UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE SISTEMAS PREVENTORES EM ESTAÇÕES DE PERFURAÇÃO OFFSHORE

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO

POR:

SÉRGIO PARENTE VIEIRA DA ROCHA

Orientador: Enrique Andrés Lopez Droguett, Ph.D.

RECIFE, ABRIL/2004

R672a **Rocha, Sérgio Parente Vieira da**

Análise de confiabilidade de sistemas preventores em estações de perfuração *offshore* / Sérgio Parente Vieira da Rocha. – Recife: O Autor, 2004.

viii, 51 f., il., gráfs., tabs.

Monografia (TCC) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Depto. de Engenharia de Produção, 2004.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia de Produção. 2. Análise de Risco. 3. Árvore de Falhas. 3. Árvore de Eventos. 4. Petróleo – Sistema Preventor. I. Título.

658.5 CDD (22.ed.) **BCTG/2007-025**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, à minha família e aos meus mestres, professores do departamento de Engenharia de Produção, presentes em todos estágios da minha vida acadêmica, que me permitiram chegar a este momento de conclusão do curso como um profissional formado.

Em especial aos meus pais Paulo Thadeu e Hélia, por seu ensinamentos e dedicação incontestáveis durante toda minha vida, e a minhas irmãs e amigas Daniela e Raquel, por todo amor e carinho que a mim devotam.

Ao professor Antônio Nunes que me incentivou e mostrou os caminhos para conhecer o que a faculdade poderia me oferecer.

Destaco a contribuição essencial do meu orientador desta monografia, professor Enrique Lopez pelo seu apoio e compreensão durante o desenvolvimento deste trabalho.

Lembro aqui, com muito respeito e carinho da professora Márcia Alcoforado, orientadora de iniciação científica, presente na maior parte da minha formação acadêmica, me passando muitos ensinamentos e me apoiando sempre.

Por fim, a todos os meus colegas de curso, cuja amizade e companheirismo me fizeram ter forças suficientes para concluir todas as etapas do curso, com menção especial a João Paulo, Edgar, Rafael, Paulo e Vândson.

RESUMO

A finalidade deste trabalho é apresentar uma revisão teórica e aplicação prática de conceitos explorados durante o período de formação no curso de Engenharia de Produção. Para tanto, o referido autor foca seus conhecimento na área de Engenharia de Confiabilidade, mais precisamente na utilização do Método de Árvore de Eventos e Árvore de Falha, aplicado na análise de um conjunto de equipamentos de segurança e prevenção de acidentes, utilizados em estações de perfuração de petróleo semi-submersa.

Em seu desenvolvimento é apresentado um breve histórico de perfuração de petróleo, seguido de conceitos relativos à confiabilidade de sistemas, e focando o interesse do trabalho, o desenvolvimento do tema, Árvore de Eventos e Árvore de Falhas. Através de extensa revisão bibliográfica são expostas informações relevantes à perfuração em alto mar em estações semi-submersas, com uma descrição dos equipamentos estudados, suas funções e em seguida é detalhada a metodologia utilizada para a consecução das Árvores de Falha. Culminando com os resultados obtidos e conclusões relevantes.

Palavras-chave: *Análise de Risco, Árvore de Falhas, Árvore de Eventos, Petróleo, Sistema Preventor*.

ABSTRACT

The purpose of this work is to present a theoretical revision and na practical application of concepts explored during the period of Engineering Production course. For in such a way, the related author focus its knowledge in the area of Reliability Engineering, more especifically in the use of Events Tree Method and Fault Tree, applied in the analysis of an set of security and prevention accidents equipments, used in half-submerged oil drilling stations.

An historical briefing of oil well perforation it is developed, following concepts of reliability systems, and focusing the interest of the work, the development of Events Tree and Fault Tree. Through extensive bibliographical revision about offshore oil perforation in half-submerged stations are showed, with an description of studied equipments and after that the used methodology is showed for the build of Fault Trees. Culminating with results and conclusions.

Keywords: *Risk Analysis, Fault Trees, Event Trees, Oil, Blow Out Preventer*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1 INTRODUÇÃO

Por muito tempo a exploração de petróleo em águas profundas renegou a importância que deveria ser dada ao sistema preventor BOP (Blow Out Preventer) referenciado algumas vezes como um sistema de intervenção secundário. Porém este sistema representa a última linha de defesa para contenção de um poço. Este equipamento possui grande importância para prevenção de verdadeiras catástrofes, que podem levar a danos ao meio ambiente, equipamentos e pessoa.

Este texto vem propor uma análise baseada em confiabilidade destes sistemas e identificar formas claras de atuação para garantia da confiabilidade destes equipamentos de segurança.

1.1. Conceitos Iniciais

Para melhor compreensão do que é descrito neste trabalho vale ressaltar algumas definições básicas de alguns conceitos, podemos citar:

Confiabilidade: é a probabilidade que um sistema (componente, produto, etc) irá realizar uma determinada função por um dado período de tempo sob condições operacionais específicas.

Modo de Falha: Corresponde a uma das formas que o componente ou sistema pode falhar.

MTTF - *Mean time to failure* (Tempo médio até a falha): Expressa o tempo esperado durante o qual o item ou sistema irá operar com sucesso.

MTBF - *Mean time between to failures* (Tempo médio entre Falhas): Expressa o tempo médio esperado que o item ou sistema irá operar com sucesso a partir do momento em que o sistema foi reparado.

Manutenabilidade: É a probabilidade que um sistema falho seja retornado para operação dentro de um período de tempo quando a manutenção é realizada de acordo com procedimentos estabelecidos

- Manutenabilidade é uma medida *downtime* do equipamento , i.e., do tempo que o mesmo se encontra fora de serviço
- Em geral:
  - Medida em tempo de relógio (tempo corrido)

- Equivale ao tempo em que os reparos estão sendo efetuados: tempo de reparo
- Podemos incluir também: Tempo administrativo, Tempo de chegada de peças, etc.

Disponibilidade: É a probabilidade que um sistema está operacional (realizando sua função) em um dado instante quando utilizado sob condições específicas;

Podemos interpretar a disponibilidade como a porcentagem do tempo em que um sistema encontra-se operacional:

$$A = \frac{TempoOperacional}{TempoOperacional + TempoForaDeServiço} \quad (1)$$

1.2. Falha

O conceito de falha é fundamental para a análise de Confiabilidade. Segundo Duarte (2004) Entende-se falha como sendo a diminuição total ou parcial da eficácia, ou capacidade de desempenho, de um sistema. Ou seja, uma falha é o término da capacidade de um item efetuar uma função exigida.

A qualidade da análise de confiabilidade robusta depende de uma análise das habilidades para identificar todos as funções requeridas, e, portanto de todas as falhas, de um item que é sujeito da análise.

A maior parte das análises de confiabilidade não podem ser aplicadas para todos procedimentos formais para identificar funções. Isso pode implicar que apenas parte das funções requeridas sejam identificadas e, portanto analisadas.

Falhas são freqüentemente classificadas como modos de falha. O conceito de modo de falha é geralmente reconhecido como útil e necessário em análise de falha. De acordo com a Norma Inglesa BS 5760, Parte 5, modo de falha é definido como "*O efeito pelo qual a falha é observada para um item falho*".

O conceito de modo de falha, no entanto não possui interpretação bem definida. Isso se deve por diversas razões. Uma delas é que a definição de modo de falha não é a mesma em várias normas. Outra é que na prática a descrição de modo de falha é confundida como descrição de causa de falha ou descrição de efeito de falha. Isso também deve-se ao nível de detalhamento que o sistema será analisado. O modo de falha do primeiro nível será a causa de falha do próximo nível. Outro problema em classificar o modo de falha deve-se o seu conceito é pouco familiar para o leigo.

Em função de (da)	Falha
Velocidade ou forma de manifestação	1 – Progressiva 2 – Repentina.
Comentários: Por exemplo, uma válvula eletrônica pode perder emissão de elétrons gradualmente, ou o desgaste nos segmentos de um motor de explosão pode levar a uma perda gradual de potência do motor. Por outro lado, uma lâmpada incandescente pode apagar de modo repentino, por fratura do filamento de tungstênio, ou o eixo de um motor elétrico pode quebrar bruscamente durante uma partida ou um aumento de carga.	
Momento de Aparecimento	1 – Durante o funcionamento 2 – Ao parar (quando a função requisitada não é mais utilizada)
Grau de Importância	1 – Parcial (inaptidão para cumprir a função requisitada de forma completa) 2 – Completa (perda completa da função).
Comentários: A importância das falhas deve ser estabelecida através de critérios de classificação que permitam quantificar a gravidade dos seus efeitos sobre: a produção, os custos de parada e a segurança como um todo (incluindo pessoas, equipamentos/instalações e danos ao meio ambiente). Pode se estabelecida uma tabela com índices arbitrários de criticidade, de valor relativo, ou seja, a gravidade das falhas deve ser hierarquizada.	
Velocidade de aparecimento e grau de importância	1 – Por degradação: ao mesmo tempo progressiva e parcial. 2 – Catastrófica: ao mesmo tempo repentina e completa.
Causas	1 – Por fraqueza inerte à concepção ou fabricação. 2 – Má utilização. 3 – Ambiente ou condições diferentes do especificado (temperatura mais alta, sobrecarga, vibração entre outras). 4 – Instruções não respeitadas, provenientes do fabricante, do projetista do sistema ou do gabinete de métodos. 5 – Má conservação. 6 – Envelhecimento. 7 – Primária (não provocada por falta de alguma outra falha). 8 – Secundária (conseqüência de alguma outra falha).
Origem	1 – Interna à entidade (origem da falha é atribuída à própria entidade-máquina, equipamento, dispositivo e sistema). 2 – Externa (é o contrário da origem interna à entidade).
Conseqüências	1 – Critica (susceptível de causar danos corporais de conduzir a outras conseqüências julgadas inaceitáveis). 2 – Não-críticas (é o contrário da conseqüência crítica). 3 – Maior ou principal (susceptível de influenciar uma fração considerada como sendo de importância vital).
Comentários: As conseqüências da falha poderão ser: a) economia, i.e. perdas da produção resultantes da falha e/ou b) técnicas, com conseqüências sobre outros equipamentos, etc.	
No tocante a sua característica	1 – Intermitente (perda repentina e momentânea, completa ou parcial de uma função requisitada). 2 – Fugitiva ou transitória (perda de curta duração, não repetitiva, completa ou parcial de uma função requisitada). 3 – Sistemática (ligada de maneira segura a uma causa que não pode ser eliminada a não ser que seja por uma modificação). 4 – reproduzível (que pode ser provocada à vontade simulando a sua causa). 5 – De causa comum (que pode influenciar simultaneamente ou em cascata vários componentes de uma entidade ou toda ela).

Tabela 1 - Classificação das falhas adotada pela Association Française de Normalisation – AFNOR.

Fonte: Duarte, (s.d.)

1.2.1. Função Requerida

A função do item pode ser definida como: "*O normal ou ação característica para um item, as vezes definida em termos de capabilidade de performance*." Observando-se em várias diretrizes e livros texto que quando se expressa a função requerida de um item, normalmente, utiliza-se a estrutura gramatical: verbo + substantivo. Como por exemplo: fechar fluxo, conter fluido, transmitir sinal. Essa estrutura pode ser ampliada para qualquer componente, subsistema ou sistema que possa ser considerado uma entidade.

