

ANÁLISE DE RISCOS PARA REDUZIR A OCORRÊNCIA DE BLOWOUTS NO PROCESSO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO OFFSHORE: INTEGRANDO O CONCEITO DE CBM ASSOCIADO AO MÉTODO BOW TIE

Carlos Frederico Barros², LABRISK -UFF

Vitor Rodrigues³, LABRISK -UFF

Danilo Colombo¹, PETROBRÁS

Rodolfo Cardoso², LEI – UFF

Iara Tammela² – LEADeR -UFF

RESUMO

O objetivo é identificar e analisar as principais falhas no sistema de segurança de poços durante as operações de perfuração, a fim de mapear as principais etapas deste processo e sua relação com o sistema de segurança de poços. Após identificar as falhas, o artigo analisa os riscos por meio de ferramentas como Diagrama de Bow Tie, CBM (Manutenção Baseada em Condições), FTA (Árvore de Falhas), ETA (Árvore de Eventos), Pareto e FMEA para propor soluções para mitigar ocorrências. A operação de perfuração foi desenvolvida, onde uma atividade crítica foi definida para análise. Nesta atividade crítica foi desenvolvido um Diagrama de Bow Tie, desenvolvido para direcionar a aplicação o conceito de CBM (Manutenção Baseada em Condição), identificando a Árvore de Falhas que levam à ocorrência de blowouts, a Árvore de Eventos das consequências desse tipo de acidente foi identificada pelo FMEA para adoção de eficiência corretiva, mas o foco é evitar os eventos indesejados no lado esquerdo do Bow Tie. Após a construção do diagrama, observou-se que os componentes do BOP influenciam as falhas do controle secundário. Portanto, a Árvore de Falhas e a FMEA foram desenvolvidas para identificar as principais falhas, causas e consequências de cada componente da BOP. O processo de perfuração de poços de petróleo offshore é complexo e envolve vários riscos em sua operação de controle de poços. As funções desempenhadas pelos controles de poço primário e secundário são críticas para garantir uma operação eficaz e segura. Os componentes do BOP são projetados para não falharem devido aos danos que podem ser causados pela ocorrência de falhas do BOP (blow out preventer), tornando necessário que os seus componentes sejam projetados com alta confiabilidade e executem as funções operacionais necessárias. Nas soluções desenvolvidas neste artigo, foi proposto uma modelagem para um plano de gerenciamento de riscos sumarizado associando CBM e Bow Tie que deve ser aplicado para reduzir a probabilidade de falha dos componentes do BOP (conector hidráulico da cabeça do poço, preventores de drenagem e preventor anular). Este estudo, que se refere ao artigo, permite que o CBM (Manutenção Baseada em Condição) detecte e atue nas causas das falhas da BOP em conjunto com o Método Bow Tie. A manutenção será realizada nos componentes no momento necessário, sem que haja falha ou parada para reparo em um tempo pré-planejado ou necessário. Com isso, o processo de perfuração será desenvolvido com maior

1 MS, Engenheiro – PETROBRÁS

2 DSc, Engenheiro - UFF

3 Doutorando - UFRJ

produtividade e menor. Diante do exposto neste artigo, pode-se observar a importância das análises de riscos do processo de perfuração de poços de petróleo offshore. Como apresentado, o processo de perfuração é uma atividade complexa, pois envolvem muitos riscos em sua operação, com isso, o gerenciamento desses riscos para diminuição da probabilidade da ocorrência de blowouts é essencial para evitar perdas que podem ser ocasionadas por esse tipo de acidente. risco de segurança como uma nova técnica em engenharia de manutenção, combinando de forma pioneira as técnicas utilizadas. Com isso, as barreiras desenvolvidas no diagrama Bow-tie são essenciais para minimizar a probabilidade de ocorrência de kicks e blowouts e assim, garantir que o processo de perfuração de poços de petróleo offshore seja realizado de maneira eficaz e segura.

Palavras-chave: Gerenciamento de riscos, BOP (Blowout Preventer), Processo de perfuração, Método Bow Tie, CBM (Manutenção baseada em condições)

1. INTRODUÇÃO

Segundo Fernandes e Araújo [10], a indústria de petróleo é segmentada em três grandes blocos: upstream, midstream e downstream. O upstream corresponde às atividades de exploração e produção (E&P) que é o segmento alvo de estudo deste trabalho. O midstream está relacionado à atividade de transporte e refino, o downstream à distribuição de derivados de petróleo e gás.

O segmento upstream da indústria de petróleo pode ser dividido em quatro etapas segundo Mariano [21]: Exploração que consiste na etapa de prospecção por formações rochosas que haja acúmulo de hidrocarbonetos recuperáveis; Desenvolvimento cuja etapa envolve a perfuração de poços de petróleo, desde o início até o abandono, caso não seja encontrado uma jazida com volume economicamente recuperável de hidrocarbonetos.

Ainda Mariano [21] a Produção é o processo de exploração do petróleo e separação dos hidrocarbonetos líquidos da mistura inicial de óleo, água e sólidos. Já a fase de Abandono, o poço é descomissionado após a sua vida útil ou quando são poços recém-perfurados que não tem uma quantidade de hidrocarbonetos economicamente recuperável ou são abandonados temporariamente para operação futura.

Segundo Chipindu [6], a perfuração de poços de petróleo, desde os seus primórdios, é caracterizada por um conjunto de atividades e operações que envolvem grande complexidade, riscos e, sobretudo, elevados custos financeiros que devem ser gerenciados. Nesta fase, existe um conjunto de sistemas na sonda de perfuração com tecnologias de ponta para que o processo ocorra de forma eficaz e eficiente. Porém, os riscos de acidentes são significativos, pois além de provocar perdas da tecnologia disposta, eles podem causar acidentes com vítimas e desastres ambientais provocando severos danos financeiros ao negócio. Segundo Holand [13] o principal risco no processo de perfuração é a ocorrência de blowout.

Segundo Mariano [21], a indústria do petróleo, em toda a sua extensão, tem o potencial de produzir expressivos impactos ambientais, que podem advir tanto das atividades rotineiras (poluição por emissão de poluentes e resíduos), quanto de possíveis acidentes operacionais. Com isso, a atividade de gerenciar os riscos das operações de perfuração passa a ser de extrema relevância para a garantia da competitividade das empresas, redução de potenciais perdas de ativos e diminuição dos impactos ambientais.

Diversas técnicas de análise de riscos são utilizadas para o gerenciamento e administração de operações que envolvem os riscos de acidentes. Segundo Da Silva [8] as principais ferramentas para análise de risco são: FMEA (Failure Modes and Effect Analysis), FTA (Fault Tree Analysis), ETA (Event Tree Analysis), HAZOP (Hazards and Operability Study), ALARP (As Low As Reasonably Practicable) e Diagrama Bow-Tie.

Este artigo abordará métodos para o levantamento e análise dos potenciais riscos no processo de perfuração de poços de petróleo para a ocorrência de blowouts associados a falhas do BOP, onde ferramentas de análise serão utilizadas para ajudar na tomada de decisão para o gerenciamento desses riscos com a finalidade de prevenção de perdas de processos.

No início dos anos 60, as análises de segurança eram de base empírica, o termo avaliação de risco era virtualmente desconhecido, e a palavra confiabilidade era utilizada só em setores isolados das indústrias de armamentos e aeroespacial. Na literatura da maior indústria manufatureira do mundo, a indústria química, não havia nenhum artigo sobre a confiabilidade até 1966, e só alguns antes de 1970. A partir da década de 70, problemas associados à obrigação de produto, restrições ambientais, e a massiva intrusão governamental em projeto, construção, e procedimentos operacionais de planta, particularmente na Europa, geraram uma tecnologia completamente nova, denominada engenharia de confiabilidade ou técnicas de avaliação de risco.

Com o advento da eletrônica, componentes complexos passaram a ser produzidos em massa, trazendo maior grau de variabilidade aos parâmetros e dimensões das operações [40]. Em consequência, surgiu a necessidade de técnicas mais avançadas de avaliação do risco e de manutenção, objetivando, principalmente, evitar catástrofes e paradas de produção.

Em operações de perfuração em águas profundas, falhas não detectadas previamente podem gerar altos custos de downtime e grandes impactos para segurança e o risco da operação [29]. De acordo com Martins et al. [22] um dos maiores riscos de segurança diz respeito ao controle de fluxo de óleo e gás que vai para a superfície, o chamado blowout. Para controlar esse influxo, a primeira barreira é a pressão da coluna hidrostática e a segunda barreira é o equipamento Blowout preventer [15, 29]. Para Pitblado [34], o setor de óleo e gás, tanto onshore quanto offshore, não tiveram uma melhoria tão significativa no que diz respeito aos acidentes graves nos últimos vinte anos.

O blowout é tido como um evento de baixa probabilidade mas com alta consequência. Na indústria, os dados disponíveis ainda não são suficientes para se realizar uma análise de confiabilidade como deve ser feita.

Esse acontecimento tem consequência em diversas esferas, social, relacionado a saúde e segurança, ambiental e financeira [47].

Sendo assim, as plataformas de perfuração e extração de óleo e gás são equipadas com o Blowout Preventer (BOP), que auxilia no controle de pressão, fechando o poço em caso de diferença de pressão entre a coluna de lama e pressão do poço [22]. Para Saetre [36], o BOP é um vasto sistema de válvulas utilizado durante a perfuração para controlar e monitorar os poços de petróleo e gás. De acordo com Miura [25], é um equipamento instalado na cabeça do poço, cujo funcionamento se dá a partir do acionamento de um conjunto de válvulas e gavetas. Sua principal função é fechar o poço e ainda facilitar a circulação do fluido de perfuração de maior densidade, sendo ambos para controle de pressão do poço [16]. Para Wassar et al. [46], o BOP é um equipamento de segurança que ajuda no controle da pressão durante a perfuração. Wylie et al. [49], diz que um sistema de perfuração que seja otimizado, consegue ser tão eficiente quanto a qualidade e também precisão da sua instrumentação de suporte.

Esse equipamento, no entanto, é suscetível a falhas, conforme enuncia Sattler [37], de forma complementar, Saetre [36], considera que existem dois tipos de falhas críticas, as que impedem que o BOP cumpra sua função como barreira de segurança e as que ocasionam paradas de perfuração. Para garantir a disponibilidade do BOP, Nelson [29] expõe a importância do monitoramento da condição do mesmo, haja visto a função crítica que exerce para prevenção da integridade do poço. Tal monitoramento contribui para a recomendação de ações de manutenção do ativo, bem como auxilia a tomada de decisão dos gestores [17].

Segundo Van Asten [44], após a identificação de uma falha a decisão de retirada ou não do BOP submarino envolve diversos fatores críticos de risco. Denney et al. [9], defende que um dos problemas é o vazamento, e esse pode ser mais preciso se obedecer um procedimento de transformadas térmicas e uma análise mais automatizada. Para Nelson [29], esse sistema, por ter-se um conhecimento ainda muito limitado sobre os sistemas convencionais desse equipamento, pode ser muito complicado definir as reais condições do BOP quando ele está instalado na cabeça do poço. Logo, isso implica na complexidade da tomada de decisões que tangem esse equipamento. McKay et al. [24] defende que o BOP tem sua projeção voltada para dar segurança e proteção do poço, sendo assim, sua integridade é fundamental para garantir que ele cumpra seu objetivo.

Huse e Alme [15], considera que um dos maiores desafios para o setor petrolífero está associado a decisão de saber o momento certo de retirar o BOP do fundo do mar. Sendo assim, é de suma importância que haja o monitoramento da confiabilidade do equipamento durante seu uso. Ainda nesse sentido, para Turner et al. [43], a operação do equipamento de BOP em águas muito profundas, apresenta muitas dificuldades associadas. Uma delas é a dificuldade em conseguir verificar se, de fato, o tudo e o cilindro de cisalhamento estão fechados durante e depois do controle de poço.

No ambiente offshore, um acidente em operações de perfuração e completação de poços que utilizam o equipamento Blowout preventer (BOP) pode ocasionar perdas humanas, ambientais e econômicas incalculáveis [44]. Além disso, sendo um ambiente que varia constantemente, a avaliação de risco torna-se

mais complexa, demandando análises com abordagens aderentes a circunstâncias dinâmicas. Haja visto que segundo Zhi-Yong et al. [52] a base da análise de risco é sua identificação.

Pela pertinência do exposto, este documento busca aprofundar conceitos teóricos sobre a aplicabilidade da gestão de risco em combinação com a Manutenção Baseada em Condições (CBM) visando elevar a capacidade de manter a integridade do equipamento Blowout Preventer (BOP). Nesse sentido o documento considera a existência de duas situações: (i) onde o CBM encontra-se implantado, denominada de brownfield; e (ii) onde o CBM não está aplicado, denominada de greenfield.

Na situação de brownfield a gestão de riscos pode ser combinada com os dados gerados pelo monitoramento da condição de operação, favorecendo a análise e mitigação dos riscos. Na situação de greenfield, a gestão de riscos poderá auxiliar na implementação do CBM.

