerda (2009):

- **Seleção das fontes de informação:** Utilizada a base de dados Scopus (Elsevier);

- **Definição das palavras-chave de busca:** As palavras-chave utilizadas na busca definidas a partir de três termos em inglês: ‘*interface analysis*’, ‘*interaction failure*’ e ‘*reliability*’;
- **Definição dos índices de busca:** Títulos, abstracts e palavras-chave dos documentos pesquisados;
- **Definição da amplitude temporal (anos):** Não foi adotada;
- **Execução das buscas nas fontes de informação:** Utiliza as expressões ‘*interaction failure*’ e ‘*interface analysis*’, o operador lógico ‘OR’ entre as palavras-chave. Esta combinação foi conectada à palavra-chave ‘*reliability*’ utilizando o operador lógico ‘AND’. Resultado: 57 documentos;
- **Análise dos títulos:** Não foi adotada exclusões envolvendo título dos documentos;
- **Análise dos *abstracts* e resumos:** Não foi adotada exclusões envolvendo *abstracts* e resumos dos documentos;
- **Análise das publicações:** Adotado dois critérios de seleção e um procedimento de revisão de pesquisa.

1º Critério de Seleção: Documentos excluídos foram os que não pertencem a área da engenharia, ou sem *Digital Object Identifier* (DOI) ou que não eram do tipo “artigo” ou “artigo de conferência”. Resultado: 26 documentos para análise.

2º Critério de Seleção: Documentos excluídos foram os que não apresentassem abordagens ou ferramentas de identificação e análise de fronteiras de um sistema. Resultado: 1 documento.

Como apenas um documento é insuficiente para realizar uma síntese satisfatória, houve a necessidade de incluir outros documentos. Com isso uma nova pesquisa foi realizada buscando a inclusão de novos artigos, nos quais os critérios adotados foram os mesmos que os adotados na fase de exclusão. Além disso, foi incluído o primeiro artigo do Quadro 1, que obedeceu a todos os critérios de inclusão, porém não foi identificado utilizando as palavras-chave adotadas. Os documentos identificados são detalhados no Quadro 1.

Quadro 1 – Documentos selecionados pela RSL

TÍTULO	AUTORES	ANO
<i>System reliability assessment incorporating interface and function failure</i>	Li, Z.S.; Mobin, M.S.	2015
<i>A Structured Approach for Function Analysis of Complex Automotive Systems</i>	Campean, I.F.; Henshall, E.; Brunson, D., (...); McLellan, R.; Hartley, J.	2011
<i>A Systems Approach to the Development and Use of FMEA in Complex Automotive Applications</i>	Henshall, E.; Campean, I.F.; Rutter, B.	2014
<i>Implementing failure mode avoidance</i>	Henshall, E.; Campean, F.	2009
<i>Systems Engineering Excellence Through Design: An Integrated Approach Based on Failure Mode Avoidance</i>	Campean, I. F.; Henshall, E.; Rutter, B.	2013
<i>Design Verification as a Key Deliverable of Function Failure Avoidance</i>	Henshall, E.; Campean, F.	2010

Fonte: Autor (2019)

3.2. Identificação dos métodos e síntese das abordagens

Após a identificação dos documentos, três diferentes abordagens foram identificadas para aplicação neste estudo. Nas três abordagens, os autores construíram o diagrama de fronteira com o objetivo de conhecer as interfaces do sistema em seu contexto físico. Em uma das abordagens os autores realizaram um diagrama de fronteira considerando todas as possibilidades de interações/interfaces que ocorrem no sistema em análise, já considerando suas naturezas e suas interações com os sistemas externos. Nas outras duas abordagens, os autores optaram por construir o diagrama de fronteira após a construção da ferramenta *System State Flow Diagram* (SFFD). No Quadro 2 são demonstradas as etapas das três abordagens de forma sintética contemplado as descrições e principais características.

Quadro 2 – Síntese das abordagens

ETAPAS	DESCRIÇÃO	ABORDAGEM 1	ABORDAGEM 2	ABORDAGEM 3
ETAPA 1	Descrição dos sistemas	As três abordagens propõem descrever o sistema como um primeiro passo		
ETAPA 2	Identificação das funções do sistema	Apresenta as funções, porém não adota nenhum método	É adotado o Diagrama de Bloco e o SSFD com o objetivo de identificar as funções. Posteriormente é construída a Árvore de Funções	
ETAPA 3	Identificação das interfaces/ Relação com as funções e partes físicas do sistema	Diagrama de Fronteira + Estrutura Analítica de Função e Interface	Diagrama de Fronteira + Matriz de Interface	
ETAPA 4	Identificação das causas de falha	Utiliza informações do FMEA para identificar as causas de falha	x	Tabela de Interface no intuito de identificar as causas de falha das interfaces
ETAPA 5	Artefato final de Análise das Interfaces e Funções	Árvore de Falhas Baseada em Funções	Tabela de Interface	FMEA

Fonte: Autor (2019)

A diferença das abordagens explica-se ao fato de que em Li e Mobin (2015) optam por primeiro identificar as interfaces do sistema para depois incorporar as partes físicas e relacionar às funções primárias e secundárias do sistema em análise.

Já em Campean et al. (2011) e em Henshall e Campean e Rutter (2014), os autores fazem o caminho inverso, ou seja, identificam a função primária do sistema que se deseja analisar, e posteriormente utiliza o diagrama de fronteiras para identificar as interfaces que são presentes na execução da função. As análises efetuadas por Campean et al. (2011) têm por objetivo distinguir as interfaces que contribuem positivamente para a execução da função selecionada, e quais são aquelas que, por sua vez, comprometem a entrega da função.

4. Aplicação na *blind shear ram preventer*

A análise das falhas do sistema foi efetuada no componente BSRP por meio das informações documentadas da avaliação técnica realizada pelos especialistas de engenharia oriundos de três empresas de perfuração *offshore* com experiência no controle de poço. O documento base enviado às empresas possibilitou que os especialistas pudessem selecionar os mecanismos e

causas de falhas para cada componente adotado no projeto. Cada empresa disponibilizou dois especialistas para a seleção dos trens de falha dos componentes, totalizando assim seis especialistas para esta atividade do projeto.