1.2.1.1. Classificação das funções

Um item complexo pode ter um grande numero de funções requeridas. Todas as funções, no entanto, não são classificadas igualmente em importância, e a classificação pode por isso ser analisada de acordo com seu propósito. Um modo de classificação de funções é:

- **Funções Essenciais**: Essas são as funções requeridas para cumprir o seu propósito desejado. A função essencial é simplesmente a razão para a sua instalação. Freqüentemente a função essencial reflete o próprio nome do item. Como a função essencial de uma bomba é, por exemplo, bombear um fluido.

- **Funções Auxiliares**: São as funções que são requeridas para suporte da função essencial. As funções essenciais são usualmente menores do que obviamente a função essencial, mas pode em muitos casos ser tão importante quanto. Falhas na função auxiliar pode em muitos casos ser mais crítica do que a falha de uma função essencial. Uma função essencial de uma bomba, por exemplo, seria contenção de fluido.

- **Funções de Proteção**: São as funções requeridas para a proteção das pessoas, equipamentos e o ambiente de danos e ferimentos. As funções de proteção podem ser classificadas como:

  - Funções de Segurança: Servem para prevenção de acidentes ou redução de conseqüências para as pessoas.

  - Funções Ambientais: São as funções que assegura sistemas de antipoluição durante uma operação normal.

  - Funções de Higiene

- **Funções de Informação**: Essas funções compreendem as condições de monitoramento, além de vários tipos de medições e alarmes.

- **Funções de Interface**: São as funções aplicáveis para interfaces entre um item em questão e outro item. As interfaces podem ser ativas ou passivas. Uma interface passiva é, por exemplo, presente quanto um item serve como suporte ou base para outro item.

- **Funções Supérfluas**: De acordo com Moubray (2000): Itens ou componentes são as vezes encontrados como sendo completamente supérfluos. Isso acontece quando o equipamento é modificado freqüentemente diversas vezes por períodos longos, ou quando novos equipamentos são super especializados. Funções supérfluas estão as vezes presentes quando o item foi desenvolvido para um contexto de operação que é diferente do contexto atual de funcionamento. Em alguns casos de falha de funções supérfluas podem causar a falha de outras funções.

Esses casos não são necessariamente disjuntos. Algumas funções podem ser classificadas em mais de um dos casos.

1.2.2. Falha, Falta e Erro

Comumente confunde-se a utilização dos termos falha, falta e erro. Porém cada termo possui uma definição própria, algumas vezes conflitante, porém na analise de um sistema é muito importante distinguir a diferença entre cada um. A diferença entre os termos pode ser observada na Figura 1.

De acordo com IEC 50(191) *erro* é a “discrepância entre o valor computado, observado ou mensurado e o verdadeiro valor especificado ou teoricamente correto”. Um erro não é ainda considerado uma falha por ainda se encontrar dentro dos limites aceitáveis de desvio de performance, pode ser também referido como uma falha inicial.

De acordo com IEC 50(191) *falha* é: “o evento que ocorre quando a função requerida é terminada (excede os limites aceitáveis)”, enquanto que *falta* é: “o estado de um item que é caracterizado pela inabilidade de performance quando sua função é requerida, excluindo-se a inabilidade durante manutenção preventiva ou outra ação planejada, ou devido à falta de recursos externos”.

1.3. Modo de Falha

Modo de falha é descrição da falha, isto é como nos observamos a falha. Modo de falta deveria ser o termo mais apropriado do que modo de falha. IEC 50(191) desaprova o uso do termo “modo de falha”, e deste modo denota FMEA como modos de falta e efeito, enquanto BS 5760 argumenta que o antigo termo analise de modo de falha e efeito seja mantido para se alinhar à versão atual da IEC 812 a qual é amplamente aceita.

Para melhore entendimento do trabalho, durante o seu desenvolvimento, será utilizada a definição de falha em vez de falta.

1.3.1. Identificação dos modos de falha

Para podermos identificar os modos de falha é preciso estudar as saídas de várias funções. Algumas funções podem possuir muitas saídas. Algumas saídas podem possuir uma definição bem restrita. Em alguns casos pode-se determinar a saída de uma função como sendo um valor nominal com limites de tolerância. A conseqüência do desvio do valor nominal pode ser a função de comprimento de desvio.

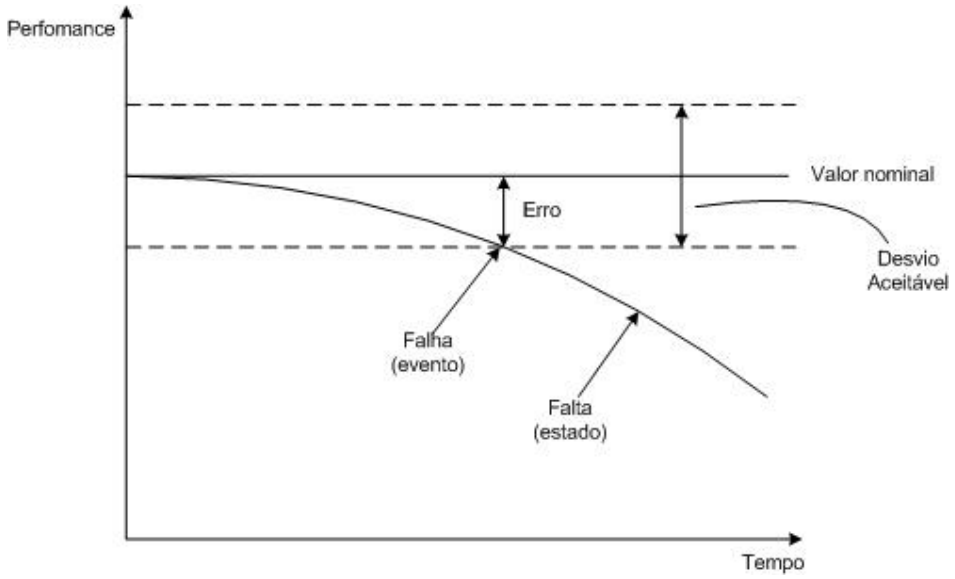


Figura 1 - Ilustração da diferença entre falha, falta e erro.
Fonte: Rausand & Oien (1996)

Se considerarmos uma válvula de segurança como exemplo, poderíamos entender como se esta válvula possa ser fechada no menor tempo possível, mas não tão rápido que possa levar à quebra da mesma. Então seria razoável identificar um valor de variação de tempo de fechamento aceitável, para que não quebrasse a válvula e também permitisse uma rápida

resposta do sistema a uma adversidade. Exemplos de modos de falhas para este caso poderia ser fechamento muito lento, fechamento muito rápido, ou não fechamento por completo.

1.3.2. Tipos modos de falha

Os modos de falha podem ser classificados de três modos relacionados ao item.

- **Perda Total de Função**: Neste caso a função não é exercida por completo, ou a desempenho esta bem abaixo do que se considera aceitável.
- **Perda Parcial de Função**: Este grupo pode ser bastante extenso, e representar o que pode ser uma gradativa perda por desgaste operacional.
- **Função Errônea**: Isto significa que a performance do item em ação não é que foi pretendida, freqüentemente a oposta do que foi prevista anteriormente.

1.3.3. Esquemas de Classificação de modos de falha

De acordo com Rausand & Oien (1996) pode-se classificar os modos de falha da seguinte maneira:

- Falhas intermitentes: É a falha que resulta na perda de algumas funções apenas por um período muito curto de tempo. O item irá reverter a sua condição para operacional imediatamente após a falha.
- Falha Prolongada: Falhas as quais resultam em perda de algumas funções que irão continuar até que algumas das partes sejam substituídas ou reparadas. As falhas prolongadas podem ser classificadas como:
  - Falha completa: falhas que causam a perda total da função requerida.
  - Falha parcial: Falha que leva a perda de algumas funções, mas que não causa a perda completa da função requerida.

Porém ambas falhas podem ser classificadas em:

- Falhas Repentinas: São falhas que não são previstas em testes ou exames.
- Falhas Graduais: São falhas que são previstas através de testes e exames. A falha gradual pode ser representada como a o caminho seguido a te saída dos limites de performance especificados.

1.4. Mecanismo de Falha, Modo de Falha, e Efeito de Falha

A definição de sistemas, subsitemas e componentes relativos, dependem do contexto pretendido da análise. O sistema é a estrutura por completo que é estudada, a qual possui subsistemas, que por sua vez são formados por componentes.

Os conceitos básicos como Mecanismo de Falha, Modo de Falha, e Efeito de Falha, são muito importantes para a construção da árvore de falha, bem como a utilização de outras técnicas.

Efeito de Falha	Modo de Falha	Mecanismo de Falha
Interruptor falha para manter contato	- Contato Quebrado - Alta abrasividade de contato	Mecanismo de choque Corrosão
Condutor solenóide falha ao tocar	- Badalo do sino quebrado ou não conectado. - Badalo Preso. - Ligação da solenóide quebrado ou preso. - Força insuficiente no magneto.	- Obstrução - Corrosão - Circuito Aberto na solenóide - Pouco Circuito na solenóide
Baixa voltagem da bateria	- Sem eletrólito - Pólo positivo quebrado	- Fissura na carcaça - Obstrução

Tabela 2 – Analise de Falha em um despertador

Fonte: Stamatelatos (2002)

2. DIAGRAMA DE BLOCOS

São freqüentemente utilizados na prática para modelar o impacto das falhas (ou funcionamento) de componentes no desempenho do sistema. Um diagrama de blocos reflete a relação funcional entre os componentes do sistema, onde cada bloco corresponde a uma função desempenhada por um componente ou conjunto de componentes para o qual dispomos de dados de confiabilidade.

2.1. Sistema em série

O sistema em série assume que todos os n componentes independentes devem estar funcionando para que o sistema desempenhe s sua função apropriadamente;

Em suma: O sistema falha se qualquer um dos seus componentes falha;

A confiabilidade do sistema, $R_s(t)$, pode ser obtida a partir das confiabilidades de seus componentes.

A confiabilidade do sistema acima é a probabilidade de que todos os *n* "blocos" permaneçam operando durante a missão *t* do sistema.

$$R_s(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdots R_n(t) = \prod_{i=1}^{n} R_i(t) \tag{2}$$

A confiabilidade de um sistema em série nunca é maior do que a menor confiabilidade de seus componentes constituintes.

$$R_S(t) \leq \min\left\{R_1(t), R_2(t), ..., R_n(t)\right\} \tag{3}$$

Taxa de Falha ou força de Mortalidade Instantânea, $h(t)$: é a probabilidade de falha por unidade de tempo do componente (ou sistema) uma vez que o mesmo tenha operado até o instante *t*:

$$H(t) = -\frac{d \ln R_i(t)}{dt} \tag{4}$$

A taxa de falha para um sistema em série é:

$$\lambda_s(t) = -\frac{d \ln \prod_{i=1}^{n} R_i(t)}{dt} = \sum_{i=1}^{n} \frac{-d \ln R_i(t)}{dt} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i(t) \tag{5}$$

Assumindo que a taxa de falha para cada "bloco" seja constante(isto é, assumindo uma distribuição exponencial de falha para cada componente). Então,

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \tag{6}$$

Quando todos os componentes em série possuem taxa de falha constante, o sistema também possui taxa de falha constante.

A confiabilidade de um sistema em série com taxa de falha constante é:

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^{n} e^{(-\lambda_i t)} = e^{\left(-t\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\right)} = e^{(-\lambda_s t)} \tag{7}$$

2.2. Sistema em Paralelo

No sistema em paralelo é necessário que pelo menos um dos componentes esteja operando.