Por fim, para análise e mitigação de riscos em situações dinâmicas é, usualmente, utilizado o método baseado na filosofia de barreiras de segurança, considerado para esse contexto o mais apropriado. Assim, para a gestão de riscos, será aplicada a filosofia de barreiras de segurança por meio do diagrama de Bow-tie como apoio à manutenção integrada do BOP.

2. CONCEITOS

Os conceitos de Condition Based Maintenance (CBM) e Gestão de Risco na filosofia de barreiras serão desenvolvidos objetivando demonstrar a sinergia na sua aplicação conjunta.

Condition Based Maintenance (CBM)

No início da produção em massa, a confiabilidade era controlada por meio de procedimentos de controle da qualidade, sendo possível identificar os itens defeituosos com inspeção e teste. Contudo, com o advento da eletrônica, componentes complexos passaram a ser produzidos em massa, trazendo maior grau de variabilidade aos parâmetros e dimensões. Assim, as atividades de “testar e corrigir” evoluíram para procedimentos formais de coleta e análise de dados, a fim de projetar modificações. Complementarmente, experiências militares com equipamentos de baixa confiabilidade, expuseram a necessidade do uso de métodos formais de engenharia de confiabilidade, como coleta, teste e interpretação de dados de falha [40].

De acordo com a NBR 5462 [4] a confiabilidade é a “capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo”.

A partir disso, sistemas gradativamente começaram a ser projetados visando segurança, em função do advento das tecnologias e como resultado de lições aprendidas geradas por falhas [39]. Para compreender o conceito de falha, a NBR 5462 [4] define como o “término da capacidade de um item desempenhar a função

requerida”. Em consequência, para garantir um nível satisfatório de confiabilidade de maneira eficiente durante um intervalo de tempo preestabelecido foram introduzidas as técnicas de manutenção [18].

Ao longo dos anos, a manutenção corretiva, onde o reparo ou substituição do equipamento ocorre após a falha e nenhuma ação de manutenção é realizada anteriormente, evoluiu para estratégias de manutenção preventiva, com o objetivo de evitar falhas catastróficas e paradas na produção. A manutenção preventiva baseia-se em inspeções e ajustes realizados em períodos predefinidos independente do estado do ativo, ocasionando, muitas vezes, manutenções desnecessárias e uso intensivo de mão de obra. As estratégias manutenções preditivas, foram desenvolvidas posteriormente, buscando mais assertividade nas atividades de manutenção, concomitantemente, tecnologias de monitoramento e diagnóstico com melhor desempenho foram desenvolvidas [13].

A manutenção preditiva, segundo a NBR 5462 [4] “permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva”. Nesse contexto, a manutenção baseada em condição (CBM) surge como uma abordagem para redução de incertezas nas ações de manutenção e tomadas de decisão a partir do diagnóstico em tempo real das condições de um ativo [33]. Essa abordagem contribui para a estimativa da vida útil durante o uso do ativo, gerando um impacto positivo no planejamento das atividades de manutenção e reposição, bem como para o desempenho operacional [50].

A manutenção baseada em condição conforme define a ISO 13372 [16] é uma “manutenção realizada e regida pelos programas de monitoramento de condições”. Em outras palavras, é um programa de manutenção orientado pelas informações coletadas durante o monitoramento das condições de um ativo físico. Com base nessas informações, o CBM recomenda ações de manutenção, buscando evitar operações desnecessárias, realizando tarefas de manutenção somente quando evidenciados comportamentos anormais [18]. Esse ganho de precisão nas manutenções culmina na redução de custos e riscos [18, 52]. Segundo Jardine *et al* [18] as três principais etapas da CBM são: i) Aquisição de dados; ii) Processamento de dados; e iii) Tomada de decisões de manutenção.

Gestão de risco

Segundo Solvang, *et al.* [41] “o risco é formalmente expresso como perdas futuras esperadas, é calculado como o produto da probabilidade de falha e consequência de falha”. O termo "risco" geralmente é aceito como sendo uma combinação das consequências indesejáveis de uma atividade e a probabilidade de ocorrência dessas consequências. Segundo Narayan [28] diversos fatores influenciam a percepção do risco, embora, em geral, seja visto pelo aspecto negativo, quando a expectativa é evitar perdas a tendência é dar-se mais atenção em sua busca.

Para Yang [51], a gestão de risco é um processo no qual todas as decisões são com base na avaliação do risco em questão. E essa avaliação é algo sistemático, que avalia o impacto, a ocorrência e o resultado das atividades humanas.

A gestão de risco abordada em sua forma convencional, pode não ser tão eficaz por não levar em consideração as interconexões entre os riscos e por não ser tão abrangente como deveria. Ainda nessa linha, o gerenciamento deve conseguir priorizar os riscos e medi-los, desenvolvendo posteriormente estratégias para mitigar, monitorar e controlar esses riscos [3].

Tabibzadeh e Mokhtari [42] dizem que Rasmussem desenvolveu uma organização que é constituída por seis camadas hierárquicas e é conhecida como “estrutura de gerenciamento de risco”. Sendo assim, cada camada engloba um conjunto de tomadores de decisão, partes interessadas, ou autores de um sistema que está sendo estudado no momento. A ordenação dessas camadas segue a seguinte ordem, indo de cima para baixo: trabalho, equipe, gerência, empresa, reguladores e associações e governo. A análise feita com base nessa estrutura é importante, pois exprime algumas relações de interações das camadas entre si. Dessa forma, vai além da análise apenas focada nos atores de cada nível, é possível que as decisões que são tomadas gerem reflexos para baixo (na hierarquia das camadas) e a troca de informações se propaga para cima.

Assim, o risco pode ser calculado por meio da Equação I apresentada, sendo o mesmo definido como um conjunto completo de cenários (S_i), a probabilidade (Li) e as consequências (C_i) de cada cenário, ou seja, o conjunto de todas triplas (S_i , Li , C_i).

$$\text{Risco} = \sum_{i=1}^n S_i * Li * C_i \quad (I)$$

Onde:

- S_i – *Scenario* ou Cenário de risco numa instância i ;
- Li – *Likelihood* ou Probabilidade de ocorrência numa instância i ;
- C_i – *Consequence* ou Consequência do perigo numa instância i .

Dessa forma, o risco e suas consequências, como por exemplo, perdas econômicas, podem ser minimizadas, reduzindo a probabilidade de falha ou suas consequências [40]. Sabendo que não existe risco zero, a busca pela redução do risco varia conforme a percepção da sociedade de tolerância, aceitabilidade e não aceitabilidade de cada circunstância, para isso, deve-se estabelecer um nível quantificável para o risco de fatalidade. Para facilitar o estudo dessa percepção, o conceito ALARP (tão baixo quanto razoavelmente praticável) foi desenvolvido, propondo uma quantificação para da percepção do risco em níveis, conforme apresentado pela Figura 1. Assim, um risco é considerado ALARP quando a redução do risco é insignificante em relação ao custo de evitar esse risco [40].

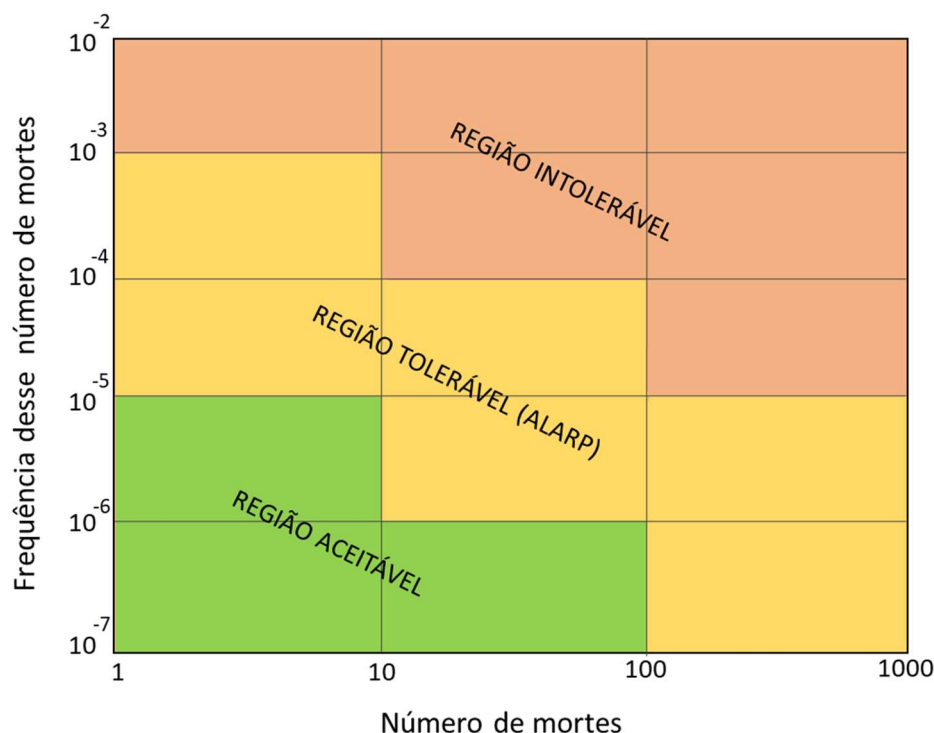


Figura 1 – Gráfico ALARP
Fonte: Smith (2001, p. 130).

De acordo com Yang [51], a gestão de risco reduz os impactos negativos sob a ótica do futuro, que é muito incerto. Auxilia para que as perdas sejam menos prováveis e severas, fazendo com que seja possível alocar da melhor maneira os recursos. Defende ainda que é um processo de estratégia de negócio, onde o foco é na identificação de possíveis riscos e suas consequências. Ainda diz que a gestão de risco pode ser classificada de acordo com seu nível de exposição ao próprio risco. Com isso, tem-se a auto retenção, que normalmente é utilizada para riscos de baixo nível; retenção de risco e transferência de seguro, que são usados em casos de riscos médios; existem as situações em que os riscos são de alto nível e, nesse caso, é usado o controle de perda. Por último, tem-se os riscos de nível muito alto, onde são feitas as prevenções.

Num sentido prático, a avaliação de risco é qualquer método - qualitativo e/ou quantitativo - para avaliar os impactos de risco em situações de decisão. Uma exigência essencial para avaliação do risco é o acesso às informações atualizadas. Para identificar os perigos, analisar os riscos, e chegar a uma avaliação se os controles são adequados para um perigo em particular, se requer frequentemente uma referência às informações e diretrizes publicadas nos regulamentos locais. Várias técnicas misturam técnicas qualitativas e quantitativas. A meta de todos estes métodos é ajudar o tomador de decisão a escolher um curso de ação, dado o melhor entendimento de possíveis resultados que poderiam acontecer.

A maioria das técnicas de avaliação de risco é uma análise estática, isto é, uma análise desenvolvida para um contexto pré-estabelecido sem alterações, ou seja, para um sistema imutável. São técnicas para garantir a segurança em sistemas onde em grande parte do tempo, o sistema está num regime dito permanente e a principal tarefa dos operadores é o de manter o *status quo*. Isto se deve à origem deste tipo de análise na indústria química, onde se estudam as operações da planta de processo. Esta premissa, de que o contexto não

muda, é aplicável quando se estuda a operação de plantas de processo. Já estudos de risco para um regime transiente exigem uma análise dinâmica que consiga incorporar as alterações nas condições dos objetos de estudo com o decorrer das atividades.

Dessa forma, três métodos normalmente usados na indústria internacional, notadamente nas atividades de engenharia, são apresentados: o método baseado nas técnicas de avaliação de risco; o método baseado na investigação de acidentes; e o método baseado na filosofia de barreiras de segurança.

A seguir, uma listagem de técnicas de avaliação de risco mais conhecidas.

Quadro 1 - Técnicas de avaliação de risco (Autores)

Técnica	Referência
Change Analysis - Análise de mudança	Schubert (2002)
Emergency Preparedness Analysis - Análise de Preparação às Emergências	NORSOK D-010 (1998)
Environmental Risk Management - Administração de risco ambiental	Berger (1996)
FMEA - Failure Modes and Effects Analysis - Análise de Modos de Falhas e Efeitos	Schubert (2002)
FMECA - Failure Mode, Effect and Criticality Analysis - Análise de Modo de Falha, Efeitos e Criticalidade	Wabnitz e Netherland (2001)
FTA - Fault Tree Analysis - Análise de Árvore de Falha	Magalhães (1988), Takashina (1989), Bastos e Formigli (199-), Burns (1991), Lima (1992), Høyland e Rausand (1994), Wabnitz e Netherland (2001), Schubert (2002) e Holand <i>et al.</i> (2004)
HAZOP - Hazard and Operability Study - Estudo de Perigo e Operabilidade	Schubert (2002), Comer <i>et al.</i> (1986), Rice <i>et al.</i> (1993), Willis <i>et al.</i> (1994), Poblete <i>et al.</i> (1994), Berger (1996), Rizzi e Priotti (1998) e Santos <i>et al.</i> (2001)
PHA - Preliminary Hazard Analysis - Análise Preliminar de Perigo	Henley e Kumamoto (1981) e Kent e Sanborn (1991)
PRA - Probabilistic Risk Assessment - Avaliação de Risco Probabilístico	Moss (1989) e Palisade (2000)
QRA - Quantitative Risk Analysis - Análise quantitativa de risco	NORSOK D-010 (1998), Palisade (2000) e Holand <i>et al.</i> (2004)
RBD - Reliability Block Diagrams - Diagrama de Bloco	Henley e Kumamoto (1981) e Wabnitz e Netherland (2001)

SJA - Safe Job Analysis - Análise de Tarefa	NORSOK D-010 (1998)
What-if analysis - Análise E SE	Schubert (2002)

Interpretando as três metodologias de gestão de risco comumente utilizadas pela indústria ao contexto do estudo, foi elaborado um quadro comparativo, conforme ilustra o Quadro 2. A partir dessa avaliação, observa-se que as características da Metodologia de barreiras possuem uma maior aderência ao estudo, ou seja, à dinâmica das operações de perfuração de poços *offshore*.