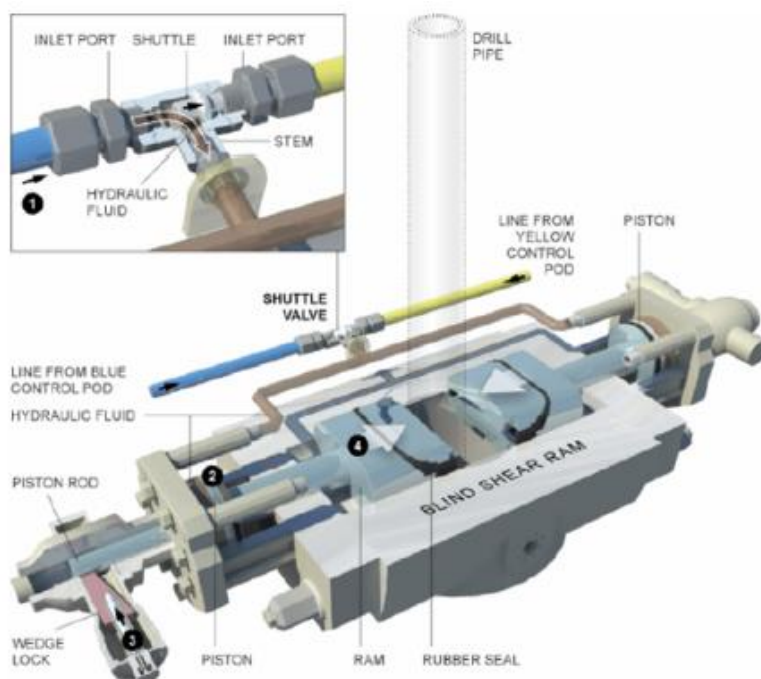
Este documento base foi elaborado contemplando as listas de mecanismos e causas de falhas padrões dos BOPs submarinos retirados da ISO 14.224 (2016). Essa lista foi então associada aos principais modos de falhas do JIP-RAPID S53, que contempla 14 empresas prestadoras de serviço e 12 empresas operadoras *offshore*. Cada composição de modo x mecanismo x causa de falha foi denominado neste trabalho como “sequência de falha”.

As sequências de falha registradas pelos especialistas, além de conter os modos, mecanismos e causas de falhas também continham observações a fim de justificar cada escolha realizada. Estas sequências foram então usadas para subsidiar o método *Failure modes, mechanisms and effects analysis* (FMMEA).

4.1. Descrição do sistema da *blind shear ram preventer* (Etapa 1)

A *Blind Shear Ram Preventer* (BSRP) é um componente de fechamento e vedação em um sistema BOP que primeiramente cisalha tubulares (*drill pipe*) e logo em seguida fornece condições de selar o espaço do poço (API, 2012). Em casos em que a *drill pipe* não estiver presente no poço, a BSRP age como uma *Blind Ram*, tendo como única função vedar o espaço do poço. O modelo da BSRP e suas principais partes físicas é demonstrada na Figura 1.

Figura 1 - Exemplo de uma *Blind Shear Ram Preventer*



Fonte: Extraído de Wu et al. (2017)

4.1.1. Estrutura física da BSRP, componentes vizinhos e fatores externos

A norma ISO 14.224 (2016) foi utilizada como referência na definição das principais partes físicas da BSRP contendo a hierarquia do *Blowout Preventer*. Assim, o componente (nível 8) e suas partes (nível 9) com as respectivas funções foram elencadas para análise, a partir da norma API 53 (2012) e do estudo de Klingsheim (2015):

- *Body*: Estrutura externa da BSRP. Tem como principal função proteger os mecanismos internos do preventor;
- *Locking Device*: Mecanismo que tem como principal função fornecer condições de travamento a *Ram Block*, através de contato físico entre os componentes;
- *Piston/Operator*: Componente responsável por aplicar força nos *Ram Blocks*, movendo-os em direção ao centro do furo do poço (*wellbore*);
- *Flanges*: Partes da *Blind Shear Ram Preventer* que são responsáveis por conectá-la a outros preventores no sistema *Stack* do BOP;
- *Ram Blocks*: Blocos que se movimentam um em direção ao outro através do espaço do poço;
- *Shear Blade*: Componente instalado nos *Ram Blocks* com o objetivo de aumentar a capacidade de cisalhamento. Atualmente as *Shear Blades* são em formatos de ‘V’;
- *Ram Seals*: São colocados ao redor e entre os *Ram Blocks*, de modo a permitir completa vedação do poço;
- *Seals*: Compreende todos os selos presentes na BSRP, exceto os *Ram Seals*.

Além da válvula *Shuttle*, a *drill pipe* também foi avaliada como vizinha da *Blind Shear Ram*, já que em operações reais a BSRP opera com o tubo no interior do seu sistema. Deste modo, além desses dois componentes, os fatores externos também precisam ser considerados na análise (ex: pressão do poço), sendo estes fatores pertencentes ao ambiente.

4.2. Identificação das funções (Etapa 2)

A principal funcionalidade da BSRP é a capacidade de cisalhar o tubo de perfuração (*drill pipe*) e também de selar o poço. Com isso, para conhecer as entradas e saídas do sistema, foi realizado um Diagrama de Bloco da BSRP (Figura 2).

Figura 2 - Diagrama de Bloco da BSRP

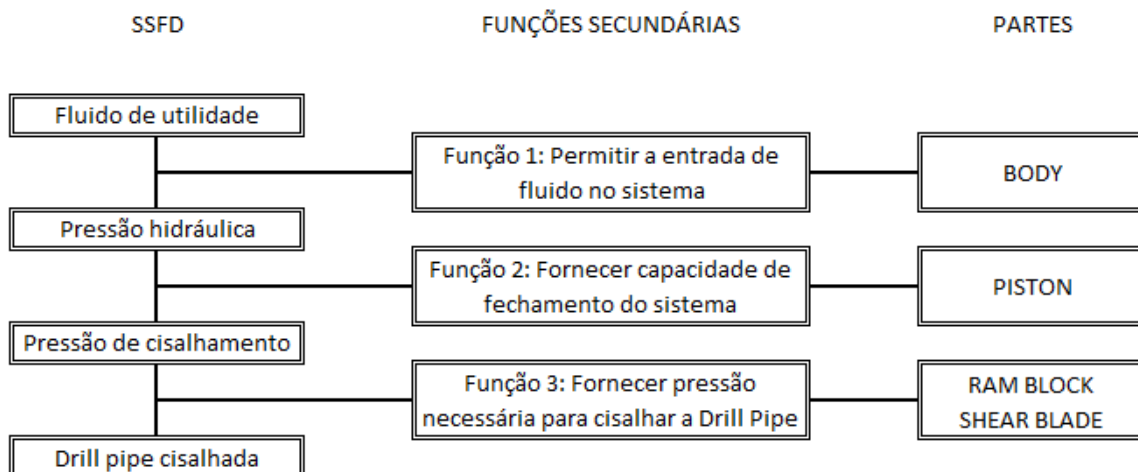


Fonte: Autor (2019)

Na Figura 2 é mostrado a principal entrada da BSRP que é o fluido de utilidade. A *Shuttle Valve* envia fluido de utilidade para a *Blind Shear Ram* para que possa acionar o *piston* para que então fechar a *Ram Block*. Logo, o fluido de utilidade foi considerado a principal entrada do sistema. A saída “pressão de cisalhamento” é a que gera a capacidade da *Drill Pipe* ser cisalhada, assim como a segunda saída (pressão de selamento) é responsável pela função de fornecer a capacidade de selar o poço.