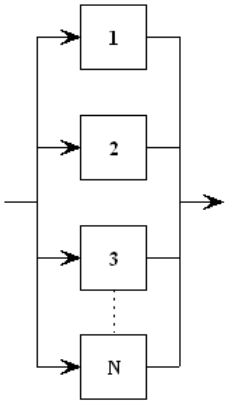


Figura 2 - Sistema em paralelo

2.3. Sistemas complexos

São sistemas que possuem em sua composição elementos em série e em paralelo.

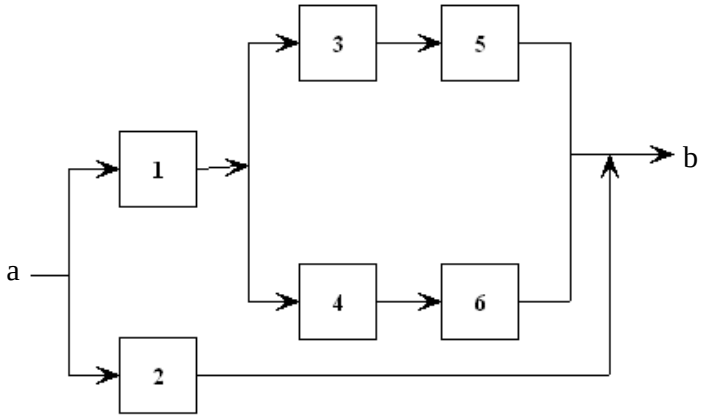


Figura 3 – havendo *conexão entre os pontos a e b diz-se que o modo de falha representado não ocorre.*

3. ÁRVORE DE EVENTOS

Originalmente a Árvore de Eventos (AE) foi desenvolvida para a análise de confiabilidade de sistemas, podendo ser usada tanto em estudos de confiabilidade de hardware quanto em estudos de confiabilidade humana. Como uma técnica de análise, a árvore de eventos pode ser utilizada tanto para observar a seqüência de ações que podem suceder-se, quanto para identificar o possível ponto final e conseqüências que possam advir.

A AE possui a forma de um diagrama constituído por nós e *links*, onde os nós representam entidades ou estados da seqüência de ações. Enquanto que as linhas interligam as entidades, indicando o sentido da seqüência.

Existe dois caminhos básicos que cada estado pode seguir, o sucesso ou a falha, sendo geralmente ambos analisados. Pode ocorrer ainda ocorrerem estados intermediários que não são factíveis ou não são possíveis de ocorrer, caso ocorra certos estados anteriores (em forma de sucesso ou falha), neste caso é possível pular a seqüência e seguir próximo que seja possível.

Árvore de Eventos mostra a importância relativa de diferentes tarefas e erros e ela indica como acontece o impacto sobre a segurança e confiabilidade do sistema. Fornece ainda base para analise probabilística e como a probabilidade de cada ação é quantificada, ela fornece também a probabilidade que cada seqüência disponível e em ultima análise fornece o risco geral do sistema.

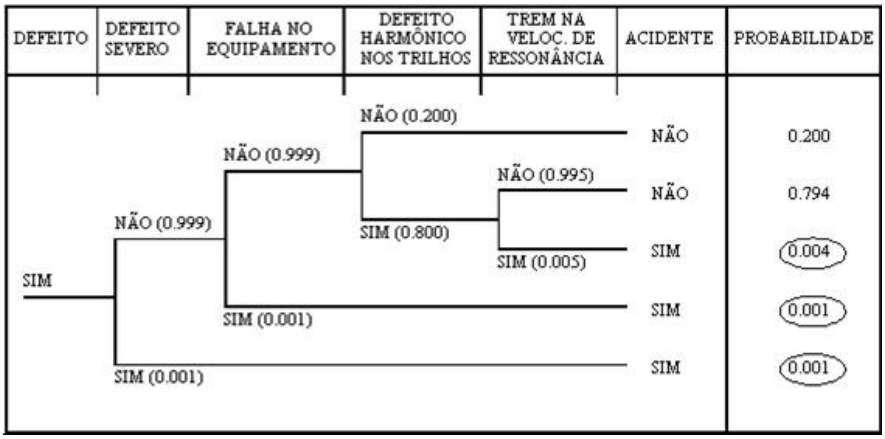


Figura 4 – Exemplo de aplicação de árvore de eventos para o caso de um descarrilamento de trem.

Fonte: TIZZEI

3.1. Aplicação

As árvores de eventos são usadas para representar graficamente as diferentes permutações da conduta do sistema ou, em analise humana do operador, quais as possíveis ações, procedimentos ou eventos tomados durante uma atividade, e com isso identificar os vários caminhos possíveis.

A árvore de eventos pode ser usada para identificar os eventos tarefas e erros que podem ter efeito sobre a segurança de todo o sistema.

Pode ser feita uma analise qualitativa na arvore de eventos por inspeção visual, ou uma analise quantitativa pelo calculo das probabilidades dos eventos das seqüências.

3.2. Descrição Técnica

A técnica utiliza com estrutura básica a árvore para representar graficamente os vários caminhos possíveis de uma atividade.

Cada ação, atividade ou ocorrência é posicionada em um nó, onde a ordem da posição (seqüência) deve seguir uma ordem lógica de ocorrência dos eventos.

Basicamente cada nó só permite duas possibilidades de sucesso ou falha, com isso o link segue para o evento seguinte onde o sucesso ou falha do nó é avaliado da mesma forma.

Existem casos onde um ou mais nós são não são levados em consideração na análise, isto é devido ao fato de que o evento descrito no nó não seja possível de ocorrer uma vez que o evento anterior é uma falha ou sucesso. Um exemplo disto é um sistema de segurança redundante.

Uma inspeção visual na árvore pode auxiliar a identificação de conseqüências severas.

A árvore de eventos é usada para fazer descrição forward (para frente) das conseqüências de erros.

Em árvore de eventos pode ser facilmente aplicada uma avaliação quantitativa no qual a probabilidade de cada seqüência é avaliada. Onde a probabilidade total de uma seqüência é estimada pela multiplicação das probabilidades dos passos integrantes ao longo do caminho de eventos seguidos na árvore. A análise quantitativa ainda permite ainda determinar as probabilidades para diferentes seqüências e com isso investigar o erro mais representativo identificado.

3.3. Cuidados a serem tomados ao construir a AE

A montagem árvore de eventos pode se tornar difícil para se atingir o nível apropriado de decomposição procurado dos eventos. Podendo muitas vezes tornar inviável, se muitos sub-eventos forem utilizados.

Uma forma pratica de identificar o maior nível de detalhamento no caso de tarefas é identificar os eventos no sistema como, detecção (alarme, etc.), identificação de uma resposta (interpretação e diagnostico de evento e/ou resposta requerida), implementação de uma resposta (resposta a um evento, recuperando o controle a um estado de segurança do sistema através de várias ações).

O nível de detalhamento, de cada sistemas, é limitado basicamente pelos recursos (tempo e dinheiro), pois só assim é possível chegar a descrição da física da falha de um dado item.

Podemos realizar uma análise qualitativa do sistema, com o intuito de gerar melhoria na confiabilidade do sistema por meio de equipamentos redundantes e etc.

Uma analise quantitativa pode ser feita principalmente através de bases comparativas (i.e. comparando o nível de risco das várias seqüências de eventos.).

3.4. Recursos Necessários

Caso a árvore de eventos seja quantificada serão utilizados outros recursos para auxiliar a análise. Devido a dificuldade de se fazer um detalhamento minucioso do sistema estudado através da árvore de eventos, é necessário a utilização de arvores falhas ou outra técnica que atinja o mesmo objetivo.

É necessário ainda conhecimento na teoria probabilística, para o caso de quantificação da árvore de eventos.

3.5. Link com Outras Técnicas

Em analise de tarefas o HTA (*Hierarchical task analysis*) fornece uma boa base para identificação de tarefas realizadas.

A identificação de erros e falhas podem ser obtidas por meio de técnicas como HAZOP, métodos de decomposição, questionário, modelos computacionais de simulação e FMEA.

A árvore de eventos pode ser suportada pela arvore de falhas, de maneira a descrever de que forma pode ocorrer a falha de um nó da seqüência, na árvore de eventos.

3.6. Vantagens

Como vantagens na utilização da árvore de eventos pode-se citar a lógica por baixo da árvore de eventos, que é geralmente baseada na seqüência de eventos, e como eles evoluem com o tempo, desta forma colaborando para um melhor entendimento do sistema como um todo.

A árvore de eventos fornece ainda uma interface com técnicas de analise de sistemas que são comumente utilizadas pelos engenheiros.

Facilita a identificação das falhas, das tarefas e erros, que são mais críticos e que tem grande impacto sobre a falha ou sucesso do sistema.

3.7. Desvantagens

Como desvantagens na utilização de árvores de eventos pode-se citar a dificuldade em representar seqüências muito longas de eventos, e no caso de analises de tarefas, quando a complexidade da conduta humana é freqüentemente, fornece apenas uma simplificação grosseira. Além do que para a montagem da árvore de eventos se faz necessário um conhecimento extremamente aprofundado do sistema a ser estudado (isso pode depender do nível de detalhe que se deseja).

4. ÁRVORE DE FALHAS

4.1. Análise da Árvore de Falha (AAF)

A análise da árvore de falhas (AAF) pode ser simplesmente descrita como uma técnica analítica. Onde um sistema é analisado em um contexto, onde o ambiente e operações sejam retratadas da maneira mais realística possível, onde o evento indesejável (evento topo) possa ocorrer.

A árvore de falha em si é um modelo gráfico com várias combinações seqüenciais e paralelas de falhas que podem resultar na ocorrência do evento indesejável. As falhas podem ser eventos que são associados com componentes de falha de hardware, erro humano, erro de software, através da utilização de portões lógicos AND/OR, ou qualquer evento pertinente o qual possa levar a um evento indesejável (evento topo).

A AAF é importante para entender onde todas possíveis falhas do sistema ou todas as possíveis causas para o sistema falhar. O evento topo corresponde a um particular modo de falha do sistema ou todas as possíveis causas para o sistema falhar. O evento topo corresponde a um particular modo de falha do sistema.

A árvore de falha representa apenas as causas de falhas que correspondem ao evento topo, é importante ressaltar que essas falhas não podem ser exaustivamente buscadas elas devem apenas representar as falhas que podem ser realmente entendidas e interpretadas pelo analista.

Outro ponto também importante é que a árvore de falhas não é um modelo quantitativo, e sim um modelo qualitativo, mas que pode ser desenvolvido para um modelo quantitativo e freqüentemente o é.

Tipicamente é considerado como potenciais causadores de acidente, falha de hardware, catástrofe ambiental,eventos estressantes, e erro humano

As árvore de falhas são ainda uma ferramenta poderosa de comunicação, devido a apresentação gráfica do relacionamento entre as causas potenciais de acidentes.

Pode-se ainda ser feita uma analise de sensibilidade para determinar a importância relativa de cada agente componente para o acidente.

A Árvore de Falhas pode ser ainda utilizada em analise de erro humano, para analisar as condições, fatores e mecanismos psicológicos que de forma isolada ou combinada resultam em um erro do operador.

Para tanto é utilizada álgebra Booleana para identificar o erro dominante e combinações de erros que mais contribuem em importância ao sistema estudado.

Em suma a árvore de falhas pode, a principio, ser aplicada para todos os estágios de desenvolvimento de um sistema.

4.2. Porta Lógica

É intrínseca à árvore de falhas o conceito de evento binário. A árvore de falha é composta de entidades complexas chamadas de “portas” que servem para permitir ou inibir a passagem da falha lógica “subir” a árvore. Os portões mostram as relações das necessidades dos eventos para a ocorrência do maior evento. O “maior” evento é a saída da porta e o “menor” evento é a entrada para o portão. O símbolo da porta denota o tipo de relação do evento de entrada requerida para a saída do evento (Ver seção 5).