Quadro 2 – Adoção de metodologia de barreiras para BOP (Autores)

Metodologias de gestão de risco	Comentários	Contexto do estudo	Exemplo
Risco baseado nas Técnicas de avaliação de riscos	Análise estática para sistemas imutáveis em contextos preestabelecidos sem alterações/ Ferramentas quantitativas < expertise.	<ul style="list-style-type: none"> • Mutação constante; • Regime transiente. 	<ul style="list-style-type: none"> • FMTA; • FTA; • FMEA; • HAZOP; • WHAT-IF.
Risco baseado na Investigação de acidentes	Uso de similaridade quando existe um novo estado da arte de um acidente/ Uso de banco de dados x problema de integridade de informações/ Uso de banco de dados x dificuldade de encontrar casos similares.	<ul style="list-style-type: none"> • Eventos desconhecidos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Banco IADC.
Risco baseado em Barreiras	Barreiras associadas a um PGR (Programas de Gerenciamento de Risco) atualizam-se continuamente ao estado da arte da empresa/negócio/equipamento, considerando as mudanças de contexto.	<ul style="list-style-type: none"> • Ligação contínua entre atividades, procedimentos, responsabilidades individuais criando dinâmica de atualização constante. • O método mitiga pré e pós eventos. 	<ul style="list-style-type: none"> • BOW-TIE

Nas atividades industriais mundiais, há muito tempo se utiliza o conceito de barreiras de segurança para mitigar os riscos operacionais. Sendo considerada como a mais efetiva para o estudo, pois conforme defendem Jacinto e Silva [17], a estrutura da ferramenta permite que seja identificada, ao mesmo tempo, causas e consequências do problema central e a necessidade de barreiras de segurança. Além disso, permite a identificação, de maneira mais rápida, das barreiras que já estão em uso e quais estão apresentando falhas, contribuindo para melhorias em termos de segurança. Fraser *et al.* [11], defende que o diagrama auxilia no esclarecimento da sequência de acontecimentos que podem culminar em riscos operacionais ou de processos.

Essa metodologia incorpora a análise de eventos básicos de falha. Os três tipos de eventos básicos de falha, comumente encontrados são:

- Eventos relacionados aos seres humanos (falha humana), tais como, erro de operação, erro de execução, erro de projeto, falha na logística, etc.;

- Eventos relacionados à restrição tecnológica como a falha dos equipamentos, o vazamento de fluido de uma válvula ou linha e medição incorreta de um sensor;
- Eventos relacionados ao ambiente (condições ambientais) como terremotos, maremoto tempestade, inundação, fogo causado por raios.

A falta de segurança é causada frequentemente por uma combinação destes eventos básicos de falha, isto é, falhas de equipamentos mais o erro humano e/ou ocorrências ambientais naturais. No sentido exato, o risco envolve apenas a possibilidade de sofrer um dano ou uma perda. No contexto do estudo, porém, entende-se também como a identificação de risco, a atividade de identificação das oportunidades (resultados positivos) como também das ameaças (resultados negativos). Assim, como resultado da comparação entre os três métodos de mitigação de risco, para análise e mitigação de riscos em situações dinâmicas, o método baseado na filosofia de barreiras de segurança mostrou-se apropriado.

Para pesquisa e aplicação desta filosofia optou-se em especificamente pelo diagrama de *Bow-tie*. Essa metodologia incorpora no seu escopo de tratamento a filosofia incremental de mitigação por barreiras e de consequências conforme a análise do risco, evidenciada na Equação I.

Bow-Tie

O método *Bow-Tie* é uma ferramenta para a análise e gestão de riscos complexos e dinâmicos. Este método foi adaptado pela Shell nos anos 90 e hoje é largamente utilizado por empresas da área de energia e transporte dentre outras. Segundo Jacinto e Silva [16], o diagrama de *bow-tie*, é utilizado para entender as causas e consequências dos acidentes num mesmo momento em que se analisa as barreiras de segurança. Para Saud *et al.* [38], esse diagrama aborda as principais temáticas dos processos de gestão de riscos, identificação, prevenção, mitigação e avaliação do risco em questão que é representado pelo evento crítico. Cockshott [7], argumenta também que o *bow-tie* mostra a ligação entre as ameaças, perigos, consequências e ameaças.

O *bow-tie* é uma ferramenta de análise qualitativa que auxilia na detecção de riscos, mas, principalmente, ajuda a entender nitidamente a diferença entre as barreiras de proteção e de prevenção mostrando a ligação entre os acidentes e riscos [17]. Para Saud *et al.* [38], apesar da ferramenta ter características majoritariamente qualitativas, também é possível representar dados quantitativos, visto que apresenta a frequência de ocorrência das falhas analisadas. Bellamy [5], defende que essa ferramenta é muito usada para avaliar riscos de acidentes maiores e menos frequentes. Segundo Fraser *et al.* [11], também ajuda o operador a identificar ações relacionadas a mitigação, a fim de diminuir as consequências do evento indesejável.

Fraser *et al.* [11], defende a abordagem da barreira física múltipla, conhecida como MPB. Esse método tem o foco em duas questões importantes. A primeira relaciona-se com a necessidade de barreiras físicas e suas funcionalidades. A segunda já está ligada aos aspectos que garantam que elas sejam de fato, eficazes para a segurança. Nessa abordagem, é tratado o Caminho de Sucesso, que busca entender o que deve ocorrer de

maneira correta, para que assim seja possível ver o que pode falhar caso algo dê errado. Ainda nesse sentido, é necessário analisar se não existe alguma falha que afete mais de uma barreira ao mesmo tempo, logo, essas barreiras devem ser analisadas tanto de forma individual quanto coletiva. Sendo assim, esse método foca exatamente onde está o risco, analisando as barreiras físicas.

De acordo com Jacinto e Silva [17], Saud *et al.* [38] e Bellamy [5], na prática, o *bow-tie* funciona de forma que no centro seja registrado o evento crítico. Do lado esquerdo define-se uma lista de possíveis causas, que de diferentes formas, possam levar ao evento crítico. Do lado direito do diagrama, são listadas as possíveis consequências para cada causa do evento crítico e, nesse momento, as barreiras de segurança do sistema em questão, são levadas em consideração. Assim como mostrado na Figura 2.



Figura 2 – Modelo Bow-Tie
Fonte: Elaborado pelos autores.

Para Pitblado e Weijand [35], existem diversas barreiras que podem ser implementadas para que o Evento Principal não aconteça e nem as consequências associadas a ele. Esse evento deve explicitar como o controle foi perdido e sugerir uma escala de segurança.

Além disso, Pitblado e Weijand [35] defendem que no diagrama de *bow-tie* é crucial que se estabeleça uma nítida relação de causa e consequência entre os fatores. Argumentam que as ameaças levam até o Evento Principal geralmente após uma sequência de causas. Para chegar a essas ameaças da melhor maneira, é aconselhável que se leve em consideração alguns pontos, como: “as ameaças devem tratar de todos os riscos significativos que levam ao evento principal”, “as ameaças devem ser diretas”, “as ameaças devem levar logicamente ao Evento Principal e depois, a todas as consequências” e “as ameaças devem ser independentes”, ou seja, não é bom que duas ameaças combinadas, levem ao Evento Principal.

As consequências são os resultados das falhas das barreiras, de forma que podem obedecer a quatro categorias: impacto ambiental, na segurança, na reputação ou então dano ativo. No *bow-tie* as barreiras têm a função de prevenir, mitigar ou impedir o Evento Principal. Sendo assim, conforme uma barreira falha, espera-se que a próxima não falhe e assim acontece até que o Evento Principal seja mitigado. Existem algumas regras para as barreiras que são apropriadas tanto para a prevenção quanto para a mitigação do risco, sendo elas: “barreiras podem ser físicas ou não”, “barreiras são coisas reais que podem ser testadas ou mensuradas, as que

não são físicas, geralmente são os sistemas”, “barreiras podem ser passivas, tal como equipamentos de contenção de pressão”, “barreiras podem ser passivas, como sistemas de desligamento de emergência”, “barreiras podem ser tarefas críticas, como inspeção de programas e sistemas processuais”, “barreiras devem ser independentes” e “aspectos sociotécnicos, barreiras são uma mistura de todas as anteriores” [35].

Ainda para Pitblado e Weijand [35], é importante salientar que a maior parte dos erros na hora de construir um diagrama de *bow-tie* é na parte das barreiras, com isso, é de extrema importância estar atento a alguns erros típicos, tais como: levar em conta muitas barreiras similares, incluir barreiras que são muito triviais ou difíceis de serem eficientes, confundir sequência de eventos de acidentes com barreiras e incluir um sistema elementar de barreira ao invés de um sistema próprio.

Ahluwalia *et al.* [1], defende que as incertezas sobre as barreiras também vão aumentando ao longo do tempo. Com o passar dos anos, algumas vão sofrendo degradação e, conseqüentemente, têm mudanças em seu nível de conformidade e confiabilidade. Sendo assim, é importante que hajam ações que ajudem a manter sua eficácia.

Para entender de fato quais são as barreiras e quais são realmente necessárias, deve-se levar em consideração as análises de riscos. Porém, outros fatores também precisam ser considerados para garantir o sucesso das barreiras. Deve analisar se as barreiras são suficientes e se estão corretas, e com isso, em muitas situações, as redundâncias são usadas para esquivar-se do fluxo descontrolado [31].

A Figura 3 apresenta detalhadamente como é um diagrama de *Bow-Tie*. Explicita onde se localizam as ameaças, causas, conseqüências e efeitos. Como são alocadas as barreiras tanto de eliminação e mitigação do risco quanto as de controle das conseqüências e seus efeitos. Esse conjunto está ligado diretamente ao evento topo, localizado no centro da figura.

Trazendo para um exemplo aplicado na área de Petróleo o Gás, em um caso de poço marítimo, para Miura [25], um possível evento topo seria a erupção do poço. Para se pensar nas possíveis barreiras, considera-se que o objetivo é então “evitar fluxo não intencional de fluido de formação para fora do poço”. Definindo as barreiras como sendo uma separação física que conseguem isolar ou diminuir o evento indesejável, pode-se considerar como duas possíveis barreiras para essa situação o *blowout preventer* – BOP e a árvore de natal molhada (ANM).



Figura 3 – Modelo descritivo do Bow-Tie

Fonte: Pitblado e Weijand (2014).

Após as potenciais ameaças e as consequências serem identificadas, as medidas de controle para evitar o evento e as medidas de recuperação para reduzir o impacto do evento são estabelecidas. As medidas de controle, (também chamadas de barreiras), são necessárias para evitar que as ameaças provoquem o evento danoso. Já as medidas de recuperação, são necessárias para reduzir a gravidade do resultado.

Como dito anteriormente, se for de interesse do usuário incluir uma análise mais completa na ferramenta do *bow-tie*, abordando também dados quantitativos, uma alternativa, de acordo com Jacinto e Silva [17] e Mokhtati *et al.* [26], é alocar uma árvore de falhas do lado esquerdo, onde são elencadas as possíveis causas. E, do outro lado, incluir uma árvore de eventos, que poderá detalhar as consequências. Para isso, é necessário ter um banco de dados e pessoas especialistas no assunto para auxiliar, além de demandar também dados sobre a probabilidade de falha das barreiras. Markowski e Kotynia [20] defendem que a árvore de falhas facilita a identificação do evento central e a árvore de eventos mostra as consequências do evento em questão.

Para Mutlu *et al.* [27], a árvore de falhas auxilia na definição de todas as combinações que são possíveis para que um evento básico possa causar um estado indesejável para o sistema em questão. Esse método é muito utilizado para, por exemplo, analisar a confiabilidade de um sistema, algum defeito do projeto, riscos de segurança, entre outros.

As técnicas para aprimorar o método do *bow-tie*, na abordagem quantitativa, e diminuir as incertezas vêm sendo aprimorada através de estudos, dentre elas tem-se a lógica *fuzzy*, teoria da evidência, abordagem Bayesiana, entre outras [3]. Para Aqlan e Lam [3], essa metodologia é usada para calcular a probabilidade e o impacto total associado ao risco em questão.