É preciso que seja aplicado o SSFD para que se conheça o fluxo que leva o fluido de utilidade a gerar pressão de cisalhamento e selamento. Paralelamente, a partir do SSFD pode-se identificar as funções secundárias e as partes físicas da BSRP que executam as mudanças de estado (Figura 3).

Figura 3 - SSFD da função de cisalhamento da BSRP

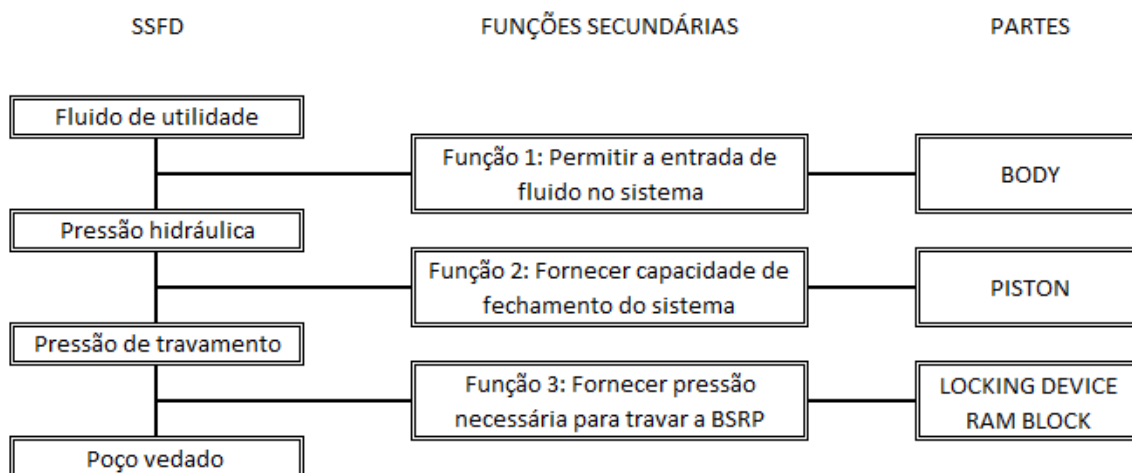


Fonte: Autor (2019)

De forma análoga, também foi preciso realizar o SSFD da função primária “fornecer capacidade

de selar o poço” para também identificar as funções secundárias e as partes físicas que as suportam (Figura 4).

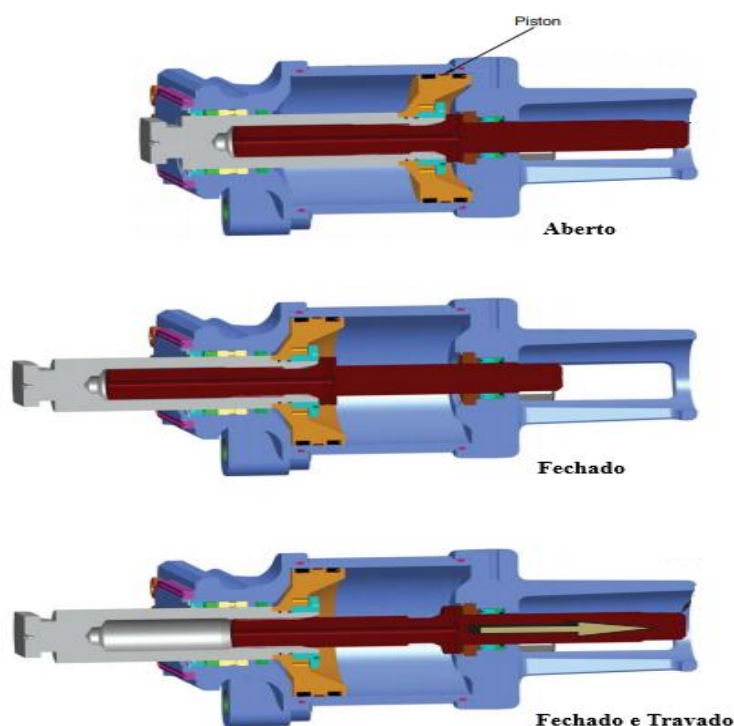
Figura 4 - SSFD da função de selamento da BSRP



Fonte: Autor (2019)

As configurações de estado do preventor do tipo *Ram* na posição “aberta”, “fechada” e “fechada e travada” são demonstradas para ilustrar o funcionamento da BSRP na Figura 5.

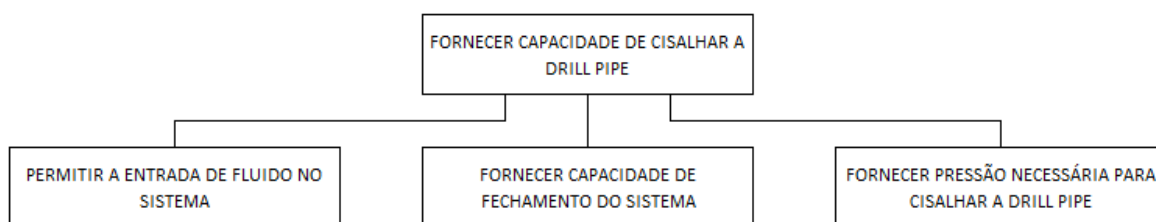
Figura 5 - *Ram Preventer* nas posições ‘fechada’, ‘aberta’ e ‘fechada e travada’



Fonte: NOV (2009)

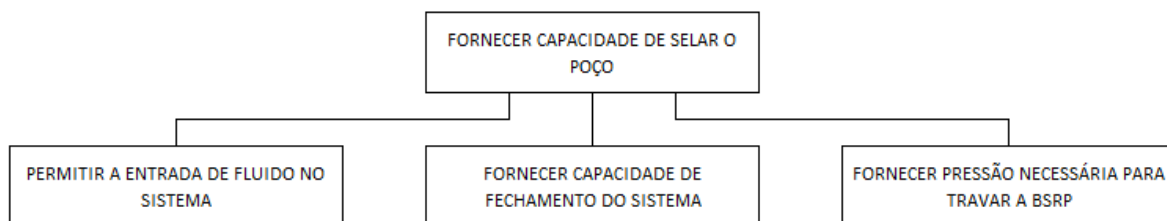
Precisa-se conhecer as relações entre as funções secundárias e primárias, já que em alguns casos particulares, pode ser complexo conhecer quais partes físicas contribuem para a execução de uma determinada função primária, já que a função encontra-se em um nível mais agregado que a parte física. A Figura 6 e a Figura 7 mostram as relações entre as funções da BSRP, sendo a primeira relacionando as funções secundárias com a função de cisalhamento da *drill pipe*, e a segunda relacionando com a função de selamento do poço.