4.3. Definição do Evento Topo

O evento topo direciona todo o resto da análise, se o evento topo é incorretamente definido a AAF será incorretamente conduzida, e com isso levar a decisões incorretas. Para uma correta definição do evento topo cabe uma correta definição dos objetivos da análise.

4.4. Árvore de Sucesso Como Complemento da Árvore de Falha

Desde que o sucesso e falha tenham sido descritos a árvore de falha pode ser transformada em uma equivalente Árvore do Sucesso (AS) no contexto da árvore de falha. Sucesso em uma árvore de sucesso é especificamente definida como a não ocorrência do evento topo. Quantitativamente falando é o complementar da probabilidade de falha encontrado na AF. A AS é um complemento lógico da AF, bem como o evento topo da árvore do sucesso é o complementar do evento topo dos eventos também o são. Por exemplo, se o evento topo da árvore de falha de uma válvula é “falhar em aberto” a árvore do sucesso será “não falhar em aberto”.

Além disso, a árvore do sucesso identifica o caminho mínimo do evento básico que necessita ser prevenido, em ordem, para a não ocorrência da falha do evento topo. Esse caminho mínimo dos eventos para a prevenção da falha do evento topo são denominados “*minimal path sets*”. Uma forma de melhor descrever o seu significado seria dizer que são os mínimos caminhos para a prevenção, desde que, claro, o evento indicado seja passível de

prevenção da ocorrência da falha do evento topo e classificar sucesso em termos de não ocorrência.

Os “caminhos mínimos de prevenção” provem valiosas informações de como a falha do evento topo possa ser prevenida sem a necessidade de quantificação. Além disso, a árvore do sucesso pode ser quantificada para fornecer a probabilidade de sucesso. Adicionalmente, cada Caminho mínimo pode ser quantificado para, com isso, priorizar o mais efetivo método de prevenção (freqüentemente em termos de custo para assegurar a prevenção). Habilidade para analisar o evento topo de ambas falhas (ocorrência) e sucesso (não ocorrência) aumenta o espaço de informações que podem ser obtidas destas árvores lógicas.

4.5. Desenvolvimento Quantitativo e Qualitativo da Árvore de Falha

Ambos, qualitativo e quantitativo, desenvolvimentos podem se desenvolvidas na AF. A árvore de falha em si é uma modelagem qualitativa dos eventos e suas relações que levam ao evento topo.

O desenvolvimento qualitativo basicamente transforma a lógica da árvore de falhas dentro de uma lógica equivalente para prover informações mais focadas.

Os principais resultados qualitativos são obtidos através dos cortes mínimos para o evento topo. A combinação dos cortes de evento básico podem resultar no evento topo. Os cortes mínimos refletem os eventos básicos diretamente para o elemento topo. Se fosse possível resumir em poucas palavras o significado dos cortes mínimos seriam certamente “o mínimo caminho para a falta/falha”. Os cortes mínimos não representam apenas o evento topo, mas podem representar qualquer evento intermediário.

Uma significante quantidade de informações podem ser obtidas utilizando-se as estrutura dos cortes mínimos. Todo corte mínimo possui um evento básico e identifica uma simples falha ou um simples evento. Essas simples falhas são freqüentemente relacionadas e são os focos para o melhoramento e ações de prevenção. Exemplos de simples falhas são os erros humanos ou a falha de um sistema.

Um corte mínimo possui eventos com características idênticas e susceptibilidade para implicar em falhas dependentes, ou causa comum, pode negar uma redundância. Um exemplo são os cortes mínimos de falhas de duas válvulas idênticas. Um simples defeito de fabricação ou reação adversa ao ambiente pode levar com que todas as válvulas falhem simultaneamente.

O desenvolvimento quantitativo da árvore de falha consiste na determinação da probabilidade do evento topo e a representabilidade dos eventos básicos ao sistema, como um

todo. Não obstante, pode-se quantificar os eventos e com isso fornecer estimativas mais precisas. Para tanto, faz-se o uso cálculo da probabilidade utilizando a álgebra booleana para determinar cada corte mínimo, por exemplo.

Os cortes mínimos são classificados pela probabilidade. Os cortes que contribuírem significantemente para a probabilidade do evento topo são chamados de cortes dominantes. Enquanto que a probabilidade do evento topo é o principal foco da análise, a probabilidade de qualquer evento intermediário da árvore de falha também pode ser determinada. Diferentes tipos de probabilidade podem ser calculados para diferentes aplicações. No mais, para valores constantes de probabilidade são tipicamente calculadas as relações de probabilidade e tempo, resultando na distribuição de probabilidade no tempo para a primeira ocorrência do evento topo. Freqüências do evento topo, falhas ou taxas de ocorrência, e disponibilidade também podem ser calculadas. Essas características são particularmente aplicáveis se o evento topo é a falha do sistema.

Na identificação dos cortes dominantes a importância dos eventos na árvore de falha são também a mais usual informação que pode ser obtida da quantificação da árvore de falha. Quantificando importâncias permite ações e recursos para serem priorizados de acordo com a importância dos eventos causando o evento topo.

A importância dos eventos básicos, os eventos intermediários, e os cortes mínimos podem ser determinadas e com isso tomar diferentes medidas para diferentes aplicações. Uma boa estimativa é medida para a contribuição de cada evento para a probabilidade do evento topo. Outra é o decréscimo da probabilidade do evento topo se, para o evento, forem tomadas medidas de prevenção. Uma terceira medida é o aumento da probabilidade do evento topo se o evento dominante ocorrer. Essas medidas de importância são utilizadas na priorização, prevenção, melhoramento, na manutenção e atividades de reparo.

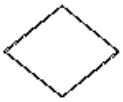
5. SIMBOLOGIA PARA A CONSTRUÇÃO DE AF'S

Como explicado anteriormente, a árvore de falha é um procedimento gráfico que ajudará na estimação de confiabilidade de um evento topo e, para isso, será necessária a descrição de alguns símbolos que ajudará na análise de ocorrência dos eventos falhos.

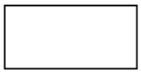
Basicamente a simbologia resume-se em três grupos: os eventos, os portões lógicos e as ligações ou transferidores. A seguir será descrito, de forma sucinta, alguns dos subtipos desses grupos que serão relevantes para o trabalho:

5.1. Eventos

Evento básico. Evento que não necessita de mais detalhamento;

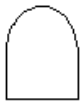


Evento incompleto. Evento que não é desenvolvido devido há não haver informações suficientes ou porque o mesmo apresenta pouca relevância de impacto no evento topo;

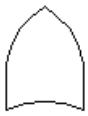


Evento intermediário. Evento resultante da combinação lógica de outros eventos e, geralmente, corresponde à saída de um portão lógico.

5.2. Portões Lógicos AND/OR



AND: O resultado só será verdadeiro se e somente se todos os eventos de entrada forem verdadeiros (ocorrerem). Na álgebra Booleana a saída deste portão representará a intersecção dos conjuntos;



OR: O resultado será verdadeiro se pelo menos um dos eventos de entrada for verdadeiro (ocorrer). Na álgebra Booleana a saída deste portão representará a união dos conjuntos.

5.3. Transferência

Transferência Para. Informa que a árvore é desenvolvida em outro local (página, ponto da árvore, etc.) no respectivo "transferidor de";

Transferência De. Informa que este ramo da árvore deve ser conectado ao respectivo "transferidor para".

6. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

6.1. Perfuração Marítima (*Offshore*)

No início da exploração em ambiente marítimo as Unidades de Perfuração Marítima (UPM) eram simplesmente sondas terrestres, montadas sobre estruturas, para perfurar em águas rasas. Não possuíam ainda sistemas de flutuação independente, sendo necessário a utilização de estacas terrestres. Neste contexto eram utilizadas as técnicas já utilizadas em ambiente *Onshore* (Terrestre), que por sua vez, funcionaram satisfatoriamente por algum tempo. Mas a necessidade de se perfurar em águas cada vez mais profundas fez surgir novos tipos de equipamentos e técnicas especiais orientadas especificamente à perfuração marítima.

Figura 5 – Estação semi-submersível de Exploração de Petróleo Offshore
Fonte: (2004)

Dentre os principais tipos de unidades de produção podemos citar basicamente dois tipos de UPM: as que possuem o sistema preventor na superfície, semelhante às plataformas fixas, como as auto-eleváveis, as submersíveis e as "*tension legs*", e as com sistema preventor submerso, conhecidas como unidades flutuantes, tais como os navios-sonda e as semi-submersíveis, que são o alvo do presente trabalho.

O emprego de cada um destes tipos fica condicionado à lâmina d'água (distância que vai do fundo do mar até a superfície da água), condições de mar, finalidade do poço, disponibilidade de apoio logístico e, principalmente, à relação custo/benefício.

6.1.1. Estações semi-submersíveis

São compostas principalmente de uma estrutura com um ou mais conveses, apoiada por colunas em flutuadores submersos.

As unidades flutuantes como, as estações semi-submersíveis sofrem movimentação devido a ação das ondas, correntes e ventos, com possibilidade de danificar os equipamentos a serem descidos no poço. Assim, é necessário que ela fique posicionada na superfície do mar, dentro de um círculo com um raio de tolerância ditado pelos equipamentos de subsuperfície, operação a ser executada e lâmina d'água. Dois tipos de sistemas são responsáveis pelo posicionamento da unidade flutuante: sistema de ancoragem e sistema de posicionamento dinâmico.

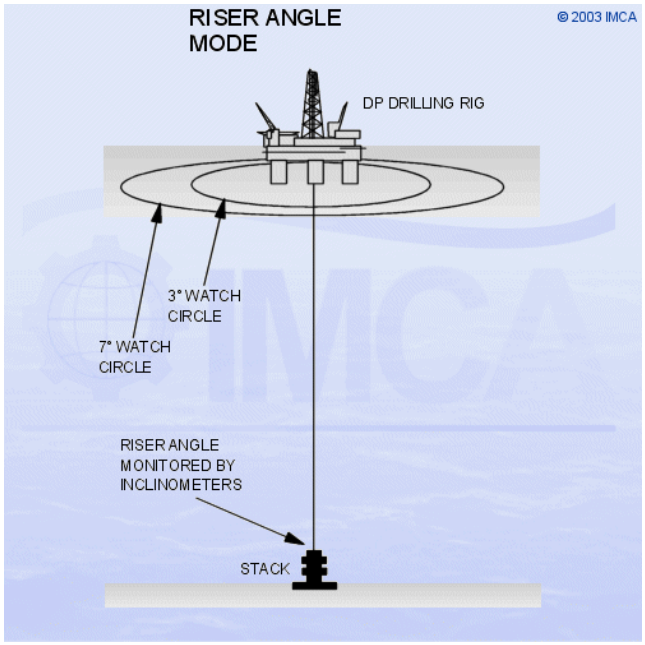


Figura 6 – Sistema de ancoragem para estações semi-submersíveis

Fonte: Imca (2004)

O sistema de ancoragem é constituído por 8 a 12 âncoras e cabos e/ou correntes atuando como molas que produzem esforços capazes de restaurar a posição do flutuante, modificada pela ação das ondas, ventos e correntezas.

O sistema de posicionamento dinâmico não existe física na UPM com o fundo do mar. Exceto a dos equipamentos de perfuração. Sensores de posição determinam a deriva e propulsores no casco acionados por computadores restauram a posição da plataforma.

