

A visão proativa da manutenção em sistema de exploração de petróleo

RESUMO

Em virtude da crise no setor petrolífero, é imprescindível gerenciar corretamente as manutenções com ferramentas e métodos eficientes. Por esse motivo, este Trabalho de Conclusão de Curso tem foco na aplicação da análise da criticidade nos componentes do Sistema de Perfuração de certo navio plataforma de petróleo, na sequência, na Análise dos Modos de Falhas, Efeitos e Criticidade (FMECA) e, por último, nas avaliações quali-quantitativas por Árvore de Falhas (FTA). Contou-se com a contribuição de um especialista supervisor de manutenção do navio plataforma nas aplicações do método de comparação por pares, que usam a teoria *Fuzzy* como fundo, para determinação do componente e o modo de falha mais críticos. Por meio da análise da criticidade do sistema de Perfuração chegou-se ao componente crítico “Top Drive”, que apresentou maior grau de pertinência. Na sequência, aplicou-se o método FMECA simplificado, tratando-se das funções principais, modos de falha e referidas causas, somente para o componente Top Drive. Foram mapeados vinte e oito modos de falha, considerando-se que “Válvula IBOP não fecha ao ser acionado seu comando” apresentou maior grau de pertinência. O referido modo de falha mais crítico foi utilizado como Evento Topo na aplicação da FTA, onde identificaram-se os eventos intermediários, causas básicas e portas lógicas OU. A FTA resultou na análise de dezessete causas básicas. A avaliação quali-quantitativa apontou que o evento topo tem 68% de probabilidade de ocorrência da falha e que todas as causas mapeadas são consideradas críticas, ou seja, para que o evento topo possa acontecer.

PALAVRAS-CHAVE: Navio-Sonda. Criticidade. FMECA. FTA.

Marcelo Prado Sucena

marcelosucena@gmail.com

Instituto Militar de Engenharia (IME),
Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Bárbara Moraes Marcondes

barbara_marconde@yahoo.com.br

Universidade Estácio de Sá (ESTÁCIO),
Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Tatiane Barbosa Lima Couto

taty_lima18@hotmail.com

Universidade Estácio de Sá (ESTÁCIO),
Rio de Janeiro, RJ, Brasil

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O petróleo, líquido oleoso e inflamável com densidade menor que a da água, vem do latim *petroleum*, de *petrus* (pedra) e *oleum* (óleo) (BRANCO, 2014). Ele é uma mistura de compostos orgânicos, principalmente hidrocarbonetos, podendo variar em relação a cor do incolor ao marrom ou preto, passando pelo verde e marrom-claro.

O petróleo é formado pelo acúmulo de material orgânico, sob circunstâncias específicas de isolamento e pressão nas camadas inferiores de bacias sedimentares, sofrendo mudanças durante milhares de anos. Para localizar um reservatório de petróleo deve haver algum tipo de rocha porosa, coberta por rocha seladora, que impede que o óleo escape para a superfície.

Atualmente ele é a principal fonte de energia brasileira, mostrando sua importância para geração de energia pela sua queima em caldeiras, turbinas e motores de combustão interna (CCEE, 2019).

Uma plataforma de petróleo, que é uma unidade flutuante, a qual Thomas (2001, p. 112) menciona que podem ser semissubmersíveis ou tipo navio-plataforma [...], hoje são projetados especialmente para a perfuração. Elas possuem peculiaridades quanto à segurança, tal como alta pressão devido à perfuração de poços em grandes profundidades, contaminação ou intoxicação por gases, além de riscos físicos, químicos e biológicos. Devido à localização distante da costa, um fator que agrava ainda mais a segurança é a dificuldade de evacuação, principalmente em condições meteorológicas adversas. (DUPONT, 2019).

Embora se reconheça a sua utilidade, o uso e a exploração do petróleo podem provocar muitas catástrofes ambientais, principalmente em caso de vazamento, oriundo de falhas estruturais dos equipamentos, humanas, nas manobras, e devido à pressão exercida no fundo do oceano, causando fissuras ou falhas no assoalho (ALONSO, 2019).

Em um navio-plataforma, por se envolver o uso de componentes e operações que demandam altos investimentos, alto risco de acidentes, e que a paralização parcial ou total dos seus componentes podem afetar diretamente o desempenho produtivo da empresa, vislumbra-se a importância de análise proativa, permitindo-se antecipar certas falhas.

Além da atuação proativa é fundamental que se possa decidir onde e quando os recursos limitados (tempo, pessoas, dinheiro etc.) de manutenção devam ser utilizados, direcionando-se para os elementos mais críticos, mantendo-se ou melhorando-se a confiabilidade do todo.

Assim, enquadram-se os usos da Análise da Criticidade, FMECA e FTA, em um procedimento único, visando a melhoria holística do desempenho da empresa em estudo, focando-se a atuação proativa da manutenção.

A Análise da Criticidade pode determinar quais os componentes têm o maior impacto potencial sobre o atingimento das metas de negócios, possibilitando definir prioridades na manutenção, o que redundará na otimização dos recursos disponíveis.

A aplicação do método FMECA promove a diminuição da probabilidade de falhas nos processos, fornecendo dados importantes à utilidade

função/manutenção, podendo assim aumentar a qualidade, confiabilidade, segurança, reduzindo custos no processo produtivo (CYRINO, 2017).

O método FTA pode agregar ao planejamento da manutenção da empresa, possibilitando analisar a relação lógica entre falhas primárias e a produção do produto/serviço, bem como analisar individualmente uma falha específica. (TAHARA, 2008)

Neste contexto, este trabalho objetiva desenvolver um procedimento genérico para análise proativa de componentes de certo sistema. Pretende-se aplicar tal procedimento em um sistema de perfuração de um navio-plataforma, viabilizando exemplificar e validá-lo.

Tal procedimento será estruturado pela análise da criticidade, para se identificar os componentes mais críticos do sistema; para na sequência poder-se aplicar o método FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis* - Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidade), principalmente, para indicar os modos de falhas críticos; e por fim, implementar o método FTA (*Fault Tree Analysis* - Análise de Árvore de Falhas) que proporcionará relacionar as causas básicas de falhas com certo modo de falha.

METODOLOGIA

Tomando como base o objetivo deste trabalho, considera-se como pesquisa explicativa, uma vez que relaciona causas e efeitos de falhas em elementos de certo navio-plataforma.

Do ponto de vista da natureza da pesquisa, trata-se de pesquisa aplicada, considerando o objetivo de utilizar técnicas para a melhoria do sistema de manutenção da empresa em estudo.

Quanto aos procedimentos, este trabalho é tratado como estudo de caso, pois há aplicação detalhada e direta de conhecimento de navio-plataforma, coletando-se e analisando os dados operacionais pela ótica de certo especialista de manutenção de navios-plataforma.

No tocante à forma de abordagem do problema, esta pesquisa é qualitativa e quantitativa. A abordagem qualitativa é focada em entrevistas com especialista, objetivando coletar dados indutivamente. Na abordagem quantitativa, os dados obtidos na entrevista serão transformados em índices de risco pelo método de comparação par a par, técnica focada nos princípios da Teoria Fuzzy, incorporada à Inteligência Artificial.

Visando se atingir o objetivo proposto tomar-se-ão as seguintes tarefas sequenciais:

- Identificar os subsistemas e elementos que compõem o sistema de perfuração do navio-plataforma;
- Desenvolver diagrama físico-funcional que relacione os subsistemas e seus elementos componentes;
- Determinar um índice de risco, pela aplicação do método de comparação par a par, que permitirá calcular a criticidade dos elementos;
- Determinar o elemento crítico pelo maior valor do índice de risco;

- Aplicar o método FMECA no elemento crítico, pelas suas análises funcionais e dos modos de falhas. Nos últimos, pela nova aplicação do método par a par, se determinará o modo de falha mais crítico;

- O modo de falha mais crítico será a base para desenvolvimento do método FTA, partindo-se do evento topo, se determinando os fatores contribuintes para que ele aconteça, além das suas falhas básicas. O relacionamento entre esses elementos se dará pelo uso de portas lógicas;

- Diante da FTA será possível desenvolver as análises quantitativa e qualitativa.

REFERENCIAL TEÓRICO

RISCO EM PLATAFORMAS DE PETRÓLEO

Em 1892, inicia-se a prática de perfuração de petróleo no Brasil, em Bofete, no município do interior do estado de São Paulo, encontrando-se, apenas, água sulfurosa. Algumas perfurações de poços de petróleo ocorreram na década de 1930 e fizeram com que o governo realizasse prospecções com o intuito de achar novos campos. Em 1953, o presidente da república Getúlio Vargas, assinou a Lei Nº 2004 e criou a “Petróleo Brasileiro S.A.”, popularmente conhecida como Petrobrás, que deteve o monopólio da atividade petrolífera durante décadas (FRANCISCO, 2011).