Figura 6 - Relação das funções secundárias com a função de cisalhamento



Fonte: Autor (2019)

Figura 7 - Relação das funções secundárias com a função de selamento



Fonte: Autor (2019)

Na Figura 6 a função “fornecer capacidade de fechamento” contribui para que a atribuição “fornecer capacidade de cisalhar a *drill pipe*” seja alcançada. Isto foi proposto devido ao fato de que para cisalhar a coluna de perfuração, é preciso que as partes responsáveis por permitir o fechamento da *Ram*, assim como suas interfaces, sejam executadas e operem com sucesso, e as partes possam permitir o fechamento total da BSRP. Ao concluir a função de fechamento da BSRP, ou seja, quando uma metade do *Ram Block* entrar em contato totalmente com a outra metade (visto que os *Ram Blocks* possuem duas principais partes), significa que a *drill pipe* foi então cisalhada.

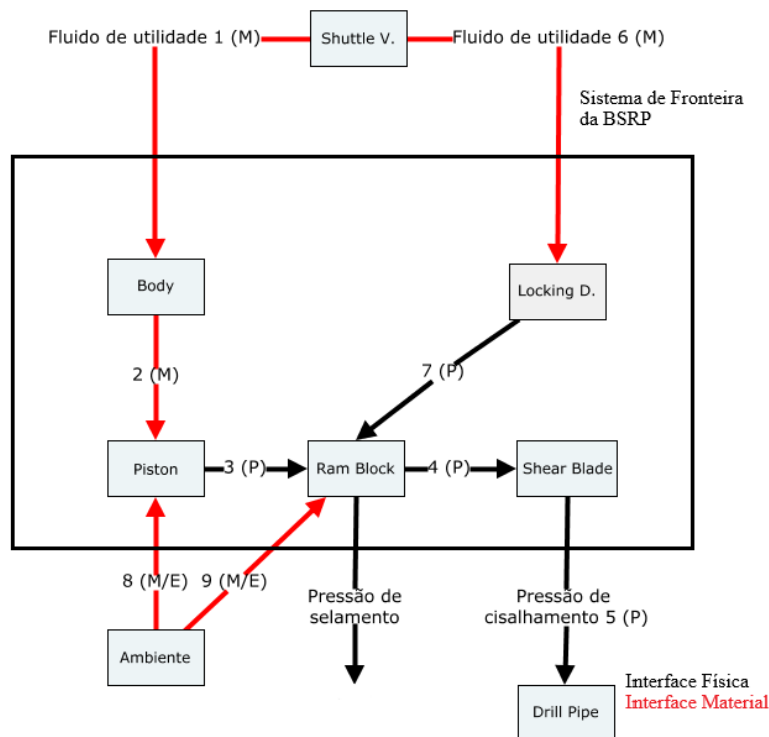
Na Figura 7 é possível notar que a segunda função primária “fornecer capacidade de selar o

poço” é suportada por duas funções secundárias. Isto foi proposto já que, para selar o poço, além de precisar fechar a BSRP, é preciso garantir que os *Ram Blocks* permaneçam na posição fechada (*close position*). Os mecanismos de travamento, nomeados pela ISO 14.224 (2016) de ‘*Locking Device*’ fornecem condição de travar os *Ram Blocks* da BSRP, fazendo com que eles, mesmo com pressões provindas do poço, não se retraiam e voltem para a posição aberta (*open position*) permitindo a passagem do fluido proveniente do poço.

4.3. Identificação das interfaces; relação com as funções e partes físicas (Etapa 3)

A partir do estudo e da revisão da leitura de manuais da fabricante do equipamento *National Oilwell Varco* (NOV) foram identificadas nove principais interfaces entre os componentes para construção do Diagrama de Fronteira da BSRP classificada em três tipos de interface: Material (M), Física (P) e a Energia (E) (Figura 8). Vale ressaltar que a *Drill Pipe*, o ambiente e a *Shuttle Valve* foram considerados sistemas vizinhos à BSRP.

Figura 8 – Diagrama de fronteira da BSRP

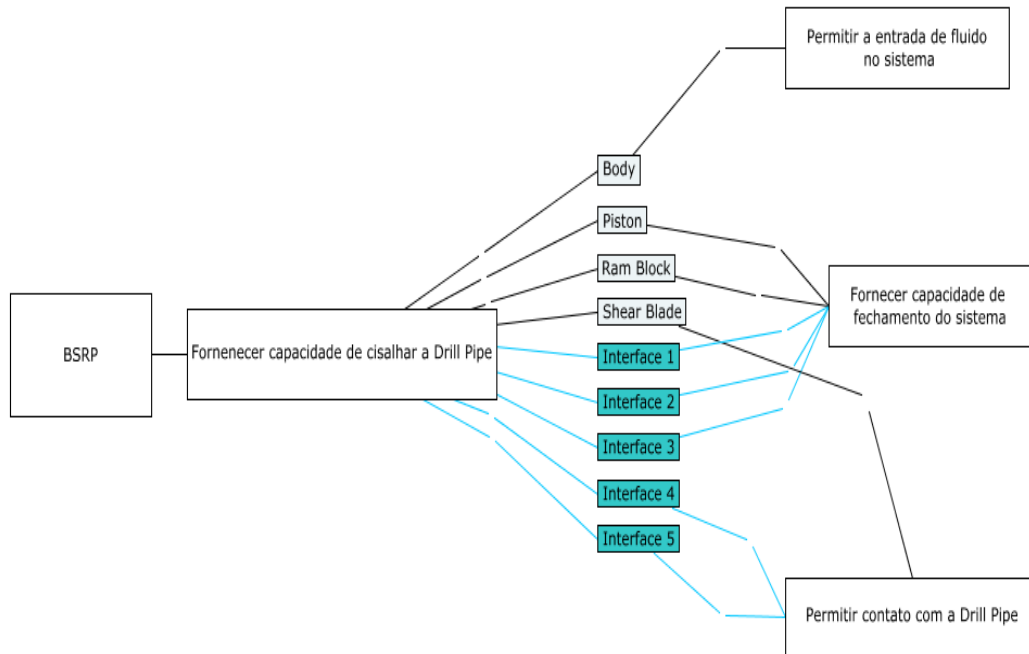


Fonte: Autor (2019)