6.2. Completação

Ao término da perfuração de um poço, é necessário deixá-lo em condições de produção, de forma segura e econômica. Denomina-se completação o conjunto de operações destinadas a equipar o poço para produzir óleo ou gás (ou injetar fluidos nos reservatórios).

Para isto o processo de completação obedece a uma seqüência de operações a serem seguidas. Logo após a instalação dos equipamentos na superfície, ocorre o condicionamento através da substituição do fluido existente dentro do poço pelo fluido de completação, procedendo com a cimentação para gabaritar o poço.

Todo esse processo passa por constantes avaliações quanto à qualidade do serviço. Em seguida é instalada a coluna de perfuração, onde por meio dela será conduzido os fluidos até a superfície para finalmente pôr um o poço em funcionamento.

Dependendo do potencial produtor do reservatório, pode-se, vinculado às propriedades petrofísicas da rocha e das propriedades dos fluidos do reservatório, utilizar técnicas de estimulação química (acidificação), mecânica (fraturamento hidráulico) ou químico-mecânica, para se aumentar a produtividade do poço.

6.3. Fluidos de Perfuração

Os fluidos de perfuração são misturas complexas de sólidos, líquidos, produtos químicos e, por vezes até, gases. Do ponto de vista químico, eles podem assumir aspectos de suspensão, dispersão coloidais ou emulsão, a depender do estado físico dos componentes.

Os fluidos de perfuração devem ser especificados de forma a garantir uma perfuração rápida e segura. Como funcionalidades básicas podemos citar:

- Limpar o fundo do poço dos cascalhos gerados pela broca e transportá-los até a superfície;
- Exercer pressão hidrostática sobre as formações de modo a evitar o influxo de fluidos indesejáveis (“*kick*”);
- Resfriar e lubrificar a coluna de perfuração e a broca;

É desejável que o fluido apresente as seguintes características:

- Ser estável quimicamente;
- Estabilizar as paredes do poço, tanto mecânica, quanto quimicamente;

- Facilitar a separação dos cascalhos quando estiver em repouso;
- Ser inerte em relação às rochas produtoras;
- Aceitar qualquer tratamento, físico e químico;
- Ser bombeável;
- Apresentar baixo grau de corrosão e de abrasão em relação à coluna de perfuração e demais equipamentos do sistema de circulação;
- Facilitar as interpretações geológicas do material retirado do poço;
- Apresentar custo compatível com a operação;

6.4. "*Kicks*"

6.4.1. Formações de pressões normais e anormais

Uma formação é dita de pressão normal quando sua pressão de poro for equivalente à pressão hidrostática exercida por uma coluna de água doce ou salgada que se estenda desde a formação até a superfície. Portanto, o gradiente de pressão do fluido contido em seus poros poderá ter um valor compreendido entra o da água doce (0.1 kgf/cm^2/m) e o da água salgada (0.107 kgf/cm^2/m). Quando o gradiente da formação estiver fora destes limites diz-se que a pressão é anormal.

Diversos fatores podem ser associados a esse fenômeno como, por exemplo, compactação, movimentos tectônicos, rapidez da taxa de deposição, intercomunicação de zonas de pressões diferentes, movimentos ascendentes, etc. Para isso foram desenvolvidas técnicas especiais que permitem a sua detecção e avaliação, tais como métodos geofísicos, parâmetros de perfuração, parâmetros de fluido de perfuração, análise dos cascalhos, perfilagem, etc.

6.4.2. Causas de "*Kick*"

Uma das principais funções do fluido de perfuração é exercer pressão hidrostática sobre as formações a serem perfuradas pela broca. Quando esta pressão for menor que a pressão dos fluidos confinados nos poros das formações e a formação for permeável, ocorrerá influxo destes fluidos para o poço. Se este influxo for controlável diz-se que o poço está em *kick*; se incontrolável diz-se que está em "*Blowout*". Já quando os fluidos do poço fluem de forma

descontrolada para outra formação exposta do poço, isto, denomina-se "*Underground Blowout*". Em termos gerais, são assumidos como os maiores contribuintes para o risco de atividades *offshore*.

Dentre algumas causa comuns da ocorrência do "*kick*" são citados:

- Peso de fluido de perfuração insuficiente;
- Abastecimento incorreto do poço durante a manobra;
- Pistoneio (retirada da coluna de perfuração);
- Fluido de Perfuração cortado por gás;
- Perda de Circulação;
- Cimentação Inadequada;
- Outras causas;

6.4.3. Indícios de *Kick*

Há vários indícios que indicam um potencial *kick*. Quando previamente reconhecidos e interpretados, eles permitem que sejam tomadas providências apropriadas para se evitar o ganho de grande volume de fluido. Os principais indícios de *Kick* são:

- Aumento de volume nos tanques de fluido de Perfuração;
- Aumento de vazão de retorno;
- Poço em fluxo com bombas desligadas;
- Diminuição da pressão de bombeio e aumento da velocidade da bomba;
- Poço aceitando menos fluido de perfuração que o volume de aço retirado;
- Poço desenvolvendo mais lama que o volume de aço que desce no seu interior;
- Aumento da taxa de penetração, provocado por um desbalanceamento entre as pressões de poro da formação e hidrostática da lama, causando um esforço no sentido, formação-poço, que auxilia a ação da broca;
- Corte do fluido de perfuração por gás, óleo ou água.

Diz-se que o fluido de perfuração sofre corte, pelo fluido contido nos poros de uma formação, quando o mesmo for liberado da formação ou dos cascalhos cortados pela broca, passando a incorporar-se ao fluido de perfuração.

6.4.4. Formas de controle do *Kick*

Para haver um controle efetivo dos *kick* são utilizados alguns parâmetros, como leitura das pressões nos manômetros quando o poço é fechado, e o volume ganho nos tanques. Com isso em mãos poder avaliar possíveis soluções de controle.

A operação de controle do poço consiste em circular o fluido invasor para fora do poço e aumentar o peso do fluido de perfuração para evitar um novo *kick*.

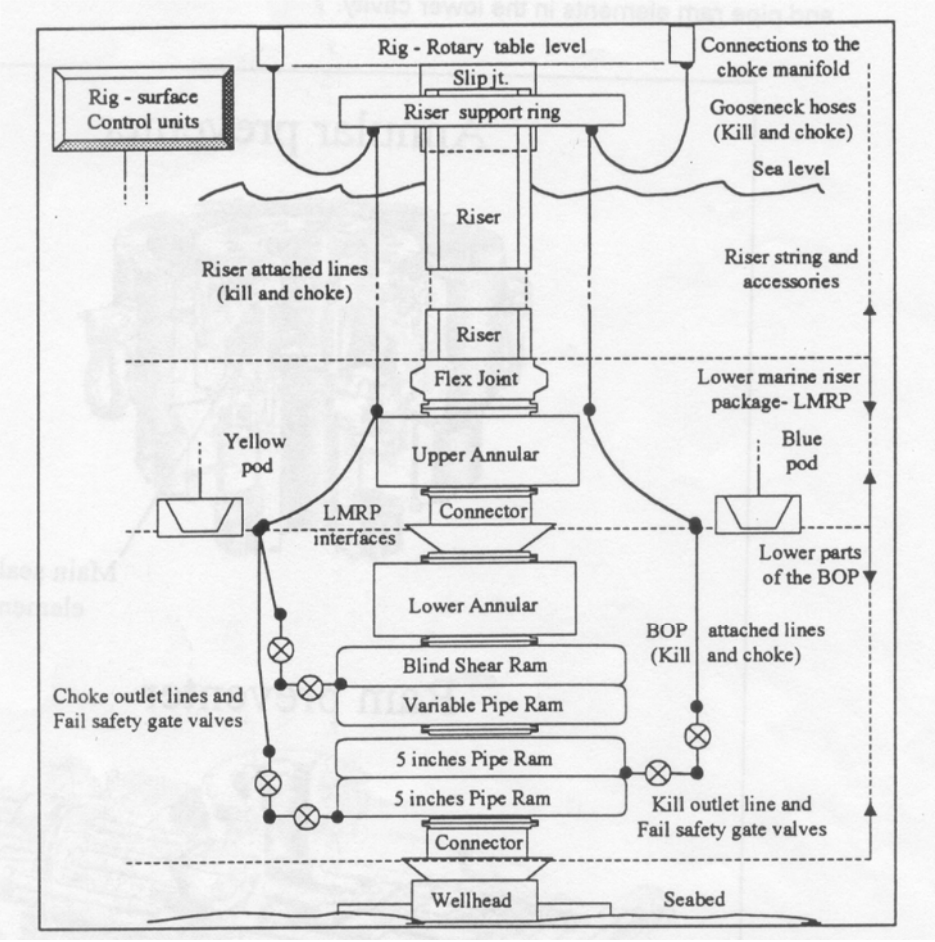


Figura 7 – Esquema submerso típico de uma estação de petróleo

Fonte: Jorge (2000)

6.5. Conector Hidráulico LMRP

O conector hidráulico *Lower Marine Riser Package* (LMRP) representa um equipamento que exerce principalmente a função de interface entre o *Riser* e o Conjunto de Preventores inferiores. Ele é exigido em caso de haver desconexão do *Riser* e atua como um bloqueio ao fluxo do de fluido existente entre os tubos, caso haja uma necessidade de deslocamento emergencial da plataforma.

6.6. Blowout Preventers

A perfuração em ambiente *offshore* associada às atividades realizadas em uma estação de o petróleo flutuante envolve riscos, os quais podem ser majorados devido a escape ou exposição de fluídos inflamáveis provenientes da exposição de rochas durante a perfuração. As conseqüências possíveis incluem perda de vidas humanas, perda de materiais, custo para normalizar a situação e algumas vezes uma significante poluição ao ambiente. Os *Blowout Preventers* (BOP's) submarinos são equipamentos de segurança principalmente preparados para enfrentar estes elementos. Toda estação flutuante é equipada com um conjunto de BOP's, normalmente com dois preventores anulares e três ou quatro de gaveta (Ver Figura 7). O equipamento é submerso até o leito do mar e instalado no topo dos vãos de óleo e gás funcionando como um sistema *standby* de segurança durante a maior parte da perfuração ou fase de completação.

O BOP é inicialmente projetado para controlar os *kicks* através de numerosas barreiras mecânicas para suportar altas pressões, capazes de fechar o poço em diversas condições de operação. Desde o fechamento do poço por causa de um *kick* até para situações em que o fluxo deve ser interrompido para limpeza do fluido de perfuração que foi contaminado pelo petróleo devido ao *kick*. Isso pode ser feito através da utilização de duas linhas de alta pressão chamadas *Kill* e *Choke* que são conectadas ao BOP submerso.

6.6.1. BOP Anular

O BOP anular tem a função básica de fechar o espaço anular de um poço, com ou sem coluna de perfuração. Sua maior utilidade é a flexibilidade em suportar qualquer diâmetro de tubulação, podendo até mesmo fechar um poço sem coluna.