Na NASA, é utilizado um outro método quantitativo para aperfeiçoar os resultados, conhecido como “PRA – Avaliação de Risco Probabilística”. Ele ajuda a mitigar eventos de baixa probabilidade de ocorrência mas que têm grandes consequências. Ainda nesse quesito, a NASA tem um “Guia de Procedimentos de Avaliação de Riscos Probabilísticos para Gerentes e Praticantes da NASA” que foi reescrito de forma que fosse pertinente a indústria de óleo e gás [19].

Saud *et al.* [38], alega que o diagrama de *bow-tie* é uma ferramenta diferente do comum, que é apresentada de uma forma fácil de entender e prever como monitorar o risco associado ao evento em questão que vem ganhando maior espaço no mercado nas últimas décadas. Ainda nessa linha, para Markowski e Kotynia [20], quando se deseja estudar o cenário do acidente todo, por completo, o ideal é utilizar o método do *Bow-Tie*. Assim, é possível identificar todas as conexões existentes entre eventos iniciantes, de perda e de resultado. Paltrinieri *et al.* [32] também argumenta que a ferramenta do *bow-tie* é muito boa, pois por ser visualmente intuitiva, facilita a análise do usuário para entender quais proteções estão ligadas a quais causas e quais são suas consequências.

A ferramenta de *Bow-Tie* também é muito útil para análises passadas de acidentes que de fato aconteceram. Isso é um grande facilitador para a identificação de melhorias e para que o acidente não venha a ocorrer novamente. Além de que simplifica o número de possíveis causas ao agrupá-las, unindo os cenários similares. Com isso, torna possível abranger a maior gama de acidentes capazes de se tornarem reais [26]. Todavia, Shahriar [39] alega que a ferramenta do *bow-tie*, quando abordada na sua forma tradicional, não consegue traduzir a incerteza do estudo, já que supõe independência entre eventos de riscos desiguais.

Markowski e Kotynia [20] justificam que o *bow-tie* é a melhor ferramenta para representar as diferentes relações entre causas, eventos, sistemas de segurança e consequências. Esse método consegue englobar o cenário por completo, fazendo com que seja possível analisar todos as possíveis situações de acidente, inclusive o pior deles. A Figura 4 apresenta um passo a passo de como construir um diagrama de *bow-tie*.

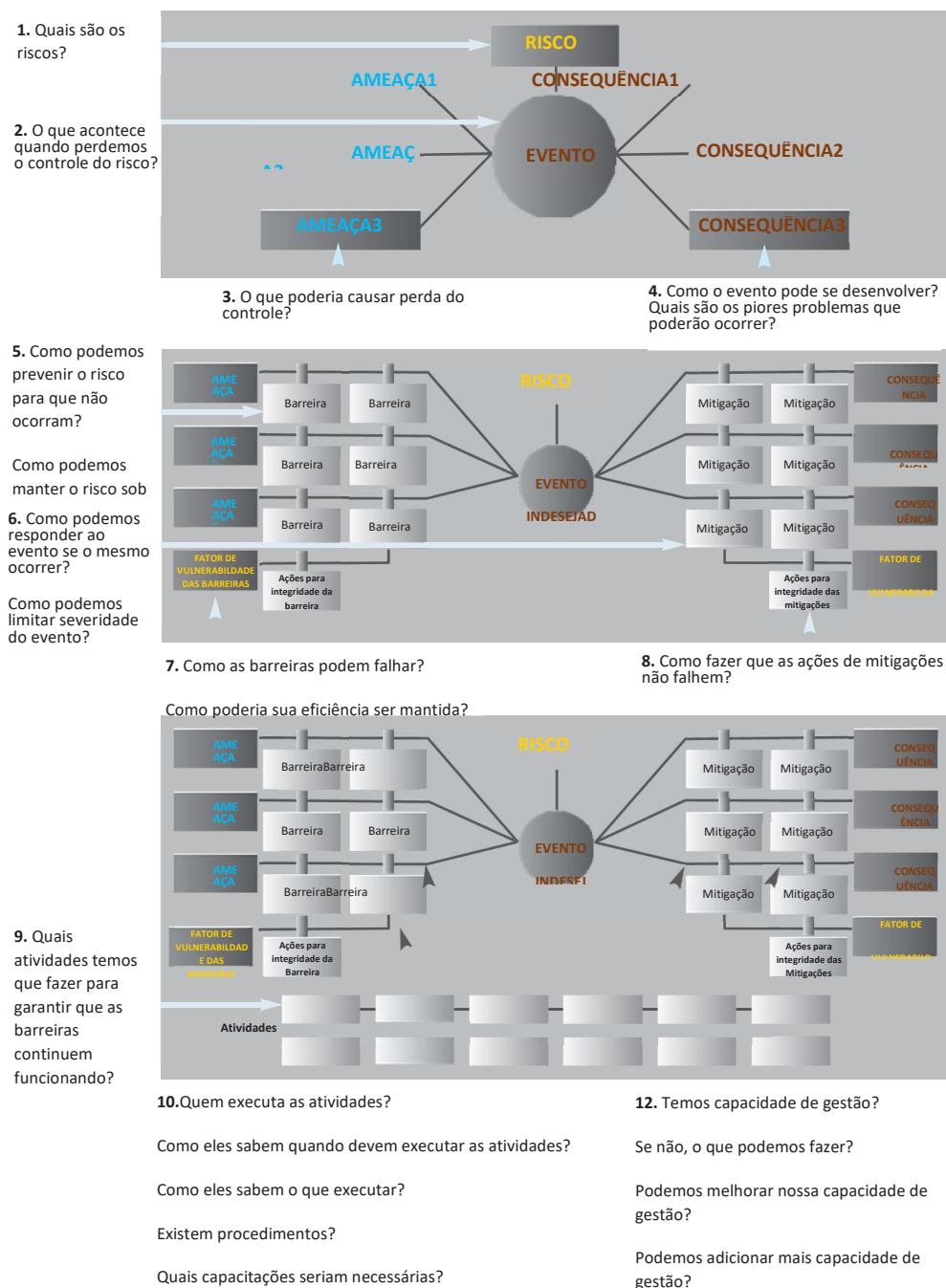


Figura 4 – Construção do Bow-Tie
Fonte: Elaborado pelos autores.

Bow-tie no controle de poço

Existem muitos riscos associados a área de Petróleo e Gás, sem dúvidas, o principal deles, que prejudica a segurança operacional, é o chute. Que nada mais é que um influxo de gás com proporções enormes que bota toda tripulação em grande perigo. Depois, outro risco considerável é quando se estabelece um

diagnóstico errado sobre determinado evento e, consequentemente, a ação de correção rápida, não acontece da forma ideal. Além de colocar muitas vidas em risco, esses problemas geram um enorme prejuízo financeiro para a empresa em questão. Sendo assim, é de extrema importância que haja um controle e mapeamento dos riscos eminentes, para que esses sejam pelo menos mitigados [12].

Como um exemplo da aplicação da ferramenta *Bow-tie*, Nelson [30] apresenta um diagrama simplificado do controle de poço. A Figura 5 ilustra o evento indesejado, a perda do controle do poço, bem como, apresenta a coluna do fluido como a barreira primária e o equipamento BOP como a barreira secundária de contenção do *blowout*, visando a preservação da integridade do poço.

O autor ressalta a importância do monitoramento da condição do BOP para avaliar e prevenir a degradação dessa barreira, a fim de que o equipamento cumpra com a função requerida. Adicionalmente, ressalta que a análise da disponibilidade do BOP permeia requisitos regulamentares e industriais que devem ser considerados. Em concordância, Van Asten [44], afirma que as operações de perfuração se articulam equilibrando os custos, riscos e conformidade com as leis da região em que operam.

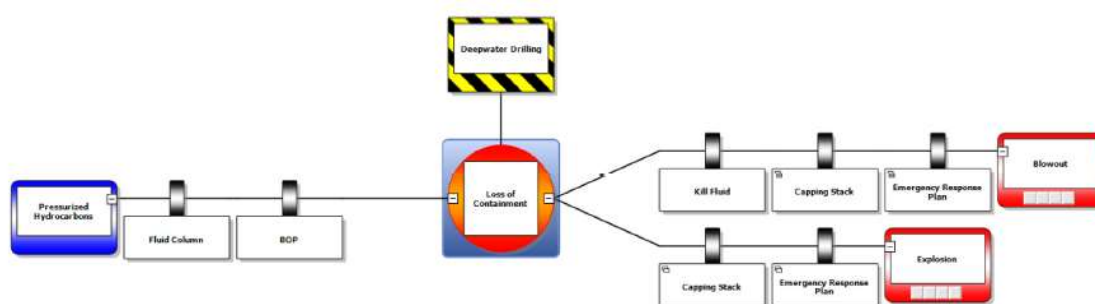


Figura 5 – Bow-tie do controle de poço simplificado
Fonte: Nelson (2016).

Nelson [30], também cita que em alguns acidentes catastróficos como o de vazamento em oleodutos, as barreiras importantes não estavam presente ou então não estavam em seu melhor estado. Sendo assim, o evento primário se tornou algo muito maior, com consequências inimagináveis. Além disso, também é importante que o reconhecimento humano acerca das condições das barreiras esteja de acordo, para que essas tenham manutenções e ações corretivas que colaborem para que elas sejam de fato efetivas.

Ainda nesse sentido, o autor, Nelson [30], afirma que é de suma importância que as barreiras já sejam projetadas, desde o início, para serem monitoradas ao longo de sua vida útil. Assim é possível que o operador consiga ter base para decidir o que fazer quanto a manutenção ou acionamento de alguma outra barreira que impeça o evento indesejável de acontecer.

De acordo com Whooley *et al.* [47], nesse setor petrolífero de perfuração de poços, é recomendável que as barreiras estipuladas sejam independentes para diminuir a probabilidade de falha em algum momento. É importante definir dois itens para que se consiga ter uma boa análise de risco. Primeiro deve-se avaliar determinado risco, ou seja, priorizar aqueles com maior probabilidade em termos de consequência. Depois o

ideal é que seja assegurado que tais riscos são toleráveis e entendíveis pelos operadores, projetistas e reguladores.

Um outro exemplo de possíveis barreiras para um *bow-tie* onde o evento indesejável seria a perda do controle do poço, seriam “1) equipamento de perfuração, 2) controle primário e barreiras incluindo, lama, revestimento e cimento, 3) monitoramento, treinamento e competência de pessoal, 4) controles e barreiras secundárias, incluindo BOP” [48].

Modelos sinérgicos

Projetos Green Field: Gestão de Riscos incorporada ao processo de construção da manutenção baseada em condição (CBM)

A gestão do risco pode ser entendida como uma ferramenta para minimizar custos, essa redução pode ser gerada por meio de estratégias de manutenção [28, 41].

Projetos *Greenfield* são projetos onde o desenvolvimento do processo de implementação da gestão da manutenção baseada em condição (CBM) do empreendimento ainda não foi operacionalizado. Desta forma o uso dos conceitos de risco usando a metodologia de Barreiras *Bow-Tie* contribuirão para detecção dos cenários de alto risco, onde o investimento em monitoramento trará contribuições em resultados (*savings*) para a organização, ou seja, hierarquizar os locais de monitoramento de forma sistêmica para um investimento eficaz.

Diferentes tipos de métodos de análise de risco são relevantes para estratégias de manutenção, como por exemplo: CBM, RCM (Confiabilidade Centrada na Manutenção), FMECA (Modo de Falha, Efeito e Análise de Criticidade) [41]. Segundo Zhi-Yong *et al.*, [52], empresas japonesas que implementaram projetos de CBM tiveram uma redução de 75% na taxa de falha de equipamentos e de 25% a 50% de redução no custo de manutenção.

As estratégias de manutenção tradicionais não têm atendido as demandas de manutenção atuais, principalmente, em operações que envolvem tecnologias complexas. Em resposta a isso, o CBM tornou-se uma alternativa para ganho de precisão nas manutenções, contribuindo para a redução de custos com manutenções desnecessárias [18, 52]. Em sua implementação, entretanto, pode surgir diversos obstáculos. Dessa forma, Zhi-Yong *et al.* [52], propõem uma estrutura de fatores de risco existentes na implementação dessa estratégia de manutenção, conforme ilustrado pela Figura 6.