Após construção do diagrama de fronteira, a abordagem 1 propõe que as funções primárias e secundárias do sistema sejam relacionadas com as interfaces e suas partes físicas. Na Figura 9 é apresentada a estrutura analítica de interfaces e funções, com as funções, interfaces e partes

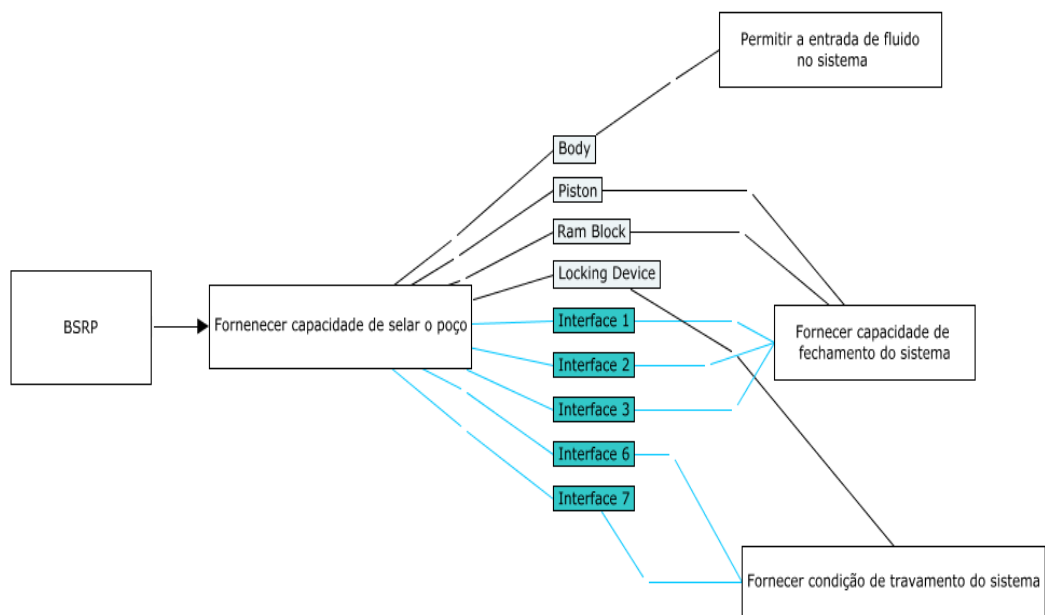
da BSRP para a função principal de cisalhamento e na Figura 10 as relações das partes físicas e interfaces que são responsáveis por executar a função principal “fornecer capacidade de selar o poço”.

Figura 9 - Estrutura analítica de interfaces e funções (função de cisalhamento)



Fonte: Autor (2019)

Figura 10 - Estrutura analítica de interfaces e funções (função de selamento)



Fonte: Autor (2019)

No caso da função primária de selamento, as partes físicas: “*Body*”, “*Piston*”, “*Ram Block*” e “*Locking Device*” apresentam inter-relação a fim de cumprir a função principal. A interface 1, interface 2 e interface 3 também aparecem neste caso, pois é a partir delas que se torna possível fechar a BSRP. A interface 6 e a interface 7 aparecem apenas para a função de selamento, pois são elas que são responsáveis por acionar hidráulicamente o *piston* e fazer com que o *Locking Device* trave os *Ram Blocks*, respectivamente.

4.4. Construção da tabela de interfaces e identificação das funções requeridas (Etapa 4)

A tabela de interfaces apresenta as Funções Requeridas (FR’s) que servem como forma de gerenciamento das interfaces. Cada interface é relacionada a uma ou mais FR’s, que são funções necessárias para que uma interface tenha seu desempenho maximizado (em caso de possuir efeito positivo), ou seu desempenho minimizado (em caso de possuir efeito negativo).

A partir das descrições relacionadas às sequências de falhas realizadas pelos especialistas da engenharia do equipamento do BOP, e das suas relações com cada interface (Quadro 3), foi estabelecidas as FR’s.

Quadro 3 – Funções requeridas a partir das descrições dos especialistas

Interface	Partes	Descrição da Falha	Funções Requeridas
Interface 1	Body	Desgaste (vazamento) do selo por contaminação de Fluido	FR2: manter o fluido dentro dos níveis adequados de pureza
Interface 2	Piston / Operator	Corrosão devido utilização de água do mar nos operadores	FR3: utilizar fluido dentro das especificações químicas e físicas adequadas
Interface 3	Piston / Operator	Dano na haste devido a fechamento em tubo não cisalhável	FR4: manter as seções cisalháveis da Drill pipe alinhadas com a shear blade
Interface 4	Ram Block	Dano no bloco devido a fechamento em tubo não cisalhável	FR4: manter as seções cisalháveis da Drill pipe alinhadas com a shear blade
Interface 5	Shear Blade	Danos a lâmina ao fechar em elemento não desejável	FR4: manter as seções cisalháveis da Drill pipe alinhadas com a shear blade
Interface 6	Locking Device	Vazamento interno causado por contaminação. Causa raiz: erro operacional (operar com fluido fora das especificações de NAS, PH e	FR2: manter o fluido dentro dos níveis adequados de pureza
Interface 7	Locking Device	Vazamento interno causado por folgas. Causa raiz: materiais fabricados com deformações (ovalizações)	FR7: manter o locking device dentro do range de travamento
Interface 8	Piston / Operator	Material/revestimento não adequado	FR5: utilizar materiais dentro das especificações operacionais
Interface 9	Ram Block	Vazamento externo causado por erosão. Causa raiz: falha operacional, erro do controle das propriedades do fluido em ambientes com h2s	FR3: utilizar fluido dentro das especificações químicas e físicas adequadas

Fonte: Autor (2019)

O Quadro 4 apresenta a tabela de interfaces da BSRP como proposto na abordagem 2 e na abordagem 3 contendo sete Funções Requeridas (FR), duas Funções de Primárias (FP) e as três naturezas das interfaces (M, P e E), sendo:

- FR1: transmitir fluido dentro das escalas adequadas de pressão;
- FR2: manter o fluido dentro dos níveis adequados de pureza;
- FR3: utilizar fluido dentro das especificações físicas e químicas adequadas;
- FR4: manter as seções cisalháveis da *drill pipe* alinhadas com a *shear blade*;
- FR5: utilizar materiais dentro das especificações operacionais;
- FR6: prevenir acúmulos de detritos entre o *ram block* e o *piston*;
- FR7: manter o *locking device* dentro do range de travamento;
- FP1: Fornecer capacidade de cisalhar a *drill pipe*;
- FP2: Fornecer capacidade de selar o poço;
- M: Natureza Material;
- P: Natureza Física;
- E: Natureza Energética.