Já no exterior, em 1896, na cidade Titusville, localizada no estado norte-americano da Pensilvânia, a indústria petrolífera moderna teve seu início. A empresa *Seneca Oil Company* contratou Edwin L. Drake para uma investigação a respeito da suspeita de petróleo na cidade e, ao cavar um poço, encontraram petróleo, responsável pela primeira extração em larga escala. (WDL, 2017)

Em 1968 ocorreu a primeira descoberta de petróleo no mar brasileiro, em Sergipe, a 80 metros de profundidade, no Campo de Guaricema. As primeiras tecnologias voltadas para os poços marítimos foram testadas e o êxito do projeto aconteceu devido à construção da plataforma P-1 (Figura 4), primeira plataforma de perfuração de petróleo construída no Brasil. (PETROBRAS, 2013)

Elaboradas pelo Ministério do Trabalho, as Normas Regulamentadoras (NR) são premissas complementares ao capítulo V da CLT, consistindo direitos, deveres e obrigações, a serem cumpridos pelos empregadores e empregados, em busca da segurança, saúde e prevenção de acidentes de trabalho.

Para ratificar o alto nível de risco em operações de plataformas de petróleo cita-se o Quadro I da Norma Regulamentadora 4 – NR-4 (Serviços Especializados em Engenharia de Segurança e em Medicina do Trabalho), onde se atribui um Grau de Risco (valor numérico variável de 1 a 4) referente à intensidade do risco de certa atividade econômica (Classificação Nacional de Atividades Econômicas – CNAE). A atividade de extração de petróleo e gás natural enquadra-se no grau de risco 4, o máximo da escala da NR-4. (IBGE, 2016)

A Norma Regulamentadora NR-30 (Segurança e Saúde no Trabalho Aquaviário), Anexo II (Plataformas e Instalações de Apoio), estabelece os requisitos mínimos de segurança e saúde no trabalho a bordo de plataformas. Há

diversos itens relevantes para a manutenção, sendo um deles o item 15.10.1 que cita a necessidade de serem elaborados planos e procedimentos para inspeção, teste e manutenção de equipamentos, visando à proteção dos colaboradores e manutenibilidade da integridade dos sistemas de proteção contra incêndios e dos sistemas e equipamentos que contenham hidrocarbonetos líquidos ou gasosos. (MTE, 2015)

O item 16.4 (Inspeção e Manutenção) da NR-30, segundo mencionado por Queiroz (2016, p. 36), “estabelece um conjunto de diretrizes que devem ser plenamente implementadas na estratégia de manutenção.”

Com o intuito de proteger a vida humana e o meio ambiente, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), publicou o Regulamento técnico do Sistema de Gerenciamento da Segurança Operacional (SGSO) das Instalações Marítimas de perfuração e produção de petróleo e gás natural. Ele define as responsabilidades dos concessionários e as atribuições da ANP. As 17 práticas do SGSO, relativas à liderança, pessoal e gestão, instalações e tecnologia e práticas operacionais, são parte do sistema de gestão do operador da instalação. (QUEIROZ, 2016)

A prática de gestão nº 13 (Integridade Mecânica) SGSO tem foco na área de manutenção. Seu objetivo é descrever os requisitos para que a instalação, seus sistemas, estruturas e equipamentos, passem por inspeções, testes e manutenções planejados e controlados em busca da integridade mecânica. Além disso, todos os equipamentos e sistemas críticos de segurança operacional devem estar cobertos por planos de inspeção, teste e manutenção. Esta prática possui vínculo com a prática nº 11 (Elementos Críticos de Segurança Operacional). (QUEIROZ, 2016)

ANÁLISE DE CRITICIDADE

Segundo Siqueira (2009), conforme citado por Baran & Trojan (2015), não há uma seleção satisfatória dos parâmetros que afetam a criticidade dos equipamentos na maioria das plantas industriais. Para determinar a criticidade de um equipamento deverão ser considerados alguns critérios, além do embasamento na experiência de gestores e técnicos em manutenção, deve-se contemplar de forma global os critérios de manutenção, segurança e meio ambiente, econômicos e/ou financeiros, produção e qualidade.

De acordo com Sucena (2017), fatores como: modos de falhas de um sistema, efeitos potenciais no seu desempenho, segurança e probabilidade da ocorrência, além da severidade desse efeito, devem ser considerados para a correta elaboração da análise de criticidade do componente crítico do sistema em estudo.

Ainda para Sucena (2017), o adequado fluxo para aplicar esse tipo de procedimento deve levar em consideração os seguintes itens:

- a) Ter conhecimento do sistema;
- b) Decompor o sistema;
- c) Elaboração hierarquizada;

- d) Determinar os pesos referentes à severidade e às probabilidades de ocorrência e detectar as falhas dos componentes inferiores representados no diagrama;
- e) Calcular os IR que são correspondentes;
- f) Alocação do IR máximo ao nível superior correspondente;
- g) Identificar subsistema crítico;
- h) Identificar os componentes críticos do subsistema crítico que auxiliará a alocação de recursos financeiros;
- i) Reavaliar os determinados pesos após sua alocação referente aos recursos financeiros.

FMECA

Segundo Henrique e Fiorino (2013) o método FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis* - Análise de Modos de Falhas e Efeitos) surgiu por volta de 1949 e foi destinado para a análise de sistemas e equipamentos do exército americano. A eficiência era avaliada baseando-se no impacto de alguma missão ou no sucesso de defesa de cada soldado diante da guerra.

O FMEA é utilizado para prevenir falhas e investigar os riscos de um processo ou produto, identificando suas causas e efeitos para determinar as melhores intervenções, visando inibir as falhas.

Sucena (2019) destaca as vantagens para o desenvolvimento da FMEA como:

- Proporcionar uma visão mais regrada;
- Proporcionar a otimização das atividades das equipes de manutenção;
- O aperfeiçoamento dos Recursos Humanos;
- Melhoria na percepção dos riscos;
- Custeia a alocação de recursos;
- Reduz custos de produção e de manutenção;
- Implanta uma melhoria contínua.

Martins (2013) indica os passos para fazer uma análise FMEA, que são:

- Descrever o produto ou processo;
- Definir as funções do produto ou processo;
- Identificar os potenciais modos de falha;
- Descrever os efeitos das falhas;
- Determinar as causas das falhas;
- Identificar os atuais modos de detecção;
- Calcular o risco;
- Criar plano de ação;

- Validar resultados do plano de ação.

A *Ford Motor Company*, no final da década de 1970, introduziu FMEA na indústria automotiva em busca do aprimoramento da produção, segurança, design e *compliance*, utilizando o grau de prioridade de risco (*Risk Priority Number*) - (RPN) para avaliar o risco da falha, priorizando-as de acordo com a gravidade de suas consequências para evitar futuras falhas. Desta forma desenvolveu-se o método FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*).

Lipol e Haq (2011) mencionam os benefícios com a realização do FMECA: contribuem para a melhoria dos designs, produtos e processos, na redução de custos, na satisfação do consumidor e no desenvolvimento de planos, não só de manutenção, como também de controle, requisitos, confiabilidade e análise de crescimento.

No FMECA as prioridades de risco dos modos de falha são determinadas pelo produto da ocorrência (O), severidade (S) e detecção (D) de uma falha. A ação esperada é prevenir ou reduzir a gravidade ou probabilidade de ocorrência das falhas. (SHARMA, SRIVASTAVA, 2018)

ÁRVORE DE FALHAS

Conforme citado por Schmitt (2013, p. 17), segundo Borba Prá (2010), o Método para Análise da Árvore de Falhas (*Fault Tree Analysis* - FTA) utiliza símbolos que permitem analisar sistemas simples e complexos.

Consiste em uma forma lógica e dedutiva que inicia com o evento topo (evento indesejado) em busca de suas possíveis causas. (SUCENA, 2019)

Para Sucena (2019) as vantagens de se usar a FTA são:

- Melhorar a confiabilidade de produtos e de processos;
- Aumentar o domínio das características técnicas dos equipamentos de um sistema e identificar a sequência das falhas críticas;
- Aplica-se a projetos ou sistemas já em operação;
- Pode ser utilizada para avaliação qualitativa;
- Pode ser desenvolvida em diferentes níveis de complexidade;
- É de interpretação simples.

De acordo com Stamatelatos (2002), as etapas para a realização de uma FTA são as seguintes:

- Identificar o objetivo do FTA;
- Definir o evento principal;
- Definir o escopo;
- Definir a resolução do FTA;
- Definir as regras básicas para o FTA;
- Construir a árvore;
- Avaliar a árvore;

- Interpretar e apresentar os resultados.

A árvore de falhas não é uma forma para identificar todas as possíveis falhas e causas de um sistema. Ela é adaptada ao seu evento principal (evento topo), que corresponde a algum modo particular de falha do sistema cujas contribuintes para esse evento principal são incluídas na árvore de falhas. (STAMATELATOS, 2002)

MÉTODO PASSO A PASSO

Quando se registra a frase “o elemento é crítico” reflete-se a opinião de alguém diante de um determinado cenário, analisado sob uma visão técnica. Porém, tal frase é considerada imprecisa, necessitando de representação deste conhecimento humano e o qualificar de uma forma científica. (adaptado de SUCENA, 2019)

É neste contexto que se insere a Teoria Fuzzy que, em 1965, por intermédio do matemático azerbaijanês *Lofti Zadeh*, se originou. Ele identificou a necessidade de uma ferramenta capaz de reproduzir a imprecisão do pensamento humano, pois as teorias tradicionais somente suportavam soluções rígidas dos modelos clássicos. Então, Zadeh desenvolveu a Teoria de conjuntos *Fuzzy* em 1965.