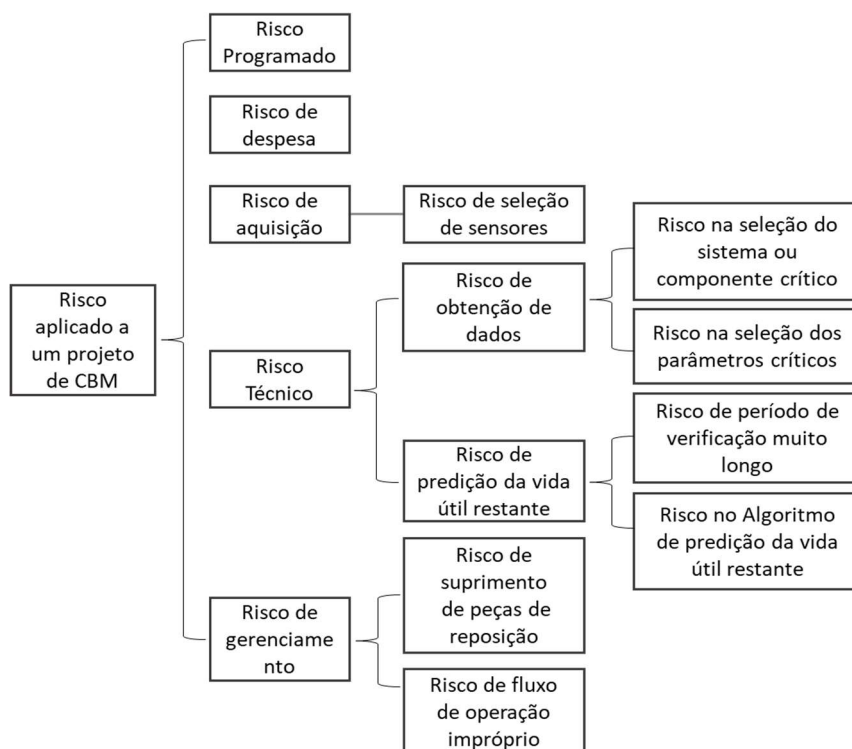


Figura 6 – Risco em projetos de CBM
 Fonte: Adaptado de Zhi-Yong *et al.* (2013).

A implementação de um projeto de CBM inclui riscos nos aspectos de aquisição, tecnologia e gestão. Por exemplo, a dificuldade dos sensores conseguirem detectar os principais parâmetros ou do algoritmo não ler ou manipulados dados coletados imediatamente dificultando a previsão da vida útil dos demais itens do sistema [52]. Em vista das dificuldades inerentes à implementação da manutenção baseada em condição, acredita-se que a utilização de uma abordagem de gestão de risco poderá contribuir para a mitigação dos riscos de um projeto de aplicação da CBM em equipamentos das operações *offshore*.

A combinação das técnicas do método Bow-tie de detecção de cenários de risco com geração de alta perturbação e lucro cessante para identificar e orientar os locais de monitoramento apresenta-se como uma solução ótima para implementação de gestão de manutenção baseada em condição (CBM).

Projetos Brown Field: Ambientes operacionais com CBM desenvolvendo implementação de Gestão de Risco baseado na metodologia de barreiras Bow-Tie

O monitoramento, análise e diagnóstico das condições de um equipamento fornece a probabilidade real de falhas condicionais e os itens mais críticos, propiciando tomadas de decisão mais assertivas, estimativas mais precisas de risco e, consequentemente diminuição dos riscos e dos custos [41].

Os projetos Brown Field são aqueles onde o estudo de análise de risco já encontra no ambiente operacional a CBM implementada.

Na implementação na organização de um programa de gerenciamento de riscos que já opera com o conceito CBM, a contribuição da metodologia de barreiras Bow-Tie será em detectar e validar a estrutura de sensoramento e monitoramento quanto à sua eficácia de prever e evitar a sinistralidade, e permitir a rápida recuperação operacional.

Assim como definir novos riscos e seus cenários que demandam um monitoramento ainda não estabelecido, e prover a organização desta informação para adequação dos parâmetros da gestão de manutenção no seu processo decisório.

No uso da manutenção baseada em condições a atenção deve estar em itens sujeitos ao enfraquecimento devido às condições em que está exposto, contribuindo para o aumento dos riscos da operação. Sabendo que as condições de operação podem ocasionar em uma maior probabilidade de falha, seu monitoramento pode identificar falhas incipientes [41]. Aliado a isso, o envelhecimento dos equipamentos reduz a margem de segurança ao longo do tempo, entretanto é possível prever as condições críticas conhecendo as taxas de envelhecimento dos itens dada as condições de funcionamento. Esse conhecimento pode ser obtido por meio de modelos de envelhecimento ou por métodos de diagnóstico estruturados com base no monitoramento das condições reais [41].

Operações *offshore* com petróleo e gás envolvem riscos ambientais, humanos e de propriedade, o evento de *Blowout* representa um dos principais riscos a essas atividades. A análise do risco neste ambiente, contudo, varia de acordo com cada poço a ser explorado, em função das características específicas de cada reservatório que influenciam nos níveis e fatores de risco [45]. O autor apresenta três dos principais parâmetros que influenciam o nível de riscos ambientais e de segurança que envolvem os Blowouts: sua probabilidade, as taxas de fluxo de hidrocarbonetos em potencial e sua duração. Uma análise sísmica inadequada pode elevar as incertezas durante a operação e maiores riscos. Vandenbussche [45], apresenta doze fatores de risco relacionados ao reservatório e as condições subterrâneas, três relacionados ao poço, sonda e a coluna de perfuração e três fatores relacionados as operações, conforme apresentado no Quadro 2.

As propriedades de formação dos poços têm impacto nas taxas de fluxo de hidrocarbonetos resultantes. Normalmente, as formações com maior pressão, menor margem operacional e maiores incertezas, apresentam um risco maior de *blowout*. Essa avaliação é realizada caso a caso, levando em consideração as características e incertezas da formação, os dados para análise são obtidos durante o início da perfuração [45].

Quadro 3 – Fatores de risco (Adaptado Vandenbussche 2012)

Categoria	Fator de Risco
Reservatório e condições subterrâneas	Número de reservatórios/alvos Formações de perfuração desafiadoras Margem de pressão Pressão de poros Alta pressão Estabilidade do furo Permeabilidade Pagamento líquido Dados sísmicos

	Poços deslocados Inferior da profundidade do reservatório Incerteza de pressão
Poço, sonda e a coluna de perfuração	Experiência da equipe de perfuração Profundidade da água de perfuração Desempenho de cimento
Operações	Viagens relacionadas ao design e coring após o primeiro reservatório é atingido Complexidade do design de poços O registro é executado após o primeiro reservatório ser atingido

Segundo Affleck *et al.* [2], em um incidente de controle de poço gerado por um fluxo não planejado de hidrocarbonetos, a falta de conhecimento detalhado das condições do poço e do status dos subsistemas do equipamento BOP prejudica o processo de recuperação que pode levar dias e alto dispendido financeiro. Além disso, o desconhecimento do status do potencial de contenção de um poço aumenta o risco e a gravidade do evento. Ainda segundo o autor, existem fatores humanos que influenciam a decisão de evacuação de uma sonda, alguns deles são:

- Volume exibido ou percebido, localização e tipo de afluxo ou fuga de fluido do poço;
- Precisão percebida dos dados;
- Condição do poço atual e status?
- O incidente é repentino ou está aumentando?
- Experiência da tripulação lidando com incidentes de controle de poço igualmente significativos, tanto operacionalmente e em simulações de treinamento;
- O risco foi coberto por revisões prévias e simulações de treinamento?
- Alinhamento de procedimentos locais juntamente com fatores culturais;
- Chamada de segurança. É mais seguro evacuar (descer ao nível do solo em uma plataforma terrestre com alarmes de H₂S disparados) ou ficar na estação e tentar um *shut-in*?
- Dúvida. Eu senti falta de sinais de aviso óbvios?
- Culpa - Eu sou responsável por culpa, repercussão, até mesmo acusação?

3 UMA APLICAÇÃO

Em processo de projeto similar já desenvolvido [23] foram exercitados os esforços de desenvolvimento de uma modelagem bow tie aplicada a gerenciamento de riscos que oportunizou a aplicação de um primeiro esforço de modelagem para aplicação conjunta com CBM.

Este conjunto de conceitos estará sendo aplicando para uso na fusão da engenharia de risco à engenharia de manutenção num projeto brown field.

A seguir descrevemos de forma compacta os passos de construção do modelo bow tie aplicado a operação de perfuração de poço associado a eventos de blow out e BOP [23]:

Passo 1- Modelagem para análise dos potenciais riscos para ocorrência de blowouts no processo de perfuração de poços de petróleo offshore.

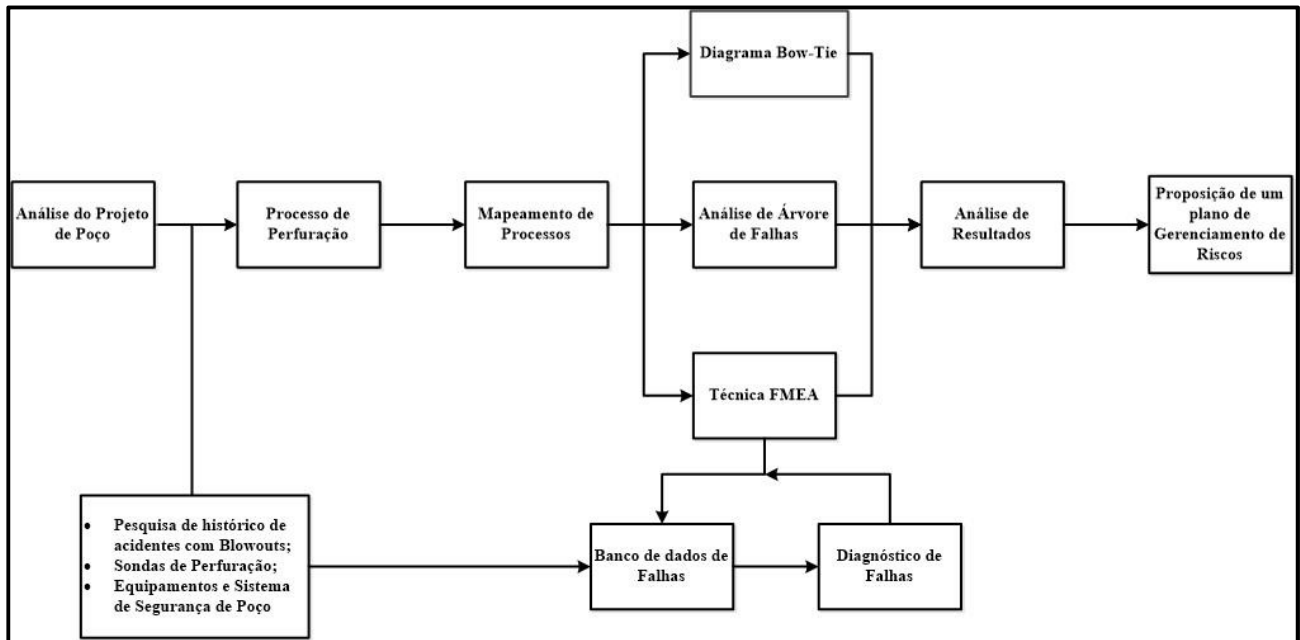


Figura 7 - Fluxograma para Aplicação das Ferramentas de Análise

Fonte: Heinrich, J. 2017

Passo 2- Mapeamento do processo básico da operação de perfuração de poços de petróleo offshore

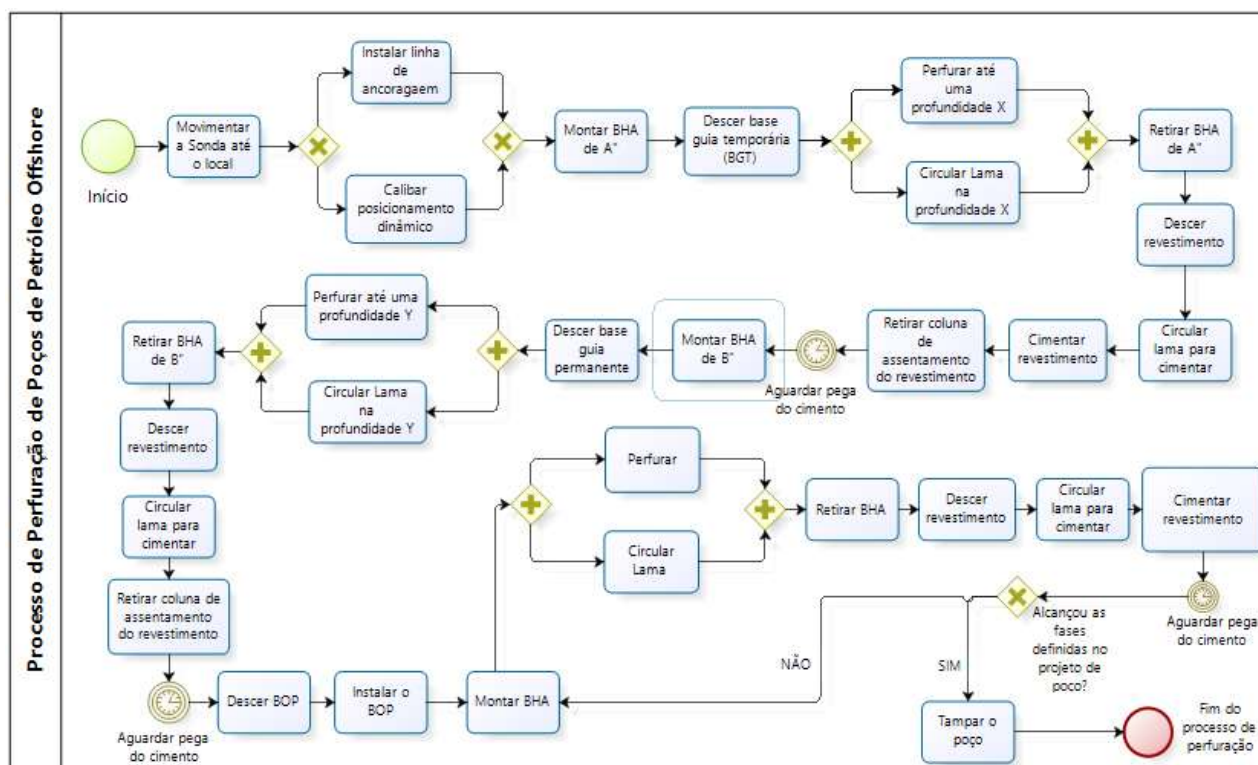


Figura 8 - Fluxograma Básico do Processo de Perfuração de Poços de Petróleo Offshore

Fonte: Matos 2017

Passo 3 - Análise dos riscos no processo de perfuração

Como o processo de perfuração consiste em diversas fases até chegar a profundidade objetivo do projeto, o mesmo apresenta diversos riscos. Para que esses riscos não venham a se tornar acidentes graves, o sistema de segurança do poço deve ser operado de forma eficaz e eficiente para que possa evitar a ocorrência desses problemas. Como o principal objetivo desse sistema é evitar a ocorrência de kicks e por consequência a de blowouts, o mesmo não pode vir a falhar.