Quadro 4 - Tabela de interfaces da BSRP

Interface	Tipo	Efeito	Funções Requeridas	Função Primária
<i>Body /Shuttle Valve</i> (interface 1)	M	2	FR1/FR2	FP1/FP2
<i>Piston /Ambiente</i> (interface 8)	M/E	-1	FR5	FP1/FP2
<i>Ram Block /Ambiente</i> (interface 9)	M/E	-1	FR5/FR6	FP1/FP2
<i>Body /Piston</i> (interface 2)	M	2	FR1/FR2/FR3	FP1/FP2
<i>Shear Blade /Drill Pipe</i> (interface 5)	P	2	FR4/FR5	FP1
<i>Ram Block /Shear Blade</i> (Interface 4)	P	2	FR4/FR5	FP1
<i>Ram Block /Piston</i> (Interface 3)	P	2	FR4	FP1/FP2
<i>Locking Device /Ram Block</i> (Interface 7)	M	2	FR7	FP2
<i>Locking Device /Shuttle Valve</i> (Interface 6)	M	2	FR2/FR3	FP2

Fonte: Autor (2019)

O Quadro 4 apresenta a coluna dos efeitos, sendo atribuídos pesos positivos para as interfaces que contribuíssem positivamente para a execução da função, e peso negativo para as interfaces

que comprometessem a execução da função primária na escala de -2 a 2. Os valores dos pesos são estimativas qualitativas quanto aos graus de importância das interfaces, porém simbolizam a relação entre elas e as funções do sistema.

4.5. Análise final das interfaces e das funções da BSRP (Etapa 5)

A partir das informações dos especialistas envolvidos na análise, foram coletadas as principais sequências de falhas, ou seja, modos, mecanismos e causas de falhas. Assim, foram determinadas as funções primárias e os modos de falha para cada sequência de falhas considerando as nove interfaces da BSRP por meio da técnica de *Failure modes, mechanisms and effects analysis* (FMMEA) (Quadro 5).

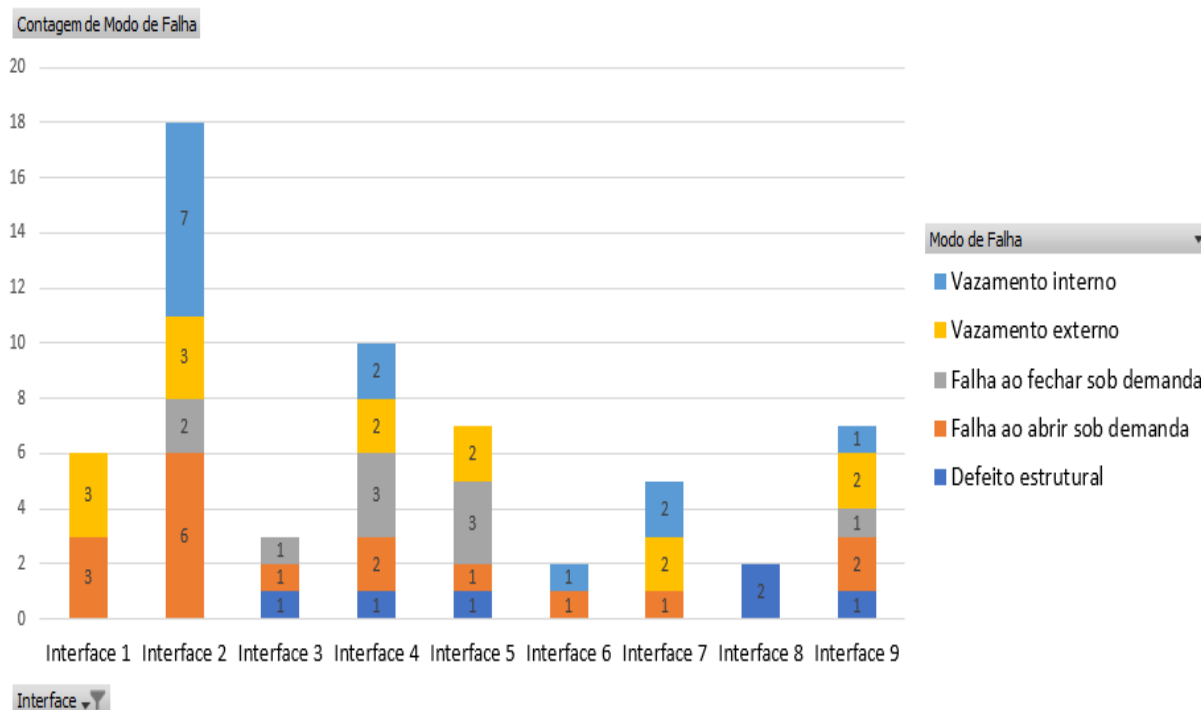
Quadro 5 – FMMEA funcional das interfaces e funções da BSRP