Grecco *et al.* (2015) citam que um conjunto *Fuzzy* pode ser representado por um conjunto de pares ordenados, em que o primeiro elemento é $x \in X$, onde X é tratado como o universo de discurso; e o segundo, $\mu_A(x)$, é o grau de pertinência associado à uma função de pertinência de x em A , que mapeia x para o espaço de pertinência M . Quando M contém apenas os pontos 0 ou 1, A é não *Fuzzy*, ou seja, *Crisp*. Quando M contém valores no intervalo entre 0 e 1 A é *Fuzzy*, tendo-se que $A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}$.

Devido ao desenvolvimento e as diversas possibilidades práticas dos sistemas *Fuzzy*, com grande êxito comercial de suas aplicações, a lógica *Fuzzy* hoje é classificada como técnica padrão e tem extensa aceitação na área de controle de processos industriais. (ABAR, CELINA, 2004)

Uma técnica para apoio de decisão baseada na Teoria *Fuzzy* desenvolvida por Li e Yen (1995), é o método para comparação par a par, que é usado para avaliar preferências entre elementos, em pares, conforme descrição das etapas a seguir:

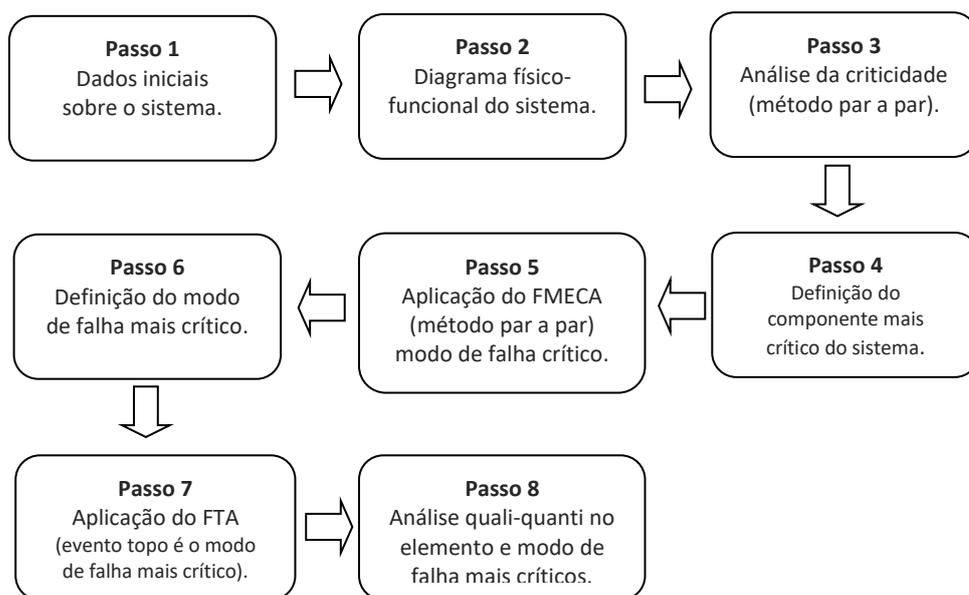
- a) Escolher as opções para comparar;
- b) Comparar em pares, todas as opções escolhidas, contabilizando-se os totais;
- c) Determinar o grau de pertinência de cada opção utilizando a expressão: $\mu(\text{elemento}) = \frac{\sum \text{elemento}}{0,5 nq (q - 1)}$, onde n é a quantidade de entrevistados e q , a quantidade de opções comparadas;
- d) A opção com o maior grau de pertinência é considerada a melhor escolha, segundo a visão dos n entrevistados.

PROCEDIMENTOS

Tal como proposto no objetivo deste trabalho, pretende-se desenvolver um procedimento genérico para análise proativa de componentes de sistemas, calcando-se na análise da criticidade, FMECA e FTA.

Desta forma, a Figura 1 adiante descreve os passos do procedimento, tendo o detalhamento de cada um na sequência.

Figura 1 – Passos do procedimento Genérico



Fonte: Autoria própria (2019)

Como se pode observar, o procedimento é composto por oito passos que estão detalhados a seguir:

Passo 1 - Dados iniciais sobre o sistema - neste item deve-se descrever com o máximo de detalhamento o sistema e seus componentes. Tal descrição balizará o entendimento que servirá de base para estruturação do diagrama físico-funcional;

Passo 2 - Diagrama físico-funcional - este diagrama permite vincular o sistema com seus componentes por intermédio dos subsistemas. Esta figura é fundamental para se identificar as ligações físicas e quanto às funções, insumo para iniciar a aplicação do FMECA;

Passo 3 - Análise da criticidade - como geralmente um sistema é composto por inúmeros subsistemas e componentes, além dos recursos temporais e de recursos humanos para analisar o sistema como um todo serem reduzidos, deve-se priorizar a análise proativa. Assim, a Análise da Criticidade pode ser empregada para criar lista de componentes que devem ser priorizados em detrimentos de outros, otimizando os recursos disponíveis para análise. Será utilizado o método par a par, que se baseia na Teoria *Fuzzy*, inserida no conjunto de técnicas da Inteligência Artificial. Por este método é possível capturar o

conhecimento de especialista de forma mais abrangente, pois é possível comparar componente a componente, segundo os conceitos do analista;

Passo 4 - Definição do elemento mais crítico do sistema - no passo 3 será possível gerar uma lista hierarquizada de todos os componentes do último nível do diagrama físico-funcional. Tai lista, quando ordenada em ordem inversa de valores, permitirá identificar o componente mais crítico do sistema. Este componente é usado no próximo passo para análise calcada no FMECA;

Passo 5 - Aplicação do FMECA - neste passo será analisado o elemento mais crítico obtido no passo anterior, listando-se a sua função principal, quanto aos seus componentes, os modos de falhas e as causas básicas. Os dois últimos itens serão utilizados na elaboração da FTA, carecendo da determinação do evento topo, que é considerado o modo de falha mais crítico. Para tanto, é utilizado, novamente, o método par a par.

Passo 6 - Definição do modo de falha mais crítico do elemento crítico - para o desenvolvimento da FTA faz-se necessária a identificação do evento topo, por ser uma técnica *top-down*;

Passo 7 - Aplicação da FTA - o evento topo é a base para a aplicação. A partir dele utilizam-se eventos intermediários que serão intermediários entre as causas básicas e as portas lógicas. Com a árvore estruturada é possível desenvolverem as análises;

Passo 8 - Análise quali-quanti - a análise qualitativa será desenvolvida baseando-se no Diagrama de Cortes Mínimos, que permite identificar os pontos nevrálgicos do modo de falha mais crítico do componente crítico. A análise quantitativa utilizou-se a Álgebra Booleana que trata as taxas de falhas relacionadas as causas das falhas.

ESTUDO DE CASO

Segundo-se os passos da metodologia proposta no subitem anterior, será desenvolvido o estudo do sistema de perfuração de navio-plataforma, que é indispensável para o desenvolvimento da exploração de óleo e gás.

Optou-se pelo sistema de perfuração como objeto deste estudo de caso, pois não há extração de óleo se não houver perfuração. Esta etapa é crucial para se alcançarem os reservatórios de óleo e gás.

Desta forma, no item seguinte se detalhará melhor o sistema de perfuração, permitindo-se chegar aos seus subsistemas e componentes.

PASSO 1 – O SISTEMA DE PERFURAÇÃO DE NAVIO-PLATAFORMA

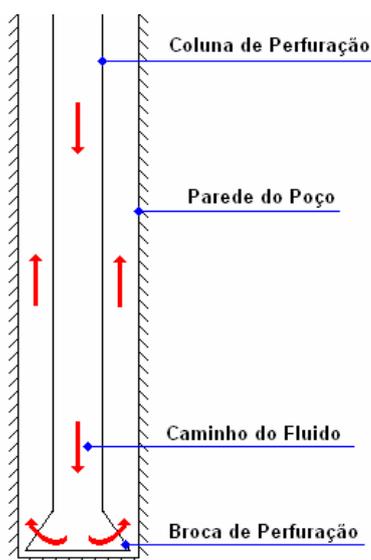
Para se perfurar um poço utiliza-se o método rotativo (Figura 2). Este método viabiliza atingir grandes profundidades, tornando a exploração do petróleo muito mais ampla e completamente viável (ROSENBLATT, 2006).

Segundo Mello (2014) citado por Mathias (2016, p. 5), “a perfuração pelo método rotativo se dá pela transmissão de rotação para a broca e também pela aplicação de peso sobre a mesma.” Isso faz com que a broca consiga triturar a rocha e perfurar um poço. Os cascalhos gerados são retirados do poço e levados

para a superfície por meio do fluido de perfuração, que é bombeado e circulado dentro da coluna, passando pelas peneiras e retornando aos tanques de lama.

Pelo uso do método rotativo podem-se alcançar os reservatórios de petróleo a serem explorados. Este método é composto por um dos principais equipamentos da perfuração, o *Top Drive*, que permite que a coluna seja manobrada com movimento de rotação.

Figura 2 – Método Rotativo



Fonte: Autor desconhecido (2012)

O *Top Drive* é um equipamento de alta tecnologia, que integra mecânica, hidráulica e elétrica, que pode ser manipulado em qualquer altura da torre permitindo descer seções de tubulares ao invés de descê-los individualmente, girar tubo de perfuração, circular a lama.

Os demais equipamentos do piso de perfuração possuem redundância ou são de fácil manutenção, já o *top drive* é um equipamento crítico e sua parada poderá gerar *downtime* não planejado, acarretando prejuízos financeiros.