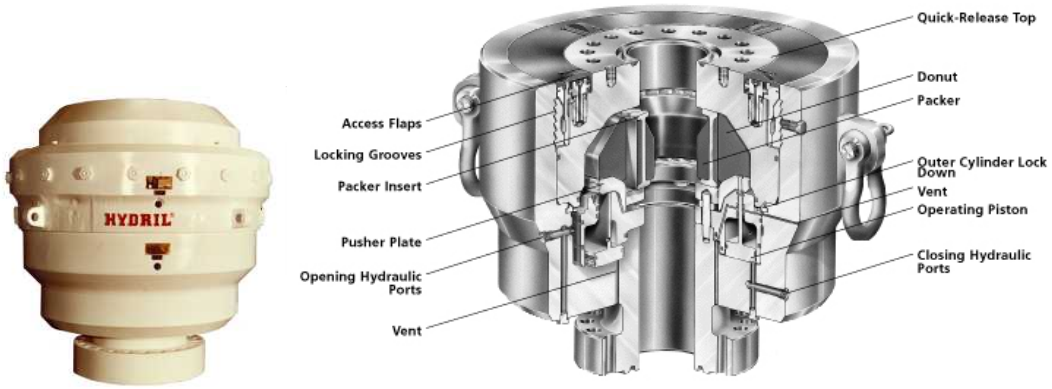


Figura 8 – BOP Anular típico

Fonte: Hydril (2004) e Cameron (2004)

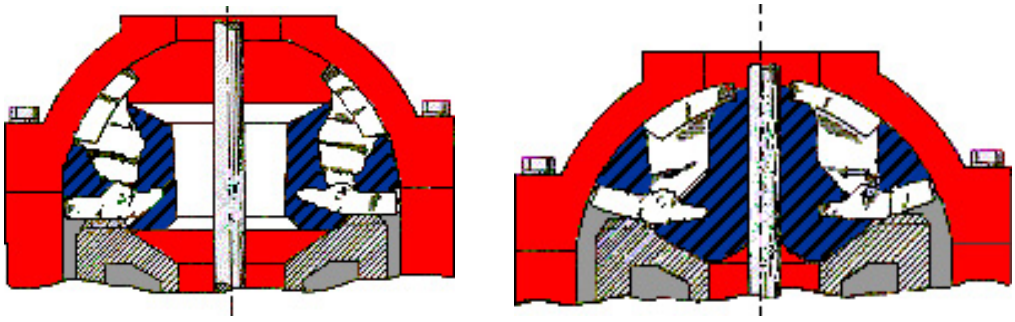


Figura 9 –Estágios de operação do BOP anular com coluna de perfuração

Fonte: Melco (2004)

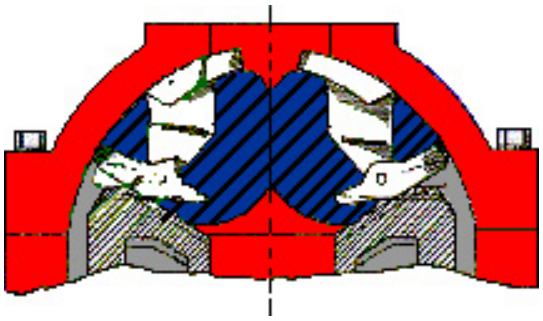


Figura 10 - Estágio final de operação do BOP anular sem coluna de perfuração

Fonte: Melco (2004)

Em seu interior possui um pistão que, ao ser deslocado comprime o elemento de borracha contra a coluna de perfuração, fechando o espaço anular da tubulação. Caso não haja coluna de perfuração, o elemento de borracha pode sofrer danos. Este processo é descrito nas Figura 9 e 10 acima.

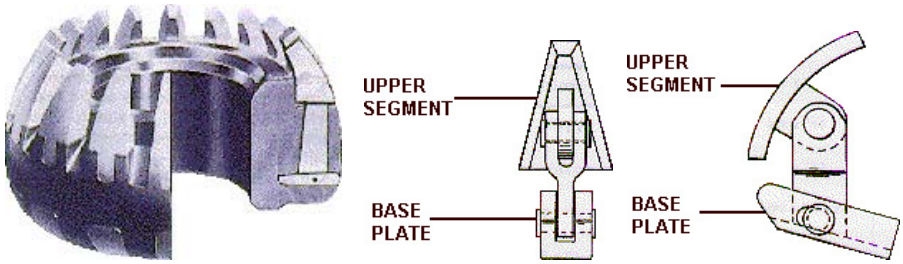


Figura 11 – Elementos de Borracha e Metálicos do sistema principal de atuação do BOP anular. Fonte: Melco (2004)

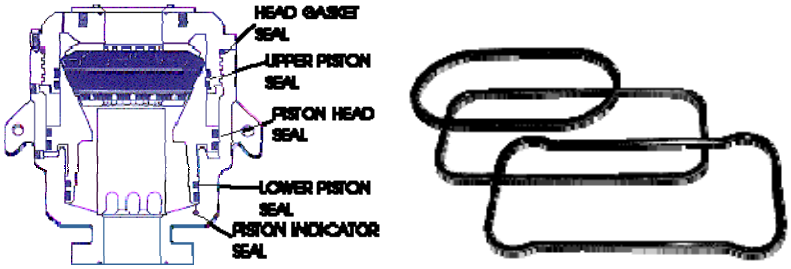


Figura 12 – Ponto de Vedação de um BOP anular (E), Selos (D)

Fonte: Melco (2004)

Como anteriormente foi comentado o BOP possui em seu interior diversas barreiras de contenção de fluidos, capazes de suportar elevadas pressões.

6.6.2. BOP Gaveta

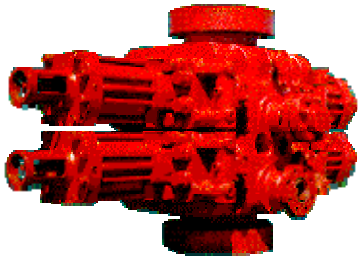


Figura 13 - BOP tipo Gaveta ou RAM

Fonte: Melco (2004)

O BOP tipo Gaveta possui a mesma funcionalidade do BOP anular, porém possui um modo de atuação diferenciado.

São deslocadas duas gavetas, por meio de dois pistões que atuam transversamente ao eixo do poço. Estas gavetas são equipamentos compostos de metais com elementos de borracha, que a depender do diâmetro do diâmetro da coluna de perfuração, fecham o espaço anular do poço.

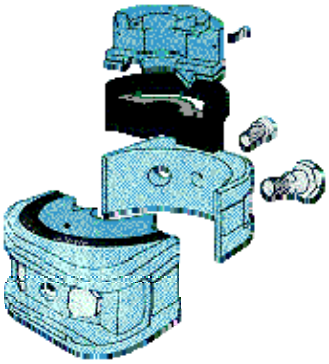


Figura 14 – Detalhe de montagem do sistema de bloqueio utilizado pelo BOP gaveta
Fonte: Melco (2004)

Além de possuir as *Outlet Lines* que permitem a conexão com os *Kill e Choke lines*, permitindo a sua limpeza em caso de contaminação.

Em uma configuração típica de BOP's gaveta em ambiente *offshore*, encontramos três diferentes tipos configurações de BOP gaveta, são elas: 5" *pipe Ram*, *Variable pipe RAM* e *Blind Shear RAM*.

6.6.2.1. 5" *pipe Ram* e *Variable pipe Ram*

5" *pipe Ram* é um BOP gaveta que trabalha com canos de diâmetro variando de 2 – 3/8" até 5", que são os mais usados e perfuração. Enquanto que o *Variable pipe Ram* é um BOP gaveta que se ajusta a diferentes diâmetros de colunas de perfuração.

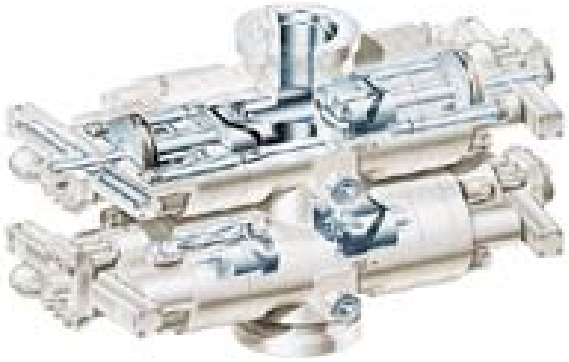


Figura 15 - BOP Gaveta duplo, equipado com Blind-shear RAM na sua parte superior e com o Pipe RAM na parte inferior
Fonte: Cameron (2004)

6.6.2.2. Blind Shear Ram

Este BOP gaveta representa um fator de grande importância. Uma vez que ele é responsável pela função vedação do poço caso seja necessário em alguma emergência. Porém o *Blind Shear Ram* não é preparado para cortar o fluxo de certos tubos ou ferramentas utilizadas na perfuração, logo não está preparado para exercer satisfatoriamente sua função básica em qualquer etapa de perfuração.

6.6.3. Manutenção dos BOP's

Como a maior parte dos equipamentos utilizados em uma estação de exploração de Petróleo, o BOP terá durante sua vida útil que passar por diversos poços, para isso necessita de constantes manutenções e inspeções em seus componentes e subsistemas antes que seja novamente utilizado em outros poços. Para que o BOP possa ser instalado novamente em outro poço ele deve ter cumprido toda a sistemática de avaliação até que o poço seja completado.

Assim como muitos equipamentos, o BOP, até que entre em operação, possui a maior parte das falhas ainda ocultas. Por isso, a disponibilidade do BOP pode ser conhecida por meio de testes antes e logo após sua instalação no fundo do mar, analisando em períodos regulares e priorizando a analise dos potenciais riscos da operação.

Muitos testes do BOP podem ser conduzidos sob diversas condições, porém existem elementos ou funções que não podem ser substituídas enquanto o BOP esteja submerso, posicionado na cabeça do poço. Logo, a disponibilidade das funções não testadas, apenas requer umas possíveis inspeções prévias, que são conduzidas na superfície da estação antes de submergir o BOP.

6.7. Riser

Devido ao alto grau de liberdade dos movimentos da UPM durante as operações de perfuração, os revestimentos ficam apoiados no fundo do mar por intermédio de sistemas especiais de cabeça de poço submarino. Sobre estes, se conectam os equipamentos de segurança e controle do poço, sendo que o retorno do fluido de perfuração à superfície é feito através de uma coluna, chamada "*Riser*", que se estende até a plataforma.

Figura 16 – Riser em posição de operação

Fonte: Cameron (2004)

Se por alguma razão, a estação sofra algum dano, o sistema hidráulico dos conectores do BOP pode ser rapidamente ativado liberando o *Riser* e fechando as partes superiores do BOP e da cabeça do poço, isso pode prevenir a maior parte dos acidentes.

A possível conseqüência em desconectar o *Riser* é a redução da pressão hidrostática do poço, devido à perfuração ou o fluido de completação que esteja no *Riser* ser removido. Isso pode afetar a estabilidade do poço e leva ao *kick.* No entanto, barreiras mecânicas nas partes inferiores do BOP podem permanecer sob a cabeça do poço podendo fechá-lo, prevenido qualquer escape de fluidos para o ambiente até que as condições normais possam ser retomadas.

6.8. Cabeça do Poço

As cargas provenientes da ancoragem dos revestimentos intermediários e de perfuração são absorvidas pelo condutor e revestimento de superfície que, por sua vez, podem descarregar parte desta carga sobre bases especiais que trabalham como fundações submarinas para o poço. Sob estas fundações submarinas estão depositados equipamentos que permitem além a ancoragem e vedação das colunas de revestimento na superfície, funcionar também como um sistema de segurança que possibilita o fechamento e controle do poço. A este conjunto de sistemas dá-se o nome de Cabeça do Poço.