Interface	Função Primária	Modo de Falha	Mecanismo de Falha	Causa de Falha	Função Requerida Associada
1	- Fornecer capacidade de cisalhar a Drill Pipe - Fornecer capacidade de selamento do poço	Falha ao abrir sob demanda	Vazamento	Falha relacionada à operação / manutenção (Erro Operacional)	FR1: transmitir fluido dentro da escala adequada de pressão
2	- Fornecer capacidade de cisalhar a Drill Pipe - Fornecer capacidade de selamento do poço	Vazamento interno	Vazamento	Falha relacionada à operação / manutenção (Erro de Manutenção)	FR2: manter o fluido dentro dos níveis adequados de pureza
3	- Fornecer capacidade de cisalhar a Drill Pipe - Fornecer capacidade de selamento do poço	Falha ao fechar sob	Desgaste	Falha relacionada à operação / manutenção (Erro Operacional)	FR4: manter as seções cisalháveis da Drill pipe alinhadas com a shear blade
4	- Fornecer capacidade de cisalhar a Drill Pipe	Falha ao fechar sob	Alinhamento/Força	Causas relacionadas ao projeto (Capacidade Inadequada)	FR5: utilizar materiais dentro das especificações operacionais
5	- Fornecer capacidade de cisalhar a drill pipe	Defeito estrutural	Deformação	Falha relacionada à operação / manutenção (Erro Operacional)	FR4: manter as seções cisalháveis da Drill pipe alinhadas com a shear blade
6	- Fornecer capacidade de selar o poço	Vazamento interno	Contaminação	Falha relacionada à operação / manutenção (Erro Operacional)	FR2: manter o fluido dentro dos níveis adequados de pureza FR3: Utilizar fluido dentro das especificações químicas e físicas adequadas
7	- Fornecer capacidade de selar o poço	Vazamento interno	Deformação	Causas relacionadas à fabricação / instalação (Falha de Fabricação)	FR7: manter o locking device dentro do range de travamento
8	- Fornecer capacidade de cisalhar a Drill Pipe - Fornecer capacidade de selamento do poço	Defeito estrutural	Corrosão	Causas relacionadas ao projeto (Material Impróprio)	FR5: utilizar materiais dentro das especificações operacionais
9	- Fornecer capacidade de cisalhar a Drill Pipe - Fornecer capacidade de selamento do poço	Falha ao fechar sob	Obstrução	Falha relacionada à operação / manutenção (Desgaste Esperado)	FR6: prevenir acúmulos de detritos entre o ram blok e o piston

Fonte: Autor (2019)

O FMMEA completo contou com 60 sequências que foram relacionadas às nove interfaces e assim como na Figura 11, são apresentadas as relações das interfaces com os diferentes modos de falhas diagnosticados.

Figura 11 – Relação dos modos de falhas com as interfaces da BSRP

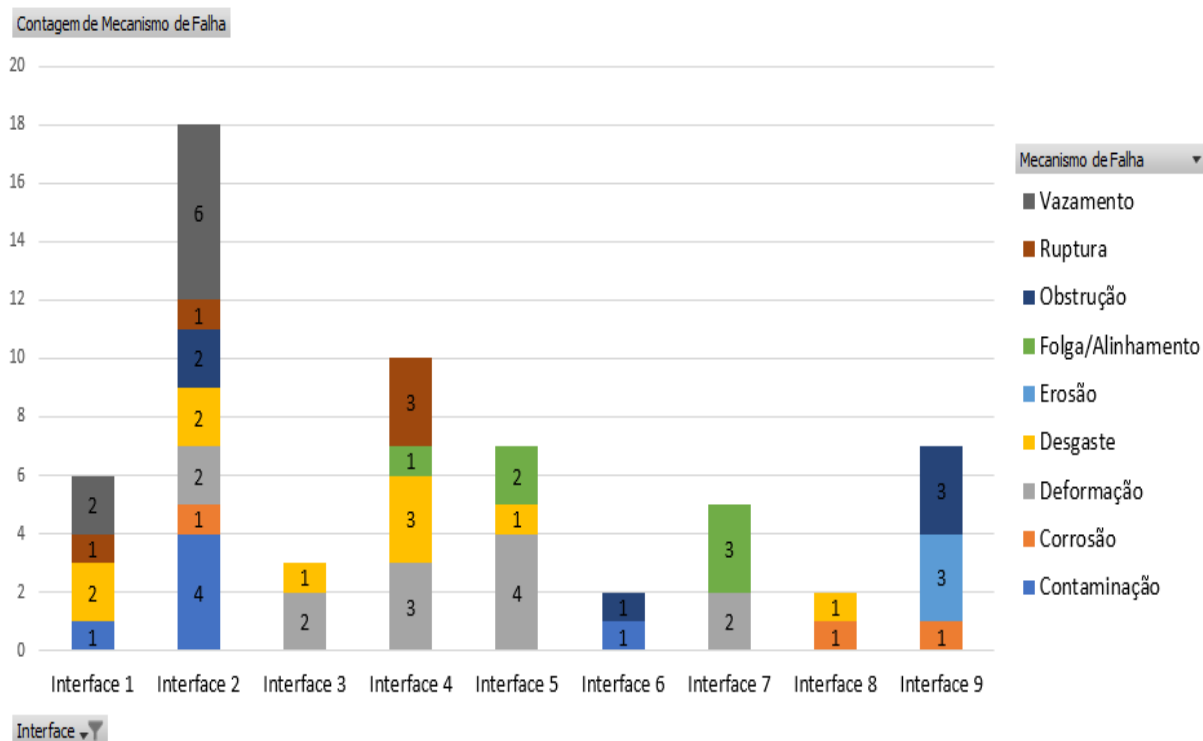


Fonte: Autor (2019)

O modo ‘falha ao abrir sob demanda’ está presente em todas as nove interfaces da BSRP. Além disso, este mesmo modo de falha participa significativamente da interface 2 (maior ocorrência), juntamente com o modo ‘vazamento interno’.

Não existe uma categoria de mecanismo que está presente em todas as interfaces. Porém a categoria ‘desgaste’ representa o mecanismo que mais atua nas interfaces da BSRP (total de seis interfaces) (Figura 12).