Existem quatro subsistemas vinculados ao *Top Drive*, que são: circulação, rotação, içamento de cargas e manuseio de tubos. Estes subsistemas podem ser entendidos como:

- a) Circulação: é composto por equipamentos que permitem a circulação e o tratamento do fluido de perfuração;
- b) Rotação: é composto por um conjunto que desliza em trilhos fixados à torre. A rotação é transmitida diretamente no topo da coluna de perfuração por um motor acoplado à catarina em que o torque é absorvido, devido à rotação da coluna;

- c) Içamento de cargas: permite içar ou abaixar colunas de perfuração e de revestimento ou quaisquer outros equipamentos para dentro ou fora do poço;
- d) Manuseio de tubos: transfere um tubo de uma posição de armazenamento horizontal em um convés para uma posição inclinada e vice-versa. Também compreende um sistema guia para engatar, controlar e deslocar tubos para o centro e do centro do poço;

Cada subsistema tem componentes, que são descritos como:

a) Circulação:

Tanques de lama: feitos de chapas de aço, armazenam a lama na superfície. São interligados entre si por tubulações e conectados aos equipamentos do sistema de tratamento;

Peneiras de lama: processam a separação dos cascalhos. São equipadas com telas adequadas ao tipo de rocha perfurada. Com o movimento vibratório os cascalhos passam pela tela inclinada até um defletor que os descarta. Os sólidos que passam através das telas são removidos por decantação no tanque de lama do sistema;

Bombas de lama: responsáveis pelo fornecimento de energia ao fluido de perfuração para a circulação no sistema.

b) Rotação:

Top Drive: equipamento utilizado para perfuração de poços com capacidade de sustentação de 1250 toneladas. Possui a principal função de rotacionar a coluna, realizando a movimentação de tubos e injeção de fluido de perfuração para o poço.

c) Içamento de Cargas:

Drawworks: tem a função de movimentar o sistema de perfuração (catarina + *top drive*), incluindo a coluna de perfuração, *risers* ou revestimentos;

Catarina: conjunto de polias móveis, justapostas por um pino central. Movimenta-se ao longo da torre de perfuração pela movimentação dos cabos e em sua parte inferior é preso o *Top Drive*.

d) Manuseio de tubos:

Hydraracker: é um sistema que opera com o manuseio de tubos e seções entre a armação (*fingerboard*), o centro do poço e o *catwalk* da plataforma. Possui três braços, sendo um para fins de aperto e dois para guia;

Hydratong: tem a função de conectar e desconectar *drill pipes* e *drill collars* (3 ½" - 9 ¾") e conectar e desconectar revestimentos até 25";

Pipe catwalk: é um equipamento com sistema de carcaça de manipulação de tubos e outros equipamentos do *pipe deck*

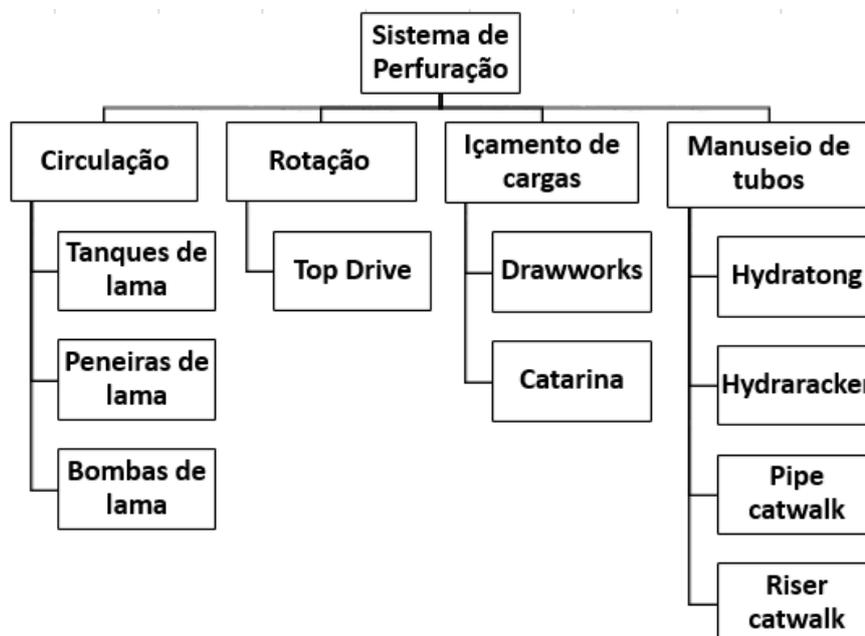
para o piso de perfuração. Ele permite o manuseio seguro e sem as mãos e é operado por meio de controle remoto;

Riser catwalk: é projetado para transportar risers, revestimentos e vários equipamentos de/para a plataforma de perfuração. Ele permite o manuseio seguro e sem as mãos e também é operado por meio de controle remoto.

PASSO 2 – DIAGRAMA FÍSICO-FUNCIONAL

Desta forma, o sistema de perfuração pode ser estruturado pelo diagrama físico-funcional exposto na Figura 3 adiante.

Figura 3 – Diagrama físico-funcional do Sistema de Perfuração



Fonte: Constellation S.A (2019)

PASSO 3 E 4 – ANÁLISE DA CRITICIDADE E DEFINIÇÃO DO COMPONENTE CRÍTICO DIAGRAMA FÍSICO-FUNCIONAL

Uma vez identificados os componentes do sistema de perfuração devem-se identificar o mais crítico, tomando-se aqueles que estão no último nível do diagrama da figura 3.

Para aplicação do método par a par realizou-se entrevista com o especialista, engenheiro de manutenção do navio-plataforma, a fim de determinar um Índice de Risco. Para tanto seguiram-se as seguintes etapas:

Etapa 1: relacionar os componentes em linhas e colunas em uma tabela (Tabela 1). Tais componentes referem-se ao de último nível apresentados na Figura 3.

Tabela 1 – Componentes de último nível para comparação par a par

Elementos	Bombas de lama	Tanques de lama	Peneiras de lama	Top Drive	Drawworks	Catarina	Hydratong	Hydraracker	Pipe catwalk	Riser catwalk
Bombas de lama	——									
Tanques de lama		——								
Peneiras de lama			——							
Top Drive				——						
Drawworks					——					
Catarina						——				
Hydratong							——			
Hydraracker								——		
Pipe catwalk									——	
Riser catwalk										——

Fonte: Autoria própria (2019)

Etapa 2: comparar os elementos da linha com as colunas, aos pares (Tabela 2). No exemplo se percebe que o especialista foi questionado qual é o componente mais crítico entre os “tanques de lama” e as “bombas de lama” com indicação de maior criticidade para “bomba de lama”.

Tabela 2 – Exemplo de aplicação par a par

Elementos	Bombas de lama	Tanques de lama	Peneiras de lama	Top Drive	Drawworks	Catarina	Hydratong	Hydraracker	Pipe catwalk	Riser catwalk
Bombas de lama	——	1								
Tanques de lama	0	——								
Peneiras de lama			——							
Top Drive				——						
Drawworks					——					
Catarina						——				
Hydratong							——			
Hydraracker								——		
Pipe catwalk									——	
Riser catwalk										——

Fonte: Autoria própria (2019)

Etapa 3: após todas as comparações deve-se somar todos os valores na mesma linha (Tabela 3);

Tabela 3 – Análise completa e totalização da linha

Elementos	Bombas de lama	Tanques de lama	Peneiras de lama	Top Drive	Drawworks	Catarina	Hydratong	Hydraracker	Pipe catwalk	Riser catwalk	Total
Bombas de lama		1	1	0	1	1	1	1	1	1	8
Tanques de lama	0		0	0	0	0	1	0	1	0	2
Peneiras de lama	0	1		0	0	0	1	0	1	0	3
Top Drive	1	1	1		1	1	1	1	1	1	9
Drawworks	0	1	1	0		1	1	1	1	1	7
Catarina	0	1	1	0	0		1	1	1	1	6
Hydratong	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0
Hydraracker	0	1	1	0	0	0	1		1	1	5
Pipe catwalk	0	0	0	0	0	0	1	0		0	1
Riser catwalk	0	1	1	0	0	0	1	0	1		4

Fonte: Autoria própria (2019)

Etapa 4: a fim de se determinar o índice de risco dos elementos calcula-se o grau de pertinência de cada componente usando a expressão:

$$\mu(\text{elemento}) = \sum \text{elemento} / 0,5 nq (q - 1)$$

Onde:

n = 1 (quantidade de entrevistados);

q = 10 (quantidade de elementos).

Os resultados do grau de pertinência de cada componente estão expressos na Tabela 4.

Tabela 4 – Cálculo do grau de pertinência

Elementos	Total	μ (elemento)
Bombas de lama	8	0,17
Tanques de lama	2	0,04
Peneiras de lama	3	0,06
Top Drive	9	0,20
Drawworks	7	0,15
Catarina	6	0,13
Hydratong	0	0
Hydraracker	5	0,11
Pipe catwalk	1	0,02
Riser catwalk	4	0,08

Fonte: Autoria própria (2019)

Constata-se então que o elemento *Top Drive* é considerado o elemento mais crítico do Sistema de Perfuração, pois possui maior de pertinência, isto é 0,20.