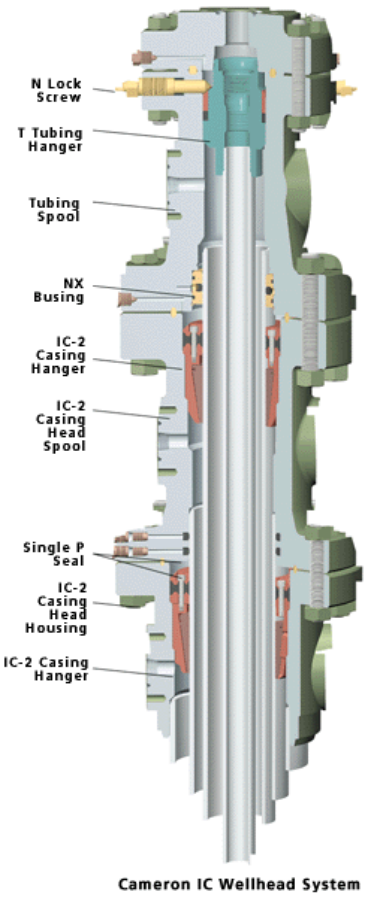


Figura 17 – Sistema da Cabeça do Poço

Fonte: Cameron (2004)

Ainda sobre a Cabeça do Poço são depositados equipamentos de segurança, como os BOP's, bem como os equipamentos de controle da produção. Além disso, após a completação do poço pode funcionar ainda como uma forma controle do poço durante a perfuração.

Os sistemas de cabeça de poço para unidades de perfuração flutuantes podem ser de dois tipos: Sistema com cabos guias ("*Guideline system*") e Sistema sem cabos guias ("*Guidelineless System*").

O sistema com cabos guias é o mais utilizado para perfuração de poços em lâminas d'água até cerca de 400m.

6.9. Kill Line e Choke Line

A linha de matar ("*Kill Line*") e a linha do estrangulador ("*Choke Line*"). São duas linhas de alta pressão conectadas ao BOP, que também possui instrumentos de alta pressão, ligados à múltiplas linhas de Choke ("*Choke Manifold*") na superfície da estação. Essas linha

possuem pequenos diâmetros (entrono de 3 ½") e são conectados lateralmente ao BOP gaveta em umas saídas chamadas "*OutLet Lines*" (Veja a Figura 18). Através destes dois pontos saem duas válvulas de segurança conectadas em série ao BOP gaveta aonde podem controlar o fluxo entre as linhas e o BOP.

Figura 18 – Detalhe das OutLetes Lines no BOP gaveta, onde são conectados as Kill e Choke Lines
Fonte: Melco (2004)

Na Figura 18 são mostrados duas *Outlet Lines* conectadas à *choke line*, uma instalada abaixo do *blind-shear ram* e outro logo abaixo do " 5" *pipe ram*" inferior enquanto que a *kill line* têm apenas uma conexão embaixo do " *5" pipe ram*" superior. Esta configuração é a mais comumente encontrada. Os BOP's mais recentes possuem 4 *Outlet Lines* conectadas em diferentes posições, com isso promovendo uma maior flexibilidade para a circulação e injeção de fluido para dentro e proveniente do BOP.

Figura 19 – Gooseneck
Fonte: Cameron (2004)

As *Kill Lines* e *Choke Lines* são conectadas aos *Risers* indo até a superfície onde são conectados à um equipamento chamado "*gooseneck extensions*" ou pescoço de ganso ou ainda cano curvo. Este por sua vez, é uma mangueira flexível que permitem uma certa movimentação entre a estação flutuante e o *Riser* fixado no BOP. Na superfície e além das

mangueiras estão outros elementos semelhantes ao *Choke line* que não foram explorados neste trabalho.

6.10. Sistemas de controle Multiplex (Main Control System)

Na superfície da estação todas as funções individuais e seqüenciais do BOP, em sua maioria, são controladas por pessoas, através de dois painéis de controle. O denominado Sistema de Controle Principal ("*Main Control Sistem*") não é automatizado, tendo suas funções sujeitas à intervenção humana. Inclusive os procedimentos para prevenção de *kicks*.Todavia, há um botão na estação que pode iniciar toda seqüência de emergência, se for necessário.

O Sistema de Controle Principal opera, nos equipamentos submersos, por meio de dois módulos independentes conectados na LMRP que são chamados de mochila Azul e mochila Amarela ("*Blue Pod*" e "*Yellow Pod*"), veja a Figura 20. Estes equipamentos trazem alguma redundância dando ganhos em confiabilidade. Basicamente no estagio final, onde são realizadas a as ações nos equipamentos, as partes móveis do BOP podem ser operadas hidraulicamente, mas diferentes tipos de sistemas de controles podem atuar ligados a estação e o fundo do mar. Hoje em dia existem três tipos de sistemas de controle: "*Pilot Hidraulic*", "*Pilot Hidraulic Pre-Charged*" e "*Eletric-Hidraulic Types*".

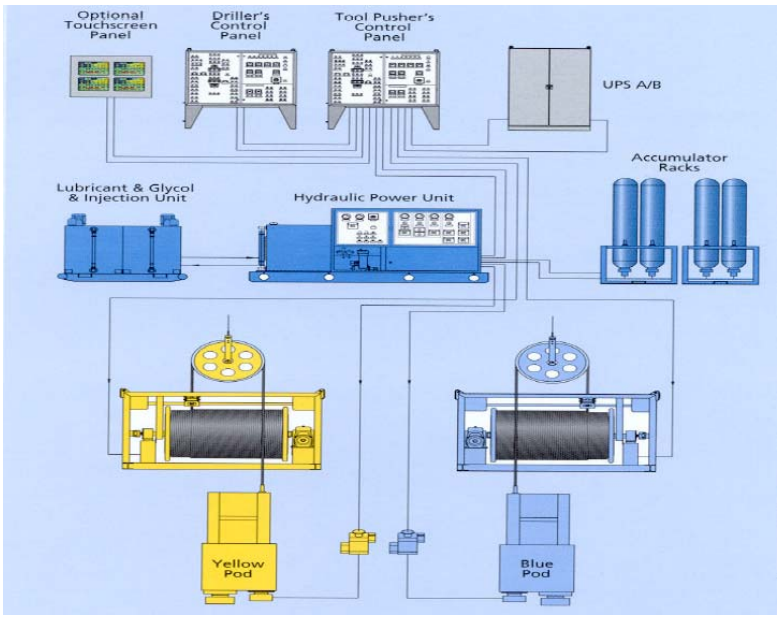


Figura 20 – Diagrama do sistema principal de controle do tipo Elétric-Hidraulic

Fonte: Cameron (2004)

6.10.1. Pilot Hidraulic

O sistema Piloto Hidráulico aparece como o mais usado em águas rasas, que vão até 700m. Neste sistema existem dois pacotes hidráulicos independentes do sistema hidráulico da superfície, um para cada um dos *pods*. Eles contêm linhas piloto para cada uma das funções do BOP e ainda uma linha hidráulica principal de suprimento. As funções do BOP são ativadas do painel de controle na estação, que por meio de um sinal hidráulico transmite as funções através da linha piloto até o controle principal de válvulas dos *pods*. Essa válvula é conectada ao *pod* principal. Uma vez que os controles da válvula são ativados, o fluxo do *pod* irá para a função requisitada do BOP. O tempo de resposta a estes comandos possui recomendações reguladas por órgão como, *American Petroleum Institute* (API) e *Norwegian Petroleum Directorate* (NPD).

6.10.2. *Pilot Hidraulic* Pré-Charged

Quanto mais fundo for, maior será o tempo de resposta para o Sistema de Controle Piloto Hidráulico, para corrigir tal discrepância de tempo de resposta em águas profundas algumas medidas são tomadas, uma delas é a utilização do Sistema de Controle Piloto Pré-Carregado. Que serve para melhorar o tempo de resposta. Os sistemas de Controle Pré-Carregados são usados em águas com profundidade entorno de 1200m. Indo mais além, o sistema Eletro-Hidráulico é a alternativa mais utilizada.

6.10.3. Eletric-Hidraulic

No sistema de controle Elétrico-Hidráulico, um sinal elétrico é mandado da superfície até o POD onde ele é convertido em um impulso hidráulico pelas válvulas solenóide (um tipo de condutor que cria um campo magnético quando passa por ele uma corrente). Essas válvulas solenóides ativam as válvulas piloto, as quais são conectadas às funções das válvulas principais no POD. O restante do processo é similar ao sistema hidráulico. Os *PODs* Hidráulicos são alimentados pela superfície através de linha ligadas às junções do *Riser*.

Os mais modernos sistemas mandam sinais em microprocessadores que possuem grande redundância para os comandos elétricos.

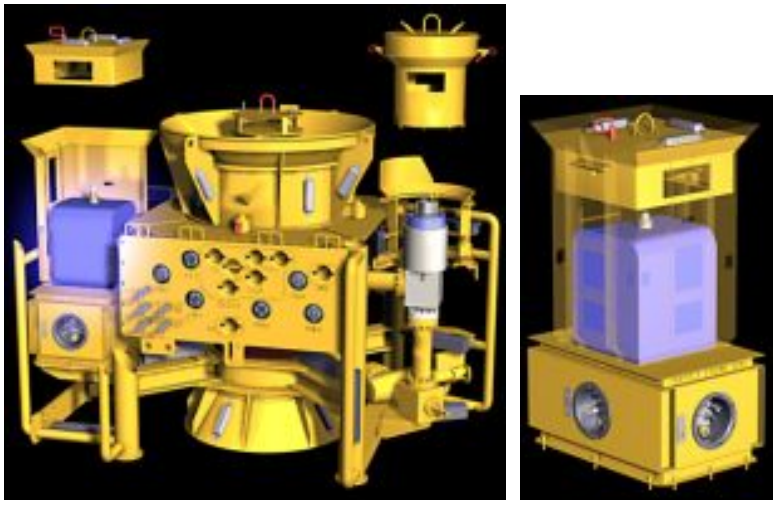


Figura 21 - Multiplex Eletric-Hidraulic
Fonte: Cameron (2004)

6.11. Sistema de Controle de Backup Acústico (*Acustic Backup Control System*)

Além do sistema principal de controle, algumas poucas funções de maior importância no BOP são controladas através de um sistema de controle acústico. Normalmente, o sinal acústico é transmitido abaixo da lâmina de águas, sob a estação, para o receptor montado nas partes inferiores do BOP. Esse receptor transmite um sinal hidráulico para o módulo, alimentado hidraulicamente pelas baterias dos acumuladores.

Caso ocorra uma emergência, na estação, existe um conjunto de controles acústicos, portáveis, que são preparados para transmitir o sinal da superfície caso a estação deva ser abandonada.

Normalmente ancoradas, as estações não possuem ou não mantêm um sistema de backup acústico, mas a maior parte das estações com posição dinâmica possuem. Além disso, alguns BOP's possuem facilidades de backup para ativar algumas poucas funções através de um veiculo remotamente operado (submarino), também conhecido como *remotely operated vehicle* (ROV).

Este procedimento não costuma ser muito utilizado, porém, esta habilidade pode ser importante em algumas circunstâncias, como quando o tempo de resposta tende a ser longo. Este sistema não pode ser considerado como uma redundância para outro equipamento de controle. Além de ser considerado pouco confiável. Talvez por causa do sistema de Backup para somente algumas funções, este sistema é ainda pouco utilizado.