O sistema de segurança da operação de perfuração é constituído de dois tipos de controles de poço: o controle primário e o controle secundário. O controle primário, como descrito anteriormente, é exercido pelas ações do fluido de perfuração para que possa manter uma pressão hidrostática superior à pressão de poros dos fluidos contidos nas formações rochosas.

Já o controle secundário, que entra em ação no momento que o controle primário é perdido, consiste nas ações do equipamento de prevenção de blowouts (BOP) com intuito de controlar e remover os influxos indesejados antes que os mesmos se tornem em um blowout. Em vista disso, se faz necessário que esses dois controles não apresentem falhas. Porém, se apresentarem, as mesmas devem ser bloqueadas fazendo com que os riscos inerentes a elas sejam evitados ou mesmo mitigados.

Os riscos são intrínsecos a qualquer tipo de atividade, sendo que alguns são mais críticos que os outros. Os riscos presentes na perfuração de poços de petróleo no mar, apresentam um nível alto de gravidade. É

importante analisar esses riscos presentes na operação de segurança de controle de poço para poder evitar a ocorrência do acidente crítico, que neste caso é o blowout.

Para poder analisar esses riscos é utilizada a ferramenta Bow-Tie para poder analisar a árvore de falhas que conduz a ocorrência de blowout, levando em consideração os dois tipos de controle de poço mencionados anteriormente e a árvore de eventos gerada após a ocorrência do mesmo para análise das consequências. A seguir é apresentado o diagrama Bow-Tie para evitar a ocorrência de blowout onde são identificadas as diversas barreiras a partir da ocorrência do evento indesejado de perda de controle do poço.

Analisando o diagrama, é possível podermos notar que a perda de controle do poço que provoca a ocorrência de blowouts se dá pelas perdas dos controles primário e secundário. Após a ocorrência do blowout, os planos de contenção para a mitigação do acidente são realizados para minimizar os impactos do mesmo. Essas medidas compõem a barreira de contenção do Bow Tie [23].

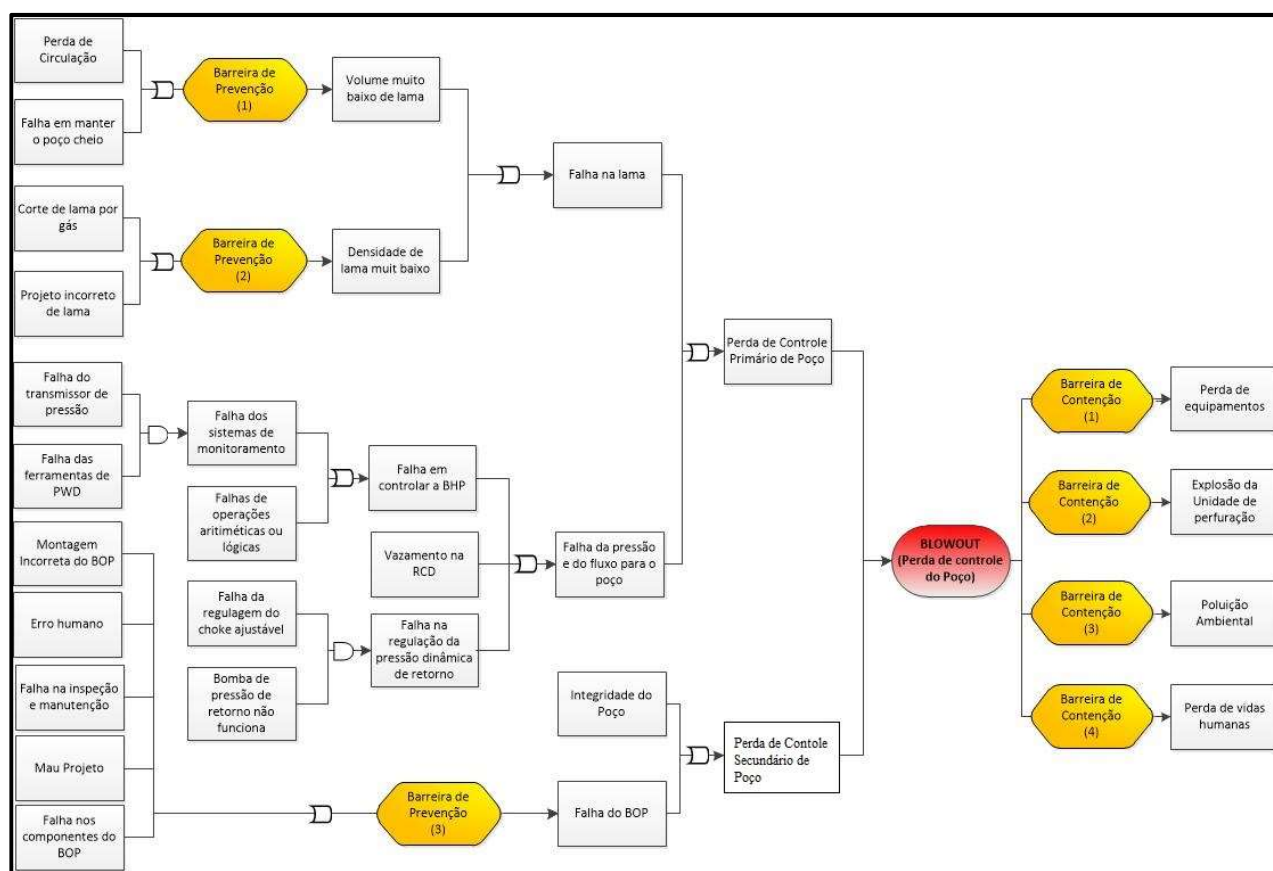


Figura 9 - Diagrama Bow-Tie da ocorrência de blowout

Fonte : Matos 2017

Passo 4- Confiabilidade do BOP e de seus componentes

Um estudo de confiabilidade é desenvolvido a partir da análise de bancos de dados de falhas de um equipamento, componentes, subcomponentes e sistemas com a finalidade de evidenciar os principais componentes que podem falhar no sistema de segurança da sonda. a distribuição dos dados de falhas do BOP s pode ser representada com mais precisão pelas distribuições de probabilidade de Weibull e Exponencial, [23]. Que exemplificamos a seguir:

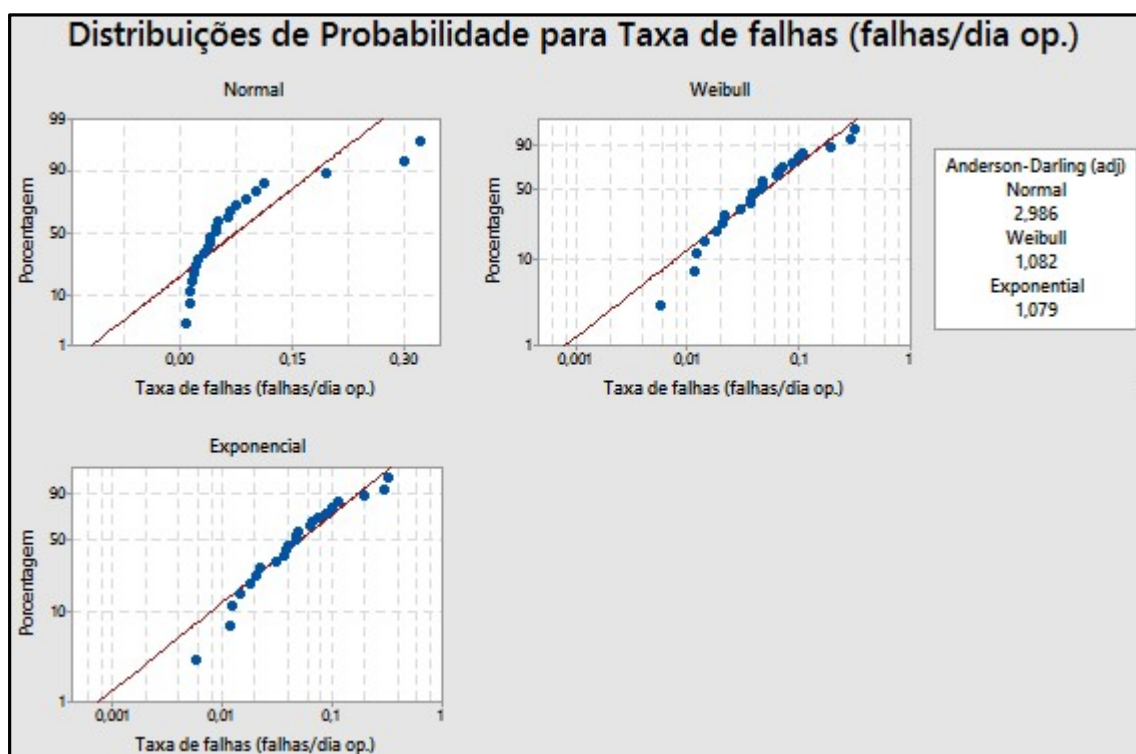


Figura 10 - Análise de Distribuição de Probabilidade para as taxas de falhas do BOP

Fonte: Matos 2017

Passo 5 – Priorização através do Diagrama de Pareto

A elaboração do diagrama de Pareto foi realizada levando em consideração o percentual de downtime causado pelas falhas dos componentes do BOP. No gráfico de Pareto, foram priorizados os componentes do BOP que serão analisados [23].

Visa priorizar os pontos críticos para aplicação de CBM e seu monitoramento buscando maior eficácia e trade off. A seguir um exemplo;

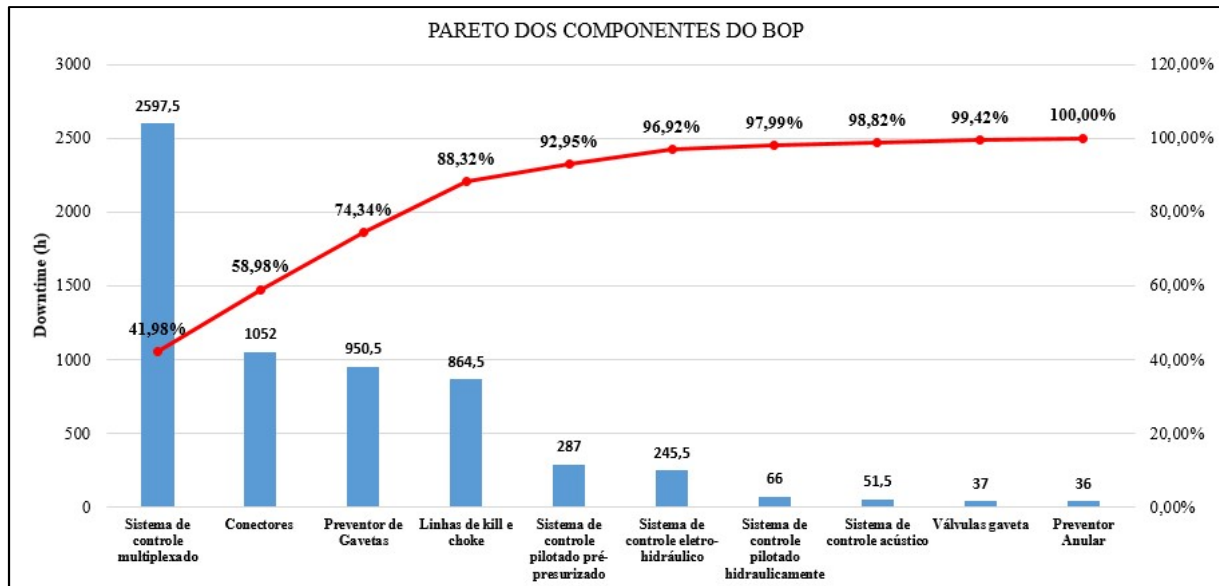


Figura 11 - Pareto dos componentes do BOP

Fonte: Matos 2017

Passo 6 - Diagrama Bow-Tie dos componentes do BOP

Finalmente temos o Bow tie, que será indutor dos pontos de sensoriamento (as barreiras) ao estabelecer suas ameaças (as falhas dos componentes).