PASSO 5 E 6 – ANÁLISE DA CRITICIDADE E DEFINIÇÃO DO COMPONENTE CRÍTICO DIAGRAMA FÍSICO-FUNCIONAL

Destaca-se que o desenvolvimento do método FMECA, para ser o mais completo possível, deve considerar profissionais que atuam nas áreas de projeto, operação, manutenção, entre outras, implicando em demasiada dificuldade de convergência deles em tempo curto. Por isso, para aplicação deste método, optou-se por versão simplificada, considerando-se a averiguação da função principal, modos de falhas e referidas causas.

Sendo assim, este subitem aborda a aplicação do FMECA no elemento crítico *Top Drive*, que faz parte do Sistema de Perfuração do navio-plataforma. Além das funções principais dos vários componentes, os modos de falhas e causas, deve-se identificar o modo de falha mais crítico, por nova aplicação do método de comparação par a par. Este resultado subsidiará a determinação do evento topo para confecção da FTA.

A Tabela 5 descreve o desenvolvimento do método FMECA pela listagem da função principal de cada componente, os respectivos modos de falha e causas associadas para o elemento crítico *Top Drive*.

Tabela 5 – Aplicação do método FMECA

Item	Componente	Função Principal	Modos de Falha	Causas
1	Drilling motor	Realizar a rotação e torque da coluna de perfuração	<ul style="list-style-type: none"> - Ruído no acoplamento entre motor e caixa de engrenagem - Alta temperatura do motor/rolamento - Alarme no sistema de controle - Vibração excessiva no motor 	<ul style="list-style-type: none"> - Rolamento danificado - filtro sujo - Defeito no sistema de refrigeração - Baixa isolamento - Módulo retificador/inversor em falha
3	IBOP	Conter na coluna de perfuração fluido invasor proveniente do poço (hidrocarboneto)	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de estanqueidade observada no teste de pressão - Vazamento externo - Válvula IBOP não fecha ao ser acionado seu comando 	<ul style="list-style-type: none"> - Fadiga do selo - Contaminação interna - Desgaste da esfera - Desgaste da vedação - Sensor de posição danificado - Pressão baixa no sistema
4	Elevator	Manusear a coluna de perfuração e acessórios	<ul style="list-style-type: none"> - Lentidão no acionamento - Abertura e fechamento não operacionais 	<ul style="list-style-type: none"> - Oscilação no funcionamento - Solenoide de abertura/fechamento travando - Falta de pressão no sistema
5	Pipehandler	Permitir o manuseio, orientação, montagem/ quebra de drill pipe e outras conexões rosqueadas.	<ul style="list-style-type: none"> - Oscilação do <i>link tilt</i> - Contato com a coluna de tubos 	<ul style="list-style-type: none"> - Variação de pressão hidráulica - Desgaste do elevador
6	Rotating head	Permitir a conexão e o alinhamento da coluna de perfuração e acessórios durante a perfuração	<ul style="list-style-type: none"> - Acionamento indevido/involuntário de função não pretendida - Cabeça rotacionando rápido/devagar - Vazamento 	<ul style="list-style-type: none"> - Montagem errada - desgaste do selo - fadiga na vedação
7	Cooling unit	Arrefecer os motores elétricos do Top Drive	<ul style="list-style-type: none"> - Nível baixo de água - Ruído em bomba/motor - Alarme de alta temperatura está acionado 	<ul style="list-style-type: none"> - Vazamento no tanque da cooling unit - Vazamento no circuito/linhas - Rolamento danificado - Sujeira no trocador de calor
8	Saver sub	Conectar o eixo do top drive à coluna de perfuração	<ul style="list-style-type: none"> - Desgaste da rosca 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta vibração - Torque inadequado

9	Lubrication pump	Lubrificar as partes mecânicas da caixa de engrenagem do top drive	- Alarme acionado para baixa pressão - apresentar ruído na bomba	- Quebra do acoplamento entre motor elétrico e bomba - Rolamento danificado
10	Control system	Controlar e monitorar as funções no top drive	- Perda de comunicação nos módulos do CLP (Controlador Lógico Programável) - Comando de acionamento/joystick não funciona	- Desgaste dos controles - Mau contato nas conexões elétricas - Atenuação nos links de fibra ótica
11	Electrical service loop	Fornecer comunicação e energia elétrica	- Perda de operacionalidade - Dano físico na estrutura do service loop	- Condutor elétrico partido - Baixa isolamento - Excesso de atrito com a torre - Balanço do navio
12	Hydraulic service loop	Fornecer energia hidráulica	- Dano físico na estrutura do service loop - Perda de pressão na linha	- Vazamento no mangote - Excesso de atrito com a torre - Balanço do navio
13	Dolly	Retrair e estender o conjunto catarina + top drive	- Comando de estender/retrair não funciona	- Sensor de posição danificado - Calibração desregulada

Fonte: Autoria própria (2019)

Para melhor compreensão do Quadro 5, a seguir apresentam-se as descrições dos campos relevantes da referida:

- Componente: parte constituinte do componente crítico (*Top Drive*);
- Função principal: campo destinado ao detalhamento da função exercida pelo componente do *Top Drive*;
- Modos de falha: maneira pela qual a falha é observada;
- Causas: são as consequências diretas do não cumprimento de alguma etapa, atividade ou ação essencial para que o elemento do subsistema opere adequadamente.

Realizou-se nova entrevista com o especialista engenheiro de manutenção para aplicação do método de comparação par a par, utilizando agora os modos de falha associados aos componentes do componente crítico *Top Drive*. Para tanto, seguiram-se as Etapas, tal como na Análise da Criticidade, resultando na apresentação da Tabela 6.

Percebe-se que a “Válvula IBOP não fecha ao ser acionado o seu comando” foi considerado o modo de falha mais crítico, pois obteve o maior grau de pertinência (μ).

Tabela 6 – Cálculo do grau de pertinência dos modos de falha

Modos de falha	Σ	μ (modos de falha)
Ruído no acoplamento entre motor e caixa de engrenagem	19	0,050
Alta temperatura do motor/rolamento	17	0,044
Alarme no sistema de controle do motor	15	0,039
Vibração excessiva no motor	17	0,044
Acúmulo de resíduos no selo	1	0,002
Alta vibração no <i>wash pipe</i>	8	0,021
Falta de estanqueidade observada no teste de pressão	25	0,066
Vazamento externo	25	0,066
Válvula IBOP não fecha ao ser acionado seu comando	26	0,068
Lentidão no acionamento do elevador	7	0,018
Abertura e fechamento de comando do elevador não operacionais	14	0,037
Oscilação do link <i>tilt</i>	1	0,002
Contato do <i>pipehandler</i> com a coluna de tubos	11	0,029
Acionamento indevido/involuntário de função não pretendida	14	0,037
Cabeça rotacionando rápido/devagar	10	0,026
Vazamento na <i>rotating head</i>	24	0,063
Nível baixo de água na <i>cooling unit</i>	2	0,005
Ruído na bomba/motor de refrigeração	6	0,015
Alarme de alta temperatura do sistema de refrigeração está acionado	14	0,037
Desgaste da rosca do <i>saver sub</i>	3	0,007
Alarme da bomba de lubrificação acionado para baixa pressão	22	0,058
Ruído na bomba de lubrificação	8	0,021
Perda de comunicação nos módulos do CLP	17	0,044
Comando de acionamento/joystick não funciona	5	0,013
Perda de operacionalidade do <i>service loop</i> elétrico	14	0,037
Dano físico na estrutura do <i>service loop</i>	14	0,037
Perda de pressão em linha hidráulica	20	0,052
Comando de estender/retrair não funciona	19	0,050

Fonte: Autoria própria (2019)

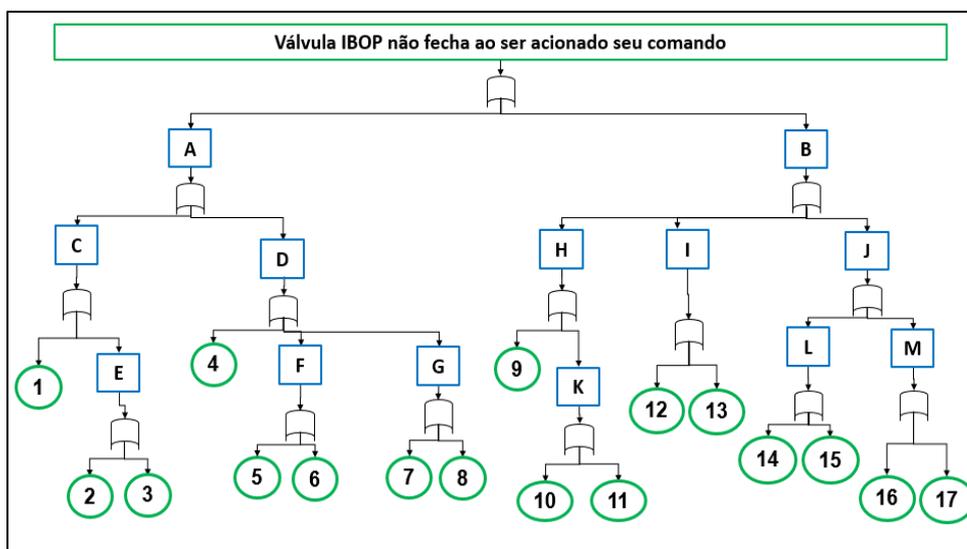
PASSO 7 – APLICAÇÃO DO MÉTODO FTA

O modo de falha mais crítico determinado no subitem anterior é considerado como o evento topo para a elaboração da FTA.