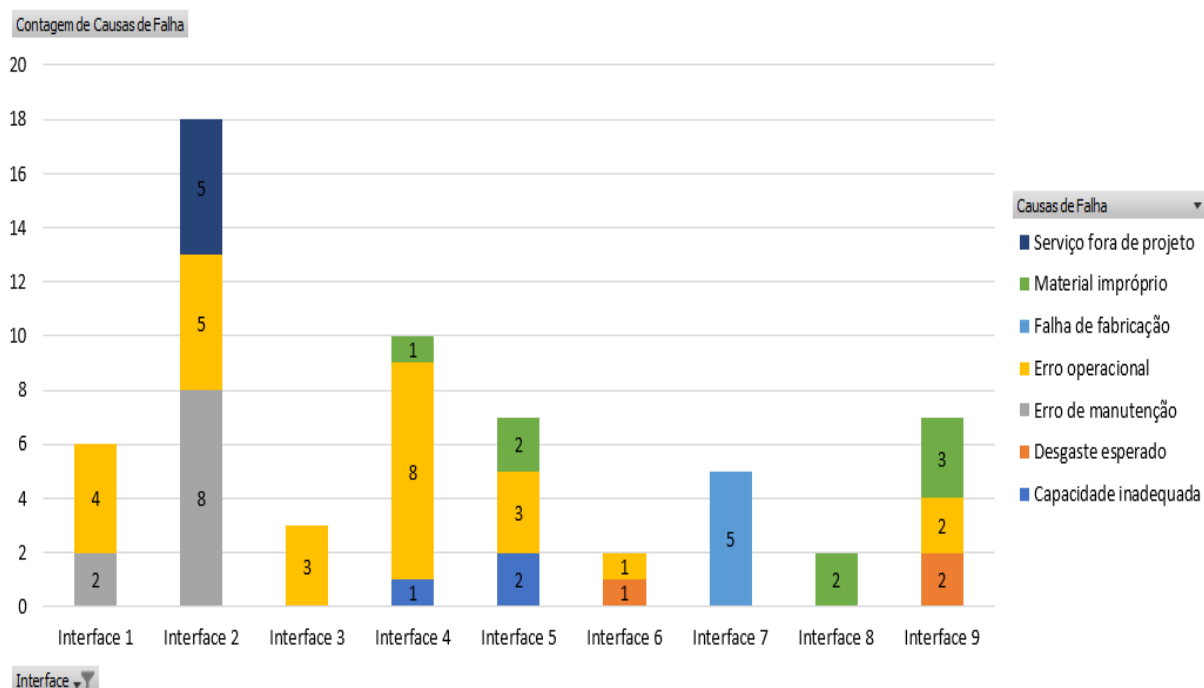
Figura 12 – Relação dos mecanismos de falhas com as interfaces da BSRP



Fonte: Autor (2019)

Embora o desgaste esteja presente em seis das nove interfaces, a categoria ‘deformação’ é a mais recorrente, totalizando cerca de 21,7%. As causas de falhas com as interfaces são descritas no gráfico (Figura 13).

Figura 13 - Relação das Causas de Falha com as interfaces da BSRP



Fonte: Autor (2019)

A causa de falha ‘erro operacional’ não só está presente em todas as interfaces, como também possui a maior ocorrência dentre as sequências de falhas (aproximadamente 42,6% do total). Possui maior índice, tanto relativo quanto absoluto entre as interfaces, na interface 4; onde é considerada causa de 80% das sequências relacionadas à interface.

Outra causa protagonista nas sequências de falha relativas às interfaces é ‘erro de manutenção’, pois embora esteja presente em apenas 2 interfaces (interface 1 e interface 2), é a segunda com maior ocorrência; sendo a causa de aproximadamente 44,4% das sequências de falhas relativas à interface 2. A categoria ‘material impróprio’ também apresenta significativa importância nas interfaces 8 e 9, sendo a causa das únicas duas sequências relacionadas à interface 8 e responsável por 42,86% na interface 9.

6. Conclusão

A aplicação sobre a análise de falhas da BSRP do sistema BOP confirmou a utilidade da aplicação das etapas e conceitos das três abordagens identificadas, permitindo a proposição de uma nova abordagem sintetizada.

Através das três abordagens identificadas pode-se integrar os conceitos e ferramentas utilizados em cada uma. A abordagem proposta por Li e Mobin (abordagem 1) foi útil principalmente nos

conceitos das funções e interfaces com as partes físicas do equipamento analisado, o que se mostrou fundamental para que servisse de apoio para o diagrama de fronteiras. Já a segunda e terceira abordagem identificada (Campean e Henshall) se mostrou útil no entendimento das funções (primárias e secundárias), e como estas se relacionavam.

Este entendimento das relações funcionais (abordagem 2 e 3) integrado com o conceito de interfaces (abordagem 1) permitiram que fosse então consolidado o artefato intitulado “tabela de interfaces”. Todos estes conceitos culminaram num artefato final que foi o FMMEA funcional, que se mostrou ser a ferramenta que poderia integrar estes conceitos e direcioná-los a uma análise de falhas envolvendo as funções e interfaces do equipamento.

REFERÊNCIAS

API STD 53 (2012), “Blowout Prevention Equipment Systems for Drilling Wells”, American Petroleum Institute.

BIOLCHINI, J. *et al.* Systematic Review in Software Engineering. **PESC (Programa de Engenharia de Sistemas e Computação)**, [s. l.], p. 1-31, 2005.

CAMPEAN, Ioan F. *et al.* A Structured Approach for Function Analysis of Complex Automotive Systems. **SAE International**, [s. l.], p. 1255-1267, 2011.

DRAEGBØ, E. Reliability Analysis of Blowout Preventer Systems - A comparative study of electro-hydraulic vs. all-electric BOP technology. Dissertação de Mestrado, p. 154, Norwegian University of Science and Technology (2014).

HENSHALL, Edwin; CAMPEAN, I. Felician; RUTTER, B. A systems approach to the development and use of FMEA in complex automotive applications. **SAE International**, [s. l.], 2014.

ISO 14224 (2016), Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.

KLINGSHEIM, Jarand F. Reliability assessment of subsea BOP shear ram preventers. **Subsea Technology**, [s. l.], 10 jun. 2015.

LACERDA, D.P. **A Gestão Estratégica em Universidades Privadas Concessionárias: Compreendendo se e como as Intenções transformam-se em Ações Estratégicas**. [S.l.]: UFRJ, 2009.

LI, Zhaojun (Steven); MOBIN, Mohammad S. System Reliability Assessment Incorporating Interface and Function Failure. **IEEE**, [s. l.], 2015.

MARTINS, Filipe *et al.* APPLYING CBM AND PHM CONCEPTS WITH RELIABILITY APPROACH FOR BLOWOUT PREVENTER (BOP): A LITERATURE REVIEW. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, [s. l.], p. 78-95, 2018.

MUTLU, Mete; ARNOLD, Zev; FRANCKEK, Mathew A. Qualitative Fault Tree Analysis of Blowout Preventer Control System for Real Time Availability Monitoring. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 1., 2017, Houston. **Conference**. Houston: Otc, 2017. p. 1 - 11.

NATIONAL OILWELL VARCO. **User's Manual: NXT Ram BOP**. 1. ed. rev. [S. l.: s. n.], 2015. 505 p. v. 1.

VAN ASTEN, P. Pull or No-pull; Risk-based Decision Support for Sub-sea Blow-Out Preventers (BOP). In: **SPE Offshore Europe Oil and Gas Conference and Exhibition**. Society of Petroleum Engineers, 2013.

WU, Shengnan *et al.* Performance analysis for subsea blind shear ram preventers subject to testing strategies. **Reliability Engineering and System Safety**, [s. l.], 2017.