O grande objetivo da fusão do CBM com Bow tie é na fase de prevenção do evento indesejado, logo focamos no lado esquerdo do bowtie que tem efeito preventivo.

A seguir exemplos que mostram a parte esquerda do diagrama bow-tie da falha do BOP.

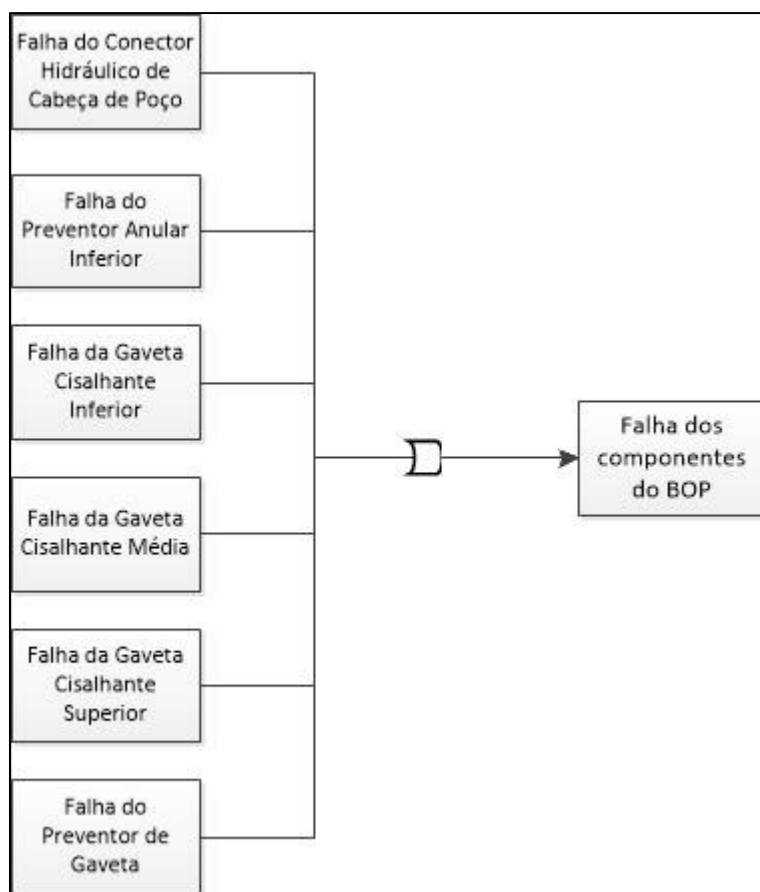


Figura 12 - Falha dos componentes do BOP

Fonte: Matos 2017

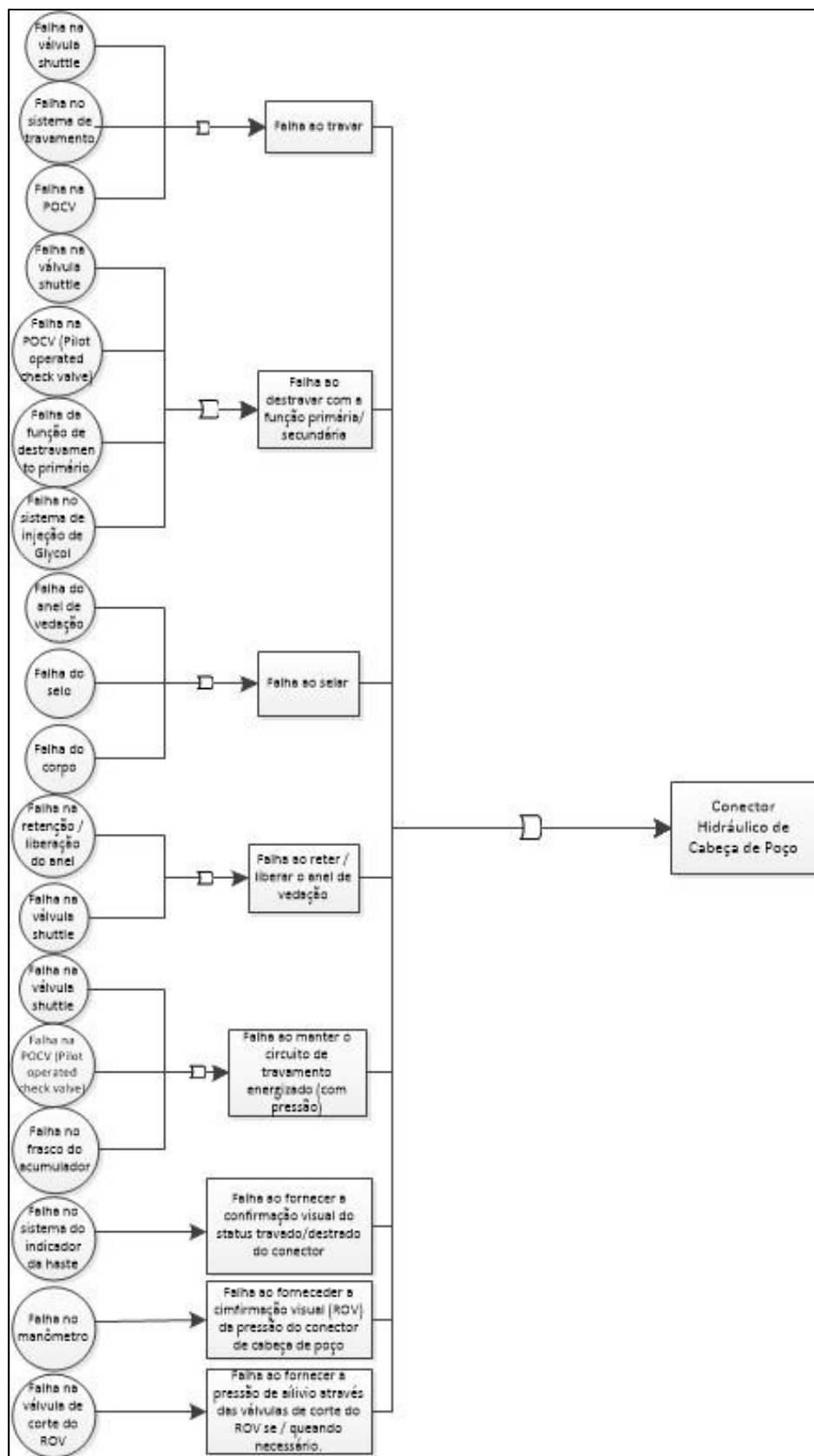


Figura 13 - Árvore de falhas do Conector Hidráulico de Cabeça de Poço

Fonte: Matos 2017

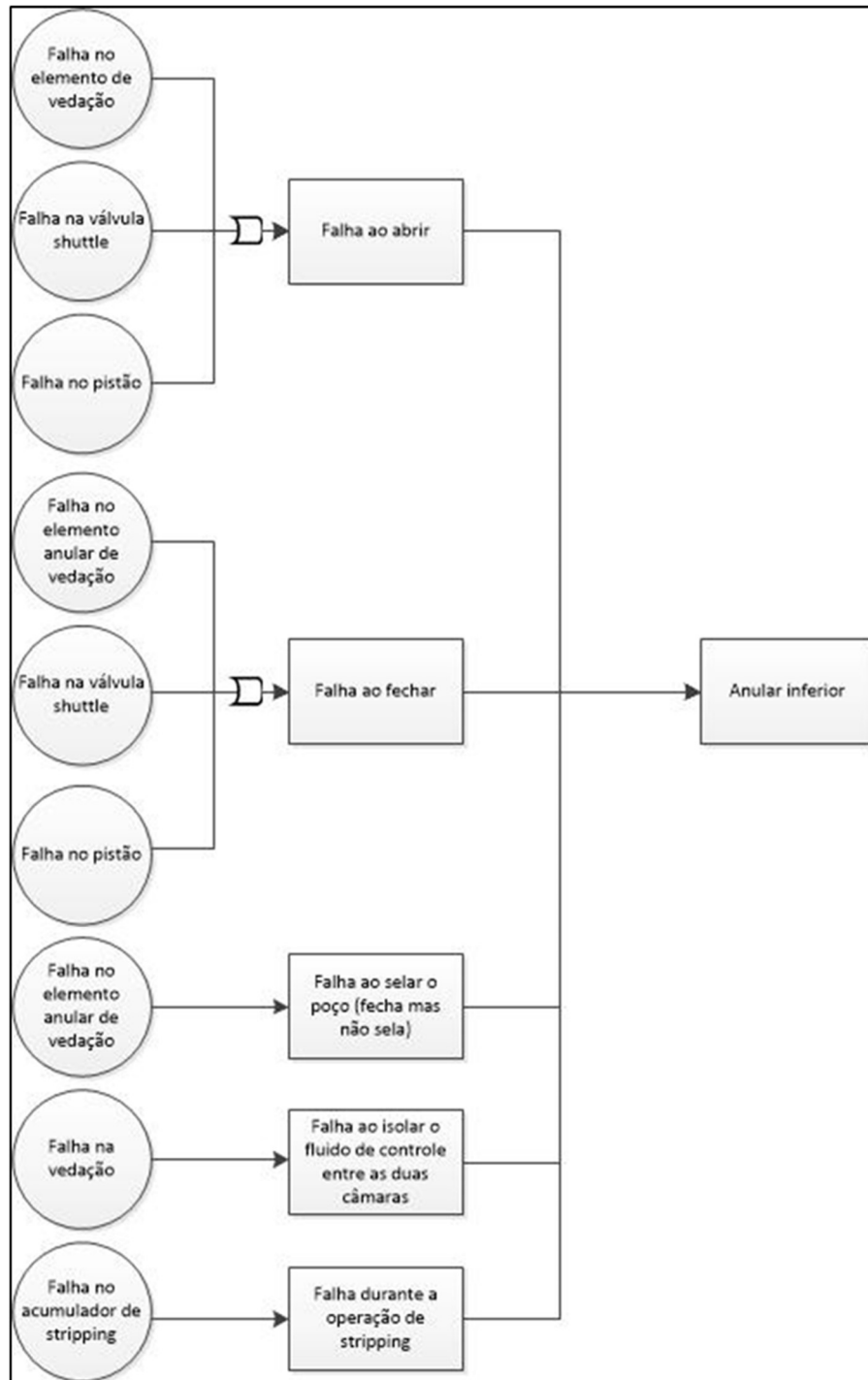


Figura 14 - Árvore de Falhas do Preventor Anular Inferior

Fonte: Matos 2017

Com isso, as barreiras desenvolvidas no diagrama Bow-tie são essenciais para minimizar a probabilidade de ocorrência de kicks e blowouts e assim, garantir que o processo de perfuração de poços de petróleo offshore seja realizado de maneira eficaz e segura.

Passo 7 – FMEA dos componentes

Para diminuir a incidência das potenciais falhas dos componentes do BOP, buscou-se identificar os potenciais modos de falha dos componentes com o intuito de avaliar os riscos associados a eles e assim, classificá-los conforme a importância para aplicação de ações corretivas [23]. Ou seja visando a atuação na mitigação de consequências, o lado direito do bow tie, após a ocorrência do evento indesejado. Cabe ressaltar que nosso foco não é em ação corretiva, mas sim preventiva.

A seguir um exemplo:

Anular Inferior										
Funções		Modos de Falha		Efeitos das Falhas		Causa das falhas	Ocorrência	Severidade	Deteccão	NPR
1	Fechar ao redor de diâmetros variados de tubos e isolar a pressão de poço	1.1	Falha ao abrir	1.1.1	Anular permanece fechado ou não abre completamente.	Falha no elemento de vedação.	4	9	5	180
						Falha na Shuttle valve.				
						Falha no pistão.				
		1.2	Falha ao fechar	1.2.1	Anular permanece aberto ou não fecha completamente.	Falha no elemento de vedação.	1	9	5	45
						Falha na Shuttle valve.				
						Falha no pistão.				
		1.3	Falha ao selar o poço (fecha mas não sela)	1.3.1	Incapaz de conter a pressão do poço.	Falha no elemento de vedação.	2	9	4	72
		1.4	Falha ao isolar o fluido de controle entre as duas câmaras	1.4.1	Incapaz de isolar o fluido de controle entre as câmaras.	Falha de vedação.	5	7	4	140
		1.5	Falha durante a operação de stripping	1.5.1	Diminuição da vida útil da borracha de vedação.	Falha do acumulador de stripping.	1	8	5	40

Figura 15 - FMEA do Anular Inferior

Fonte: Matos 2017

4 CONCLUSÃO

Ao relacionar o CBM com o equipamento de BOP, Zou *et al.* [53] diz que a manutenção baseada em condição consegue prever o status desse sistema e ainda trazer maior visibilidade das operações. Com isso é possível evitar interrupções não planejadas e garantir que haja uma manutenção de forma proativa. Segundo Wassar *et al.* [46], além de evitar a indisponibilidade do equipamento, seu monitoramento pode prevenir falhas catastróficas. Os autores afirmam que é necessário detectar e monitorar a saúde do sistema para que o alerta precoce de possíveis falha pode ser alcançada, principalmente para BOPs submarinos utilizados em águas profundas e médias, podendo ser empregado a mais de 10.000 pés.