Os especialistas em mecânica e elétrica foram consultados para a determinação dos fatores contribuintes para o aparecimento do evento topo (modo de falhas mais crítico), permitindo-se a elaboração da diagramação lógica e determinação das falhas básicas.

A FTA (Figura 4) possui duas causas imediatas, sendo uma relacionada à Função elétrica e a outra à Função mecânica/hidráulica. Foram utilizados a porta lógica “OU”, os eventos intermediários indicados retângulos e as causas básicas que implicam no aparecimento do evento (topo ou intermediário) simbolizadas por elipses (em verde).

Figura 4 – Método FTA aplicado



Legenda	Significados
A	Defeito em função elétrica
B	Defeito em função hidráulica
C	Alarme de rede indicando perda de comunicação
D	Válvula não aciona, mas a rede continua funcionando normalmente
E	Falha na conexão da rede física
F	Cabo do Service Loop elétrico com fio partido
G	Solenóide da válvula está queimada
H	Válvula está travada
I	Eletroválvula de comando hidráulico travada
J	Cilindro hidráulico danificado
K	Válvula com corrosão
L	Vazamento interno
M	Vazamento externo
1	Módulo queimado
2	Fibra ótica partida
3	Fio partido
4	Conexão elétrica frouxa
5	Desgaste do condutor elétrico em razão do movimento
6	Contato externo do cabo contra estrutura
7	Ingressão de água na válvula solenóide
8	Vida útil alcançada
9	Má circulação feita após operação de cimentação
10	Falta de lubrificação da válvula
11	Falta de tratamento mecânico
12	Filtro saturado

13	Ingresso de contaminantes durante a manutenção
14	Esfera de vedação danificada
15	Desgaste de partes internas da válvula
16	Desgaste prematuro ou natural do material
17	Conexão com folga

Fonte: Autoria própria (2019)

PASSO 8 – ANÁLISE QUALI-QUANTI DA FTA

PASSO 8 – Análise Qualitativa da FTA

Foram determinadas dezessete causas básicas e, a partir delas, faz-se necessário determinar a taxa de falhas (frequência com que as falhas ocorrem num certo intervalo de tempo) de cada causa básica, o mesmo especialista das fases de comparação por par foi consultado. O período para contagem das falhas é de cinco anos. A Tabela 7 apresenta as taxas de falhas identificadas junto ao especialista.

Tabela 7 – Taxa de falhas

Causas básicas	Taxa de falhas (1 em 5 anos) ou 43.800 horas
Módulo queimado	0,40
Fibra ótica partida	1,00
Fio partido	1,00
Conexão elétrica frouxa	1,00
Desgaste do condutor elétrico em razão do movimento	0,40
Contato externo do cabo contra estrutura	0,40
Ingressão de água na válvula solenoide	0,40
Vida útil alcançada	1,00
Má circulação feita após operação de cimentação	0,10
Falta de lubrificação da válvula	0,05
Falta de tratamento mecânico	0,10
Filtro saturado	1,00
Ingresso de contaminantes durante a manutenção	1,00
Esfera de vedação danificada	0,20
Desgaste de partes internas da válvula	0,20
Desgaste prematuro ou natural do material	0,20
Conexão com folga	0,20

Fonte: Autoria própria (2019)

No sistema de gerenciamento de manutenção do navio-plataforma identificou-se que a válvula IBOP apresentou 75 falhas em cinco anos. Para a avaliação da probabilidade de falhas, que será usada na avaliação quantitativa, tomou-se a quantidade de falhas para cada causa básica em relação ao total de falhas da válvula IBOP. Os valores destas probabilidades estão dispostos no Tabela 8.

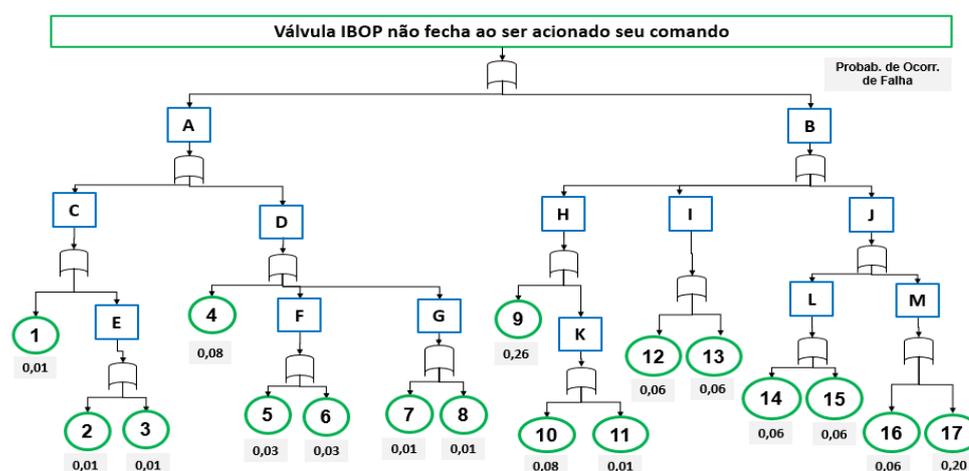
Tabela 8 – Probabilidade de ocorrência de falha

Causas básicas	Quantidade de falhas em cinco anos	Probabilidade de falha
Módulo queimado	1	0,01
Fibra ótica partida	1	0,01
Fio partido	1	0,01
Conexão elétrica frouxa	6	0,08
Desgaste do condutor elétrico em razão do movimento	2	0,03
Contato externo do cabo contra estrutura	2	0,03
Ingressão de água na válvula solenoide	1	0,01
Vida útil alcançada	1	0,01
Má circulação feita após operação de cimentação	19	0,26
Falta de lubrificação da válvula	6	0,08
Falta de tratamento mecânico	1	0,01
Filtro saturado	5	0,06
Ingresso de contaminantes durante a manutenção	5	0,06
Esfera de vedação danificada	5	0,06
Desgaste de partes internas da válvula	5	0,06
Desgaste prematuro ou natural do material	5	0,06
Conexão com folga	14	0,20

Fonte: Autoria própria (2019)

Para realizar os cálculos para se determinarem as probabilidades dos níveis superiores da árvore de falhas foram alocados os valores encontrados na tabela 08 em suas respectivas causas básicas (Figura 5).

Figura 5 – Probabilidade de ocorrência de falha das causas básicas



Fonte: Autoria própria (2019)

Considera-se então $P(O)$ a probabilidade de ocorrência do evento resultante (saída) e $P(E)$ a probabilidade de ocorrência das causas resultantes (hierarquia inferior), conforme a expressão a seguir para a Porta Lógica OU:

$$P(O) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(E_i))$$

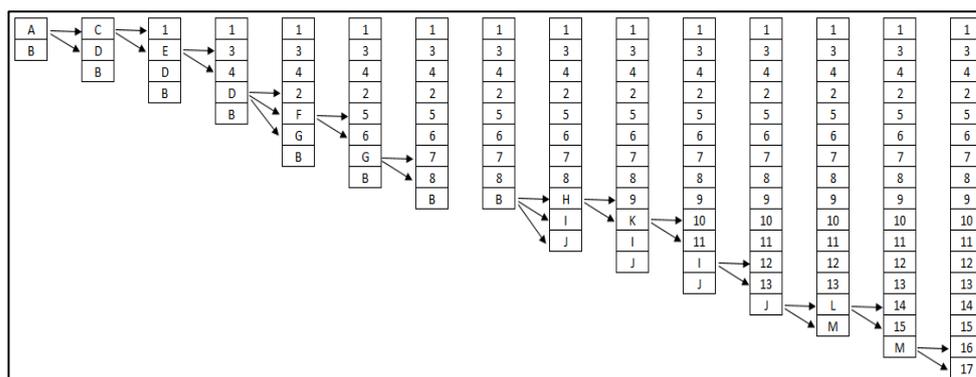
Os cálculos para determinação das probabilidades dos níveis superiores estão apresentados adiante, para as Portas OU:

- $P(E) = 1 - [(1 - P(2)).(1 - P(3))] = 1 - [(1 - 0,01).(1 - 0,01)] = 1 - 0,9801 = 0,02$
- $P(F) = 1 - [(1 - P(5)).(1 - P(6))] = 1 - [(1 - 0,03).(1 - 0,03)] = 1 - 0,9409 = 0,06$
- $P(G) = 1 - [(1 - P(7)).(1 - P(8))] = 1 - [(1 - 0,01).(1 - 0,01)] = 1 - 0,9801 = 0,02$
- $P(K) = 1 - [(1 - P(10)).(1 - P(11))] = 1 - [(1 - 0,08).(1 - 0,01)] = 1 - 0,9108 = 0,09$
- $P(L) = 1 - [(1 - P(14)).(1 - P(15))] = 1 - [(1 - 0,06).(1 - 0,06)] = 1 - 0,8836 = 0,12$
- $P(M) = 1 - [(1 - P(16)).(1 - P(17))] = 1 - [(1 - 0,06).(1 - 0,20)] = 1 - 0,752 = 0,25$
- $P(C) = 1 - [(1 - P(1)).(1 - P(E))] = 1 - [(1 - 0,01).(1 - 0,02)] = 1 - 0,9702 = 0,03$
- $P(D) = 1 - [(1 - P(4)).(1 - P(F)).(1 - P(G))] = 1 - [(1 - 0,08).(1 - 0,06).(1 - 0,02)] = 1 - 0,847504 = 0,15$
- $P(H) = 1 - [(1 - P(9)).(1 - P(K))] = 1 - [(1 - 0,26).(1 - 0,09)] = 1 - 0,6734 = 0,33$
- $P(I) = 1 - [(1 - P(12)).(1 - P(13))] = 1 - [(1 - 0,06).(1 - 0,06)] = 1 - 0,8836 = 0,12$
- $P(J) = 1 - [(1 - P(L)).(1 - P(M))] = 1 - [(1 - 0,12).(1 - 0,25)] = 1 - 0,66 = 0,34$
- $P(A) = 1 - [(1 - P(C)).(1 - P(D))] = 1 - [(1 - 0,03).(1 - 0,15)] = 1 - 0,8245 = 0,17$
- $P(B) = 1 - [(1 - P(H)).(1 - P(I)).(1 - P(J))] = 1 - [(1 - 0,33).(1 - 0,12).(1 - 0,34)] = 1 - 0,389136 = 0,61$
- $P(ET) = 1 - [(1 - P(A)).(1 - P(B))] = 1 - [(1 - 0,17).(1 - 0,61)] = 1 - 0,3237 = 0,68$

PASSO 8 – Análise Quantitativa da FTA

Para a análise qualitativa será utilizado o Diagrama de Cortes Mínimos. A determinação dos cortes mínimos viabiliza a análise qualitativa da árvore de falhas, indicando os pontos fracos do sistema sob análise. Para aplicação do corte mínimo na árvore de falhas observou-se que todas as portas são OU, o que significa que o corte é feito aumentando em quantidade de linhas e que as possíveis falhas não são interligadas. Conforme apresentado na Figura 6, observou-se que qualquer falha que ocorra diante das opções existentes, imediatamente implicará na ocorrência do evento topo, denotando que todas as causas básicas são consideradas críticas.

Figura 6 – Corte mínimo



Fonte: Autoria própria (2019)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A engenharia de manutenção tem se destacado no cenário corporativo além dos paradigmas que fixaram a reparação como único foco, ou seja, a ação é reativa. Neste mesmo aspecto, a área de manutenção se posiciona atualmente como estratégica, pois permite interferir positivamente em projetos de produtos e máquinas, na mitigação de impactos ambientais e na redução de custos de produção.

O aumento da confiabilidade, minimização da manutenibilidade e, conseqüente, aumento da disponibilidade, são focos da engenharia de manutenção. Desta forma, a visão proativa que substitui a tradicional, reativa, busca por oportunidades de mudança de cultura, inserindo instrumentos, métodos, metodologias e procedimentos que possibilitem aumentar o conhecimento dos ativos, valorizando o planejamento como forma de preparação para a ocorrência de falhas, que são sempre inevitáveis.

Desta forma, este trabalho objetivou apresentar um procedimento genérico que permite atuar em sistemas, de forma proativa, otimizando os recursos limitados para manutenção.

Na sequência desenvolveu-se um estudo de caso com o intuito de demonstrar a aplicabilidade do procedimento. Analisou-se o sistema de perfuração de certo navio-plataforma em busca da melhoria de seu sistema de gerenciamento da manutenção, de forma proativa.

Com a ajuda de um especialista levantaram-se e analisaram-se dez componentes que compõem o sistema de perfuração. Com estes dados aplicou-se Análise de Criticidade, onde foi identificado, por intermédio do método de comparação par a par, o elemento *Top Drive* como o mais crítico do sistema. Tal componente, na prática, é crucial para a perfuração de um poço de petróleo.

O *Top Drive* foi detalhado com treze componentes para a aplicação do FMECA simplificado, onde identificaram-se suas funções principais, vinte e oito modos de falha e suas respectivas causas. Uma nova aplicação do método de comparação par a par indicou como o modo de falha mais crítico “Válvula IBOP não fecha ao ser acionado seu comando”.

Este modo de falha mais crítico foi utilizado como evento topo para desenvolvimento do método FTA. Por nova consulta a um especialista identificaram-se dezessete causas básicas. O levantamento dos últimos cinco anos de operação do navio-plataforma indicou setenta e cinco falhas neste modo de falha mais crítico e como resultado da avaliação quantitativa aplicada em cada causa básica possibilitou determinar as probabilidades de cada uma delas, bem como de seus níveis superiores, constatando a probabilidade de ocorrência de falha do evento topo em 68%. Pela análise qualitativa constatou-se que todas as causas básicas são de primeiro nível, isto é, são críticas e interferem, igualmente, na existência do evento topo.

The proactive view of maintenance in oil exploration system

ABSTRACT

Due to the crisis in the oil sector, it is essential to properly manage maintenance with efficient tools and methods. For this reason, this Course Completion Work focuses on the application of the criticality analysis in the components of the Drilling System of a certain oil platform vessel, in sequence, in the Analysis of Failure Modes, Effects and Criticality (FMECA) and, for lastly, in the “quali-quantit” evaluations by Fault Tree (FTA). It was counted on the contribution of a specialist supervisor of maintenance of the platform ship in the applications of the method of comparison by pairs, which use the Fuzzy theory as background, to determine the most critical component and failure mode. Through the analysis of the criticality of the Drilling system, the critical component “Top Drive” was reached, which presented a greater degree of relevance. Then, the simplified FMECA method was applied, dealing with the main functions, failure modes and referred causes, only for the Top Drive component. Twenty-eight failure modes were mapped, considering that “IBOP valve does not close when its command is activated” presented a higher degree of relevance. The most critical failure mode was used as a Top Event in the application of the FTA, where intermediate events, basic causes and OR logic gates were identified. The FTA resulted in the analysis of seventeen root causes. The “quali-quantit” evaluation pointed out that the top event has a 68% probability of failure occurring and that all mapped causes are considered critical, that is, for the top event to happen.

KEYWORDS: Drillship. Criticality. FMECA. FTA.

REFERÊNCIAS

ABAR, Celina, 2004. **O CONCEITO "FUZZY"** Disponível em:
<https://www.pucsp.br/~logica/Fuzzy.htm> Acesso em 17 set. 2019

ALONSO, Suelen. Poluição por derramamento de petróleo - **Brasil Escola**, 2019. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/geografia/poluicao-por-derramamento-petroleo.htm>>. Acesso em: 28 fev. 2019.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Gerenciamento de Segurança Operacional (SGSO). **ANP**, 2019. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional-e-meio-ambiente/resolucoes-notificacoes-procedimentos-e-orientacoes/gerenciamento-de-seguranca-operacional-sgso>>. Acesso em: 28 fev. 2019.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Regulamento Técnico do Sistema de Gerenciamento da Segurança Operacional das Instalações Marítimas de Perfuração e Produção de Petróleo e Gás Natural. **ANP**, 2019. Disponível em: <www.anp.gov.br>. Acesso em: 27 fev. 2019.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Segurança Operacional e Meio Ambiente. **ANP**, 2019. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional-e-meio-ambiente>>. Acesso em: 28 fev. 2019.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Análise do acidente com a plataforma P-36**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/images/EXPLORACAO_E_PRODUCAO_DE_OLEO_E_GAS/Seguranca_Operacional/Relat_incidentes/Relatorio_P-36.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

AZWELL, T. *et al.* The Macondo Blowout Environmental Report. **CCRM**, 2011. Disponível em: <https://ccrm.berkeley.edu/pdfs_papers/DHSGWorkingPapersFeb16-2011/MacondoBlowoutEnvironmentalReport-TA_DHSG-Jan2011.pdf> . Acesso em: 10 abr. 2019.

BANDO, F.M.; MARQUES, J.M.; PATIAS, J. Análise Probabilística de Árvore de Falhas na Gestão de Segurança de Barragens – Bloco D38 da barragem de Itaipú. 2015. Comitê Brasileiro de Barragens, Foz do Iguaçu, 2015.

BARAN, L.; TROJAN, F. Uma revisão e análise comparativa das técnicas para determinar a criticidade dos sistemas e equipamentos em plantas industriais. Paraná, volume 37, nº 8, p. 1, 2016.

BELAN, Matheus. **Análise de Confiabilidade em Downtime de Sonda de Perfuração: o método bow-tie.** 2017. Disponível em: <<https://app.uff.br/riuff/bitstream/1/5871/1/TCC%20MATTHEUS%20BELAN.pdf>> . Acesso em: 06 abr. 2019.

BERNHARDT, Eduardo. Petróleo: filme aborda os impactos sociais e ambientais da sua exploração. **Recicloteca**, 2016. Disponível em: <<http://www.recicloteca.org.br/noticias/petroleo-filme-aborda-os-impactos-sociais-e-ambientais-da-sua-exploracao/>>. Acesso em: 26 fev. 2019.

CHENG, X. et al. **Reliability Analysis of Metro Door System Based on FMECA.** 2013. Journal of Intelligent Learning Systems and Applications, 2013, 5, 216-220.

crossref

CONHEÇA quais os impactos ambientais causados pelo Petróleo. **FRAGMAQ**, 2015. Disponível em: <<https://www.fragmaq.com.br/blog/conheca-sao-impactos-ambientais-causados-petroleo/>>. Acesso em: 26 fev. 2019.