Concluimos que esta integração sinérgica da manutenção baseada em condições (CBM) com a metodologia de gestão de risco de barreiras Bow-Tie e ferramentas clássicas de tratamento do risco, trará novas soluções e inovadoras capacidades de detecção de falhas, que levarão as atividades integradas de Engenharia da Manutenção e Engenharia de Risco (Engenharia da Sinistralidade e Engenharia de Continuidade) a novos níveis de excelência na organização.

Este artigo está relacionado a um projeto de pesquisa focado no BOP que buscará criar esta integração numa nova metodologia inédita.

A FUSÃO MANUTENÇÃO COM GESTÃO DE RISCO

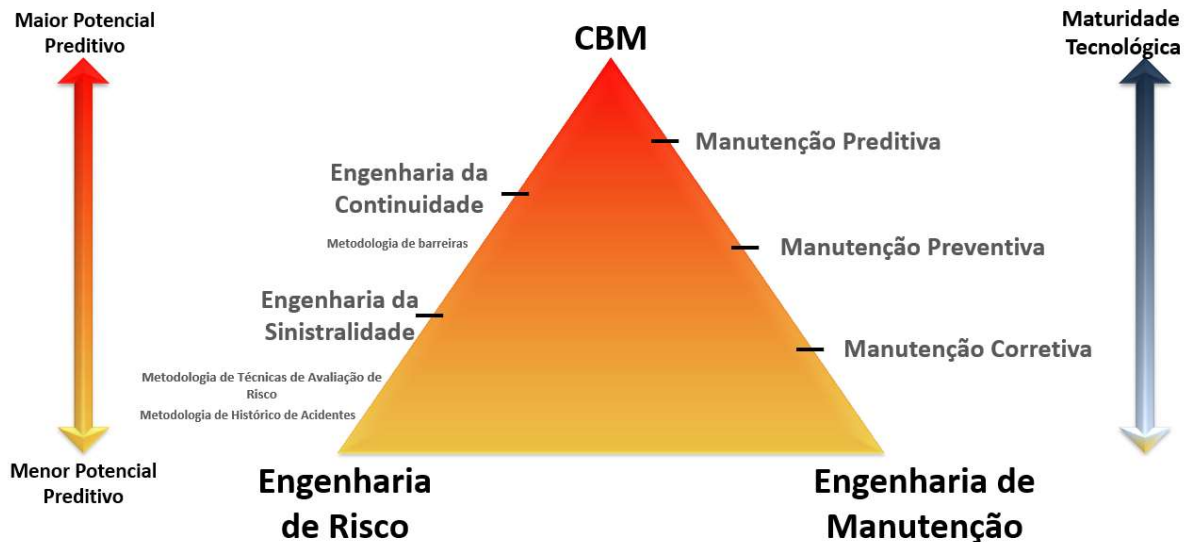


Figura 16 - Fusão Gestão de Risco e CBM

Fonte: Barros 2019

5 REFERENCIAS:

- [1] AHLUWALIA, A. et al. Managing blowout risk using a dynamic barrier approach. In: SPE International Conference and Exhibition on Health, Safety, Security, Environment, and Social Responsibility. Society of Petroleum Engineers, 2016.
- [2] AFFLECK, M. et al. Background to the Development of a Remote Controlled Drilling Blowout Preventer (BOP) Activation Technology for Surface BOP Applications. In: SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2016.
- [3] AQLAN, F.; LAM, S. S. A fuzzy-based integrated framework for supply chain risk assessment. International Journal of Production Economics, v. 161, p. 54-63, 2015.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade, 1994.
- [5] BELLAMY, L. J. Exploring the relationship between major hazard , fatal and non-fatal accidents through outcomes and causes. SAFETY SCIENCE, 2014.
- [6] CHIPINDU, Njalo Sócrates Chipongue. Pós-análise de Problemas de Perfuração de Poços Marítimos de Desenvolvimento. 2010. 125 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- [7] COCKSHOT, J. E.; BOW-TIE, P.; PLANT, L. G. Probability Bow-Ties: A Transparent Risk Management Tool. July, 2005.

- [8] DA SILVA Mario Mardone. Visualização do Risco como Meio de Suporte à Tomada de Decisão: Uma Abordagem através da Análise de ferramentas de Gerenciamento de Risco. 2016. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade Federal de Pernambuco, Caruaru.
- [9] DENNEY, D. et al. Software-Based Deepwater-Blowout-Preventer Testing. *Journal of Petroleum Technology*, v. 64, n. 04, p. 89-91, 2012.
- [10] FERNANDES Elton; ARAÚJO S.B Renato. As mudanças no upstream da indústria do petróleo no Brasil e tendências no posicionamento das operadoras do setor. In: Encontro Nac. de Eng. De Produção, XXIII, 2003. Ouro Preto. Anais... Ouro Preto – MG, 2003. p.2.
- [11] FRASER, D.; BRAUN, J.; ARGONNE, M. C.; MARPLE, B.; MOORE, D. D. Operational Risk : Stepping Beyond Bow-Ties. Society of Petroleum Engineers, 2015.
- [12] GRAYSON, B.; GANS, A. H. Closed Loop Circulating Systems Enhance Well Control and Efficiency With Precise Wellbore Monitoring and Management Capabilities. SPE/IADC 156893. Society of Petroleum Engineers, 2012.
- [13] HENG, A.; ZHANG, S.; TAN, A. C.; MATHEW, J. (2009). Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities. *Mechanical systems and signal processing*, 2009, p. 724-739.
- [14] HOLAND, Per. Offshore Blowouts: Causes and Control.1st Edition. Gulf Professional Publishing, 1997. 176p.
- [15] HUSE, J. R.; ALME, I. A. BOP Reliability monitored Real Time. In: European HSE Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2013.
- [16] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 13372: Condition monitoring and diagnostics of machines — Vocabulary. 2004.
- [17] JACINTO, C.; SILVA, C. A semi-quantitative assessment of occupational risks using bow-tie representation. *Safety Science*, v. 48, n. 8, p. 973–979, 2010.
- [18] JARDINE, A. K. S.; LIN, D.; BANJEVIC, D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical systems and signal processing*, v. 20, n. 7, p. 1483-1510, 2006.
- [19] KAPLAN, D. Guest Editorial: Risk Management at NASA and Its Applicability to the Oil and Gas Industry. *Journal of Petroleum Technology*, v. 68, p. 14–15, 2016.
- [20] MARKOWSKI, A. S.; KOTYNIA, A. “Bow-tie” model in layer of protection analysis. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 89, n. 4, p. 205-213, 2011.
- [21] MARIANO, Jacqueline Barboza. Proposta de Metodologia de Avaliação Integrada de Riscos e Impactos Ambientais para Estudos de Avaliação Ambiental Estratégica do Setor de Petróleo e Gás Natural em Áreas Offshore. 2007. 571 f. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético) - Planejamento Energético - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [22] MARTINS, B. F. et al. Applying CBM and PHM concepts with reliability approach for Blowout Preventer (BOP): a literature review. *Brazilian Journal Operations & Production Management*, v.15, n.1, p.81, 2018.
- [23] MATOS, J. H. F., Análise de riscos para a ocorrência de blowouts no processo de perfuração de poços de petróleo offshore - Projeto de Final de curso - ICT - UFF 2017.
- [24] MCKAY, J. E. et al. Blowout Preventer (BOP) Health Monitoring. In: IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2012.
- [25] MIURA, K. Um Estudo sobre a Segurança Operacional na Construção e Reparo de Poços Marítimos de Petróleo, 2004.
- [26] MOKHTARI, K. et al. Application of a generic bow-tie based risk analysis framework on risk management of sea ports and offshore terminals. *Journal of Hazardous Materials*, v. 192, n. 2, p. 465–475, 2011.
- [27] MUTLU, M. et al. Qualitative Fault Tree Analysis of Blowout Preventer Control System for Real Time Availability Monitoring. In: Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference, 2017.

- [28] NARAYAN, V, The raison d'être of maintenance, Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 4, 1998, pp.38-50.
- [29] NELSON, W. R. Advanced Decision Support for Deepwater Offshore Drilling Incorporating Insights from Nuclear Power and Aerospace. SPE Intelligent Energy International Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2016.
- [30] NELSON, W. R. et al. Improving Safety of Deepwater Drilling Through Advanced Instrumentation, Diagnostics, and Automation for BOP Control Systems. In: Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference, 2016.
- [31] NOVIA, M. D.; FERNANDES, M. D. Barriers, Collaboration and Well Control - A Service Contractor's Response. Society of Petroleum Engineers, 2016.
- [32] PALTRINIERI, N. et al. Dynamic Procedure for Atypical Scenarios Identification (DyPASI): A new systematic HAZID tool. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v. 26, n. 4, p. 683-695, 2013.
- [33] PENG, Y.; DONG, M.; ZUO, M. J.. Current status of machine prognostics in condition-based maintenance: a review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 50, n. 1-4, p. 297-313, 2010.
- [34] PITBLADO, R. North Sea and GoM Initiatives to Enhance Process Safety. Offshore Technology Conference, 2015.
- [35] PITBLADO, R.; WEIJAND, P. Barrier Diagram (Bow Tie) Quality Issues for Operating Managers. v. 33, n. 4, 2014.
- [36] SÆTRE, Øyvind. Reliability assessment of subsea BOP control systems. 2015.
- [37] SATTLER, J. P. BOP Performance Post – Macondo – How are you doing ?. SPE 166869, n. October, p.3, 2013.
- [38] SAUD, Y. E.; ISRANI, K.; GODDARD, J. Bow-tie diagrams in downstream hazard identification and risk assessment. Process Safety Progress, v. 33, n. 1, p. 26-35, 2014.
- [39] SHAHRIAR, A.; SADIQ, R.; TESFAMARIAM, Risk analysis for oil & gas pipelines : A sustainability assessment approach using fuzzy based bow-tie analysis. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v. 25, n. 3, p. 505-523, 2011.
- [40] SMITH, D. J. Reliability, maintainability and risk: practical methods for engineers. Butterworth-Heinemann, 2001.
- [41] SOLVANG, E. et al. Risk management: cost minimization using condition-based maintenance. In: Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions. CIRED. 16th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ No. 482). IET, 2001. p. 6 pp. vol. 3.
- [42] TABIBZADEH, M.; MOKHTARI, M. An Integrated System-Oriented Methodology for the Risk Analysis of Offshore Oil and Gas Drilling Industry: AcciMap and Bow-Tie United. In: SPE Western Regional Meeting. Society of Petroleum Engineers, 2018.
- [43] TURNER, A. et al. Fiber Optic Sensor Based Monitoring System for Blowout Preventer. In: Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference, 2015.
- [44] 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.
- [45] VANDENBUSSCHE, V. et al. Well-specific blowout risk assessment. In: International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production. Society of Petroleum Engineers, 2012.
- [46] WASSAR, T.; MUTLU, M.; FRANCHEK, M. A.; GUTIERREZ, J. A. Leakage Monitoring of Subsea Blowout Preventer Control System. Leakage Monitoring of Subsea Blowout Preventer Control System. Offshore Technology Conference, 2018.
- [47] WHOOLEY, A.; DEEGAN, J.; GOLDSMITH, R. G.; BOTTO, A. Tools and Techniques for the Selection and Design of Safe Deepwater Riser Systems for Mobile Offshore Drilling Units. Offshore Technology Conference, 2011.

- [48] WINKLER, M.; JAHRE-NILSEN, C.; BLAAUW, R.; DYVE-JONES, R. Arctic Oil Spill Prevention and Response: Working Collaboratively to Improve and Extend Safe Practice. Offshore Technology Conference-25485-MS, Arctic Technology Conference, 2015.
- [49] WYLIE, R. et al. Instrumented Internal Blowout Preventer Improves Measurements for Drilling and Equipment Optimization. In: SPE/IADC Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers, 2013.
- [50] XIAO-SHENG, S. I. et al. Remaining useful life estimation—a review on the statistical data driven approaches. European journal of operational research, v. 213, n. 1, p. 1-14, 2011.
- [51] YANG, Y. Risk management of Taiwan ' s maritime supply chain security. Safety Science, v. 49, n. 3, p. 382–393, 2011.
- [52] ZHI-YONG, L.; LI-QING, R; XI-SHENG, J. Study on risk management in CBM project. In: Conference Anthology, IEEE. IEEE, 2013. p. 1-4.
- [53] ZOU, T.; HOLMES, J; SHAH, V. BOP System Reliability Planning and Testing. Offshore Technology Conference, 2016.