CULLEN, T.H.; LORD, W. D. **The public inquiry into the Piper Alpha disaster.** London, volume 1, 488 páginas, 1990.

CYRINO, Luiz. FMEA – Análise Modos de Falhas e Efeitos. **Manutenção em Foco**, 2017. Disponível em: <<https://www.manutencaoemfoco.com.br/fmea-analise-modos-de-falhas-e-efeitos/>>. Acesso em: 25 mar. 2019.

DE MORAES BRANCO, Pércio. Petróleo. **CRPM**, 2014. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Canal-Escola/Petroleo-1256.html>> . Acesso em: 22 fev. 2019

EXPOSIÇÃO Petrobras em 60 momentos. **Exposição 60 anos**, [2018?]. Disponível em: <<http://exposicao60anos.agenciapetrobras.com.br/decada-1960-momento-11.php>>. Acesso em: 27 fev. 2019.

EXTRAÇÃO de petróleo/prevenção e riscos. **DUPONT**, 2019. Disponível em: <<http://falandodeprotecao.com.br/extracao-de-petroleo/>>. Acesso em: 27 fev 2019.

FONTES. **CCEE**, 2019. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-

atuamos/fontes?_adf.ctrl-state=z8uvsobg4_18&_afLoop=595944064058926#!>. Acesso em: 22 fev. 2019

FRANCISCO, Marcela. Uma comparação entre os regimes de taxaço sobre o petróleo: concessão e partilha. 2011. PUC, Rio de Janeiro, 2011.

GOMES, Pedro. **Análise de Criticidade dos Equipamentos**. 2013. Disponível em: <<http://profissionaltech2.blogspot.com/2013/03/analise-da-criticidade-dos-equipamentos.html>>. Acesso em: 12 mar. 2019.

GRECCO, Claudio Henrique dos Santos; CARVALHO, Paulo Victor Rodrigues; SANTOS, Isaac José Antônio Luquetti. Um Método Proativo para Gerenciamento da Segurança em Instalações Nucleares. 2015. Disponível em: <<http://www2.sbpr.org.br/revista/index.php/REVISTA/article/view/112>>. Acesso em 27 de fev. 2016.

GUIMARÃES, Ligia. Entenda os Riscos da Exploração do Petróleo. **G1**, 2010. Disponível em: <<http://g1.globo.com/economia-e-negocios/noticia/2010/07/entenda-os-riscos-da-exploracao-de-petroleo.html>>. Acesso em: 27 mar. 2019.

HENRIQUE, Fábio. O que é FMEA. **Industria Hoje**, 2013. Disponível em: <<https://industria hoje.com.br/fmea>>. Acesso em 25 abr. 2019.

HU, Y.N. Research on the Application of Fault Tree Analysis for Buildings Fire Safety of Hotels. 2016. China, Elsevier, 2016. **crossref**

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **CNAE**, 2019. Disponível em: <https://cnae.ibge.gov.br/?option=com_cnae&view=atividades&Itemid=6160&tipo=cnae&chave=atividade+de+extra%C3%A7%C3%A3o+petr%C3%B3leo&versao_classe=7.0.0&versao_subclasse=10.1.0>. Acesso em: 01 mar. 2019.

JQUES, Maurício. Aplicação do FMECA no gerenciamento de risco e uma empresa de transporte rodoviários de cargas. **Revista de Contabilidade e Controladoria**, 2010. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/rcc/article/view/20663/13776>>. Acesso em: 15 mar. 2019.

LIPOL, L.S; HAQ, J. **Risk analysis method: FMEA/FMECA in the organizations**. 2011. International Journal of Basic & Applied Sciences, 2011, volume 11, nº 05.

LOPES, Marcos. Extração do Petróleo e Gás – Como é feita. **Técnico em Mineração**, 2014. Disponível em: <<https://tecnicoemineracao.com.br/extracao-do-petroleo-e-gas/>>. Acesso em: 22 fev. 2019.

MAEHLER, A.E.; CERETTA, P.S.; JUNIOR, P.C. Aplicação do método de criticidade de materiais em estoques hospitalares. **ABEPRO**, 2004. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2004_Enegep0112_0675.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2019.

MANGUEIRA, Caroline. Proposta de Classificação do Nível de Criticidade dos Processos Erosivos da Região Noroeste do Paraná. **Acervo Digital**, 2017. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/49116/R%20-%20D%20-%20CAROLINE%20GONCALVES%20MANGUEIRA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 28 mai 2019.

MARTINS, Eduardo. Passos do FMEA. **Vstream**, 2013. Disponível em: <<https://vstream.wordpress.com/2013/03/23/passos-do-fmea/>>. Acesso em: 25 abr. 2019.

MARTINS, Rosemary. Análise de Modos de Falhas e Efeitos (FMEA). **Blog da Qualidade**, 2012. Disponível em: <<https://blogdaqualidade.com.br/analise-de-modos-de-falhas-e-efeitos-fmea/>>. Acesso em: 24 abr. 2019

MATHIAS, Victor. Coluna de perfuração em poços de petróleo. Natal, 2016, p. 5.

MTE, Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora NR-30: Segurança e Saúde no Trabalho Aquaviário. **MTE**, 2015. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/seguranca-e-saude-no-trabalho/normatizacao/normas-regulamentadoras/norma-regulamentadora-n-30-seguranca-e-saude-no-trabalho-aquaviario>>. Acesso em: 06 mai. 2019.

PETRÓLEO. **ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**, 2019. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/petroleo-e-derivados2/petroleo>>. Acesso em: 22 fev. 2019

PIPER ALPHA: The Disaster in Detail. **The Chemical Engineer**, 2019. Disponível em: <<https://www.thechemicalengineer.com/features/piper-alpha-the-disaster-in-detail/>>. Acesso em: 10 abr. 2019.

QUEIROZ, Alan Rômulo Silva. Estratégia de Manutenção de Equipamentos elétricos em Unidades Offshore de Produção de Petróleo e Gás baseada na filosofia de operações integradas. São Paulo, 2016, p. 37.

ROSENBLATT, Lúcia. Aplicação de Dinâmica de Sistemas ao estudo do comportamento das taxas diárias de aluguel de sondas de perfuração off-shore. Monografia (graduação em Engenharia de Produção). Rio de Janeiro, 2006.

SANTOS, Marcelo. Repensando a exploração do petróleo no Brasil e a concepção do pré-sal sob a perspectiva da sociedade de risco. [s.d.]. Universidade Estácio de Sá, [s.d.].

SHARMA K.D.; SRIVASTAVA, S. **Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Implementation: A Literature Review**. 2018. *Aero Space Sci*, 2018; vol. 1& 2, p. 1-17.

SIQUEIRA, Y.P.D.S. **Manutenção centrada na confiabilidade**: manual de implantação. 1ª (Reimpressão). Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

SOUTH SHIELDS victims of Piper Alpha oil rig disaster to be remembered. **Shields Gazette**, 2018. Disponível em: <<https://www.shieldsgazette.com/news/south-shields-victims-of-piper-alpha-oil-rig-disaster-to-be-remembered-1-9230622>>. Acesso em: 12 abr. 2019.

STAMATELATOS, *et al.* **Fault Tree Handbook with Aerospace Applications**. 2002. Washington: NASA Headquarters, 2002.

SUCENA, Marcelo. Gerência da Manutenção. **SUCENA**, 2017. Disponível em: <http://www.sucena.eng.br/eng_producao/2017/UNESA_GERENCIA_MANUTEN%C3%87%C3%83O_2017_1.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2019.

SUCENA, Marcelo, 2019 Disponível em: http://www.sucena.eng.br/eng_producao/UNESA_FINAL_M%C3%89T_MAT_APL_ENG_PROD.pdf. Acesso em 17 set. 2019

SUCENA, Marcelo. Subsídios para a alocação de recursos financeiros em sistemas de transportes urbanos sobre trilhos baseado em critérios técnicos. **SUCENA**, 2017. Disponível em: <<http://transportes.ime.eb.br/DISSERTA%C3%87%C3%95ES/DIS176.zip>>. Acesso em: 09 abr. 2019.

TAHARA, Sayuri. FTA - Fault Tree Analysis. **Portal de Conhecimentos**, 2008. Disponível em: <<http://www.portaldeconhecimentos.org.br/index.php/por/Conteudo/FTA-Fault-Tree-Analysis>>. Acesso em: 05 abr. 2019

THOMAS, José Eduardo. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2ª edição. Rio de Janeiro, 2001, p.110-112.

TITUSVILLE, Pensilvânia, 1896. **Biblioteca Digital Mundial**. 2017. Disponível em: <<https://www.wdl.org/pt/item/11368/>>. Acesso em 02 mai. 2019.

Recebido: 13 Fev. 2020

Aprovado: 14 Out. 2020

DOI: 10.3895/gi.v16n4.11627

Como citar:

SUCENA, M.P. et al. A visão proativa da manutenção em sistema de exploração de petróleo. **R. Gest. Industr.**, Ponta Grossa, v. 16, n. 4, p. 206-236, Out./Dez. 2020. Disponível em:

<https://periodicos.utfpr.edu.br/revistagi>

Correspondência:

Marcelo Prado Sucena

Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