6.12. Junção Flexível

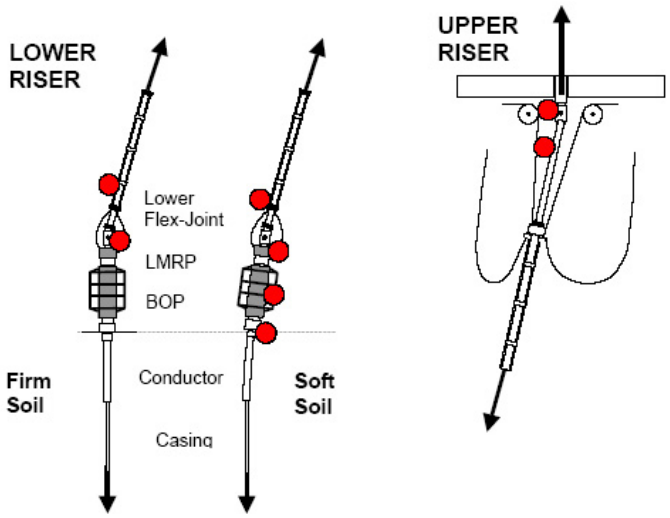


Figura 22 – Esquema mostrando como opera as junções flexíveis e os Risers

Como falado anteriormente, as estações semi-submersas possuem um sistema de posicionamento dinâmico em virtude da influencia das constantes mudanças climáticas sobre o deslocamento da estação. As junções flexíveis existem para controlar estas alterações de modo a não danificar os equipamentos que ficam abaixo de sua estrutura admitindo limites variações angulares entre a estação e o preventor instalado no leito do mar.

6.13. Válvula de Segurança

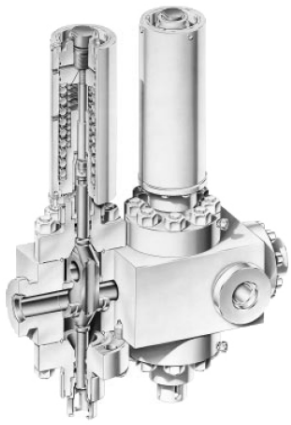


Figura 23 – Subsea Gate Valve

Fonte: Cameron (2004)

As válvulas de segurança são equipamentos que são instalados em série nas Linhas *Kill* e *Choke* que servem para controlar o fluxo entre as linhas de alta-pressão.

7. METODOLOGIA

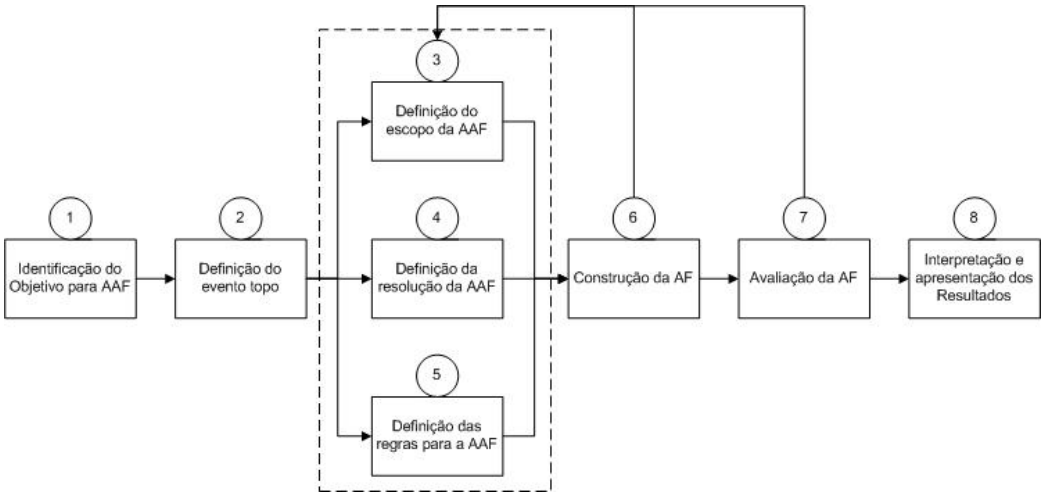


Figura 24 - Metodologia de criação de Árvores de Falha utilizadas pela NASA

Fonte: Stamatelatos (2002)

7.1. 1º Passo

A identificação dos objetivos pode aparentemente se tratar de uma tarefa elementar, porém existem casos onde a AF é desenvolvida, porém os objetivos não são satisfeitos.

Para alcançar o sucesso na análise, os objetivos devem ser descritos em termos de falha do sistema que será analisado.

No caso, o objetivo geral da analise é encontrar mecanismos de falha, dos componentes que formam o Preventor afim de que exerça, com sucesso, seu objetivo inicial de combater os *Kicks*, ou seja, uma falha típica para o estudo de caso seria o não funcionamento do preventor BOP.

7.2. 2º Passo

Definido o Objetivo da análise, o evento topo deve ser definido utilizando a mesma forma.

O evento topo da AF é o evento para onde as causa de falhas irão se desenvolver e com isso poder se determinar a probabilidade de falha dos sistemas. O evento topo define o modo de falha do sistema. Podendo ocorrer de o objetivo vincular a definição e analise de mais de uma falha, nestes casos, diferentes eventos são definidos.

No estudo de caso foi adotado o evento topo como sendo a “falha no sistema Preventor”.

7.3. 3º Passo

O escopo da AAF indica quais são as falhas e contribuições que serão incluídas, e quais não serão incluídas.O escopo da AAF também inclui as particularidades do projeto e o período histórico em que o equipamento foi analisado. Finalmente, o escopo inclui as condições de contorno para a analise, a condição de contorno inclui o estado inicial dos componentes e os inputs assumidos para o sistema.

Para a análise do preventor foi elaborada uma árvore de eventos retratando um cenário de um *Kick*, descrevendo as várias seqüências lógicas de atuação dos Preventores, de modo a impedir tal ocorrência. Para tanto, foram identificados 7 principais subsistemas que para maior detalhamento da investigação, foram elaborados em forma de árvore de falhas. Estes subsistemas são:

- Sistema de Controle Multiplex (Sistema de Controle Principal)
- POD
- BOP Anular
- Conector Hidráulico LMRP
- Sistema de Controle Acústico
- Linhas de *Kill* e *Choke*
- Válvula de Segurança
- BOP Gaveta

Em virtude da falta de dados completos sobre os modos de falha do Sistema Principal de controle, este equipamento não pode ser descrito em forma de árvore de falhas. No entanto, como contribuição deste trabalho (Ver Seção 8), foram descritas as Árvores de Falhas do POD, BOP Anular e Conector Hidráulico LMRP.

7.4. 4º Passo

Trata-se do nível de detalhamento onde as causas de falha do evento topo são desenvolvidas. Para isto, adota-se que o nível de detalhamento deva ser o suficiente para a

determinação da melhor estimação da confiabilidade, fornecendo melhores estimativas da probabilidade de ocorrência dos eventos ou o quanto for necessário para se avaliar o sistema em termos de risco.

O trabalho teve como nível máximo de detalhamento a descrição das causas de falha dos subitens do sistema preventor. Esta estimativa, apesar de não ter em seu desenvolvimento, a quantificação da árvore de falha, é bastante suficiente para uma boa determinação da probabilidade da ocorrência de *blowout*, uma vez que a base de dados para esta determinação existe, e é considerada por especialistas, suficiente.

7.5. 5º Passo

Define a regras utilizadas, como, procedimentos e nomenclaturas dos eventos e portas da AF. A modelagem inclui a maneira como específicos componentes falham, erro humano e causas comuns de falha, também fazem parte da análise.

A consecução deste trabalho não incluiu em sua análise o impacto da atividade humana sobre os equipamentos. Quanto às regras e procedimentos utilizados, veja maiores informações na seção 5.

7.6. 6º Passo

Neste passo é onde se constrói a árvore de falha e onde são aplicados os procedimentos, nomenclaturas, regras e escopo já definidos anteriormente.

Como dito anteriormente a árvore de falha foi construída com base nos possíveis cenários de ocorrência de um *blowout* dado que ocorreu um *kick*.

7.7. 7º Passo

É neste passo que ocorre a avaliação tanto qualitativa quanto quantitativa da AF.

A avaliação qualitativa fornece informações como cortes mínimos, caminhos do sucesso para o evento topo. Sets de sucesso podem ser definidos de forma a garantir a prevenção de ocorrências do evento topo. Os *cut sets* são geralmente classificados em função dos *cut sets* (o número de eventos no set), para fornecer informações em relação a combinação do evento básico que podem resultar no evento topo.

No desenvolvimento deste trabalho não foi abordada a determinação de cortes mínimos, porém a análise qualitativa pode ser melhor observada na Seção 9.

7.8. 8º Passo

O último passo trata-se da interpretação e apresentação dos resultados. Os resultados devem se interpretados para proverem implicações tangíveis, especialmente concordantes com os objetivos pretendidos.

Os resultados são apresentados e comentados a seguir.

8. RESULTADOS

O sistema preventor possui como função básica evitar a evolução de *kicks*, para com isso não permitir sua evolução até virar um *blowout* ou um *Underground Blowout*, que representa um evento ainda mais desastroso, uma vez que pode levar não só a perdas materiais e humanas, mas também podendo a levar a perda de poços circunvizinhos.

Para maior descrição e entendimento das causas de evolução de um *kick*, foi elaborado uma Árvore de Falha para o *kick*, como pode ser vista na Figura 25.

A análise do sistema preventor parte da necessidade em se analisar, por meio da Árvore de Eventos, a seqüência de eventos desenvolvidas pelos preventores para evitar o *kick*. Para isto, em Jorge (2000), é descrito o processo de evolução de um *kick* e a partir desta descrição unindo os conhecimentos adquiridos obtidos no curso e para execução deste trabalho, foi elaborada a Árvore de Eventos, ver Figura 26.

De modo a alcançar maior embasamento e entendimento das mais freqüentes causas e severidades de falhas dos equipamentos, foram elaboradas as árvores de falha dos eventos componentes da Árvore de Eventos, para com isso propor melhorias para o aumento da confiabilidade destes equipamentos. Este processo foi baseado na descrição dos modos de falha dos equipamentos individuais, descritos em Jorge (2000) em sua Análise de Modo de Falha e Efeito (FMEA) dos equipamentos dos sistemas preventores.

Neste trabalho são apresentadas apenas algumas Árvores de Falha, o restante pode ser observado em Barros Junior (2004).

8.1. Árvore de Falha

8.1.1. Preventor Anular

Jorge (2000) descreve através da fonte de dados obtida, a alta confiabilidade do Preventor Anular, pois dentro de uma população de 22 preventores não ocorreu nenhuma falha severa ao sistema (vazamento para o ambiente). Isto é devido à grande quantidade de barreiras que são responsáveis por essa baixa ocorrência.

Importante observar a ocorrência de uma má selagem do elemento principal, ocasionalmente encontrada na população estudada. Esta falha não quer dizer que haja a perda da função essencial do BOP. Uma vez que no caso deste tipo de BOP ele funcione como uma barreira à não propagação descontrolada de fluido, para então se ser cortado pelos equipamentos posteriores a eles. Então a ocorrência deste fato não denota uma grande preocupação para o comprometimento do sistema global.

8.1.2. POD

O POD é descrito em Jorge (2000) como um equipamento no qual a sua falha total, parcial ou severa, é considerada um modo de falha para o sistema principal de controle, uma vez que são eles os atuadores no sistema preventor. Em sua fonte de dados é descrita uma considerável probabilidade de falha deste equipamento, levando a conseqüências críticas ao sistema.

Dentro do sistema são postos dois PODs onde cada um pode exercer as mesmas funções do anterior, ficando um deles em *standby*, aguardando qualquer falha que limite a operacionalidade do outro. O POD pode falhar tanto tendo uma perda total de suas funções, podendo ainda acarretar em perdas severas ou até mesmo a perda de uma de suas funções.

8.1.3. Conector Hidráulico LMRP

Jorge (2000) em sua descrição dos modos de falha deste equipamento mostrara que dentro de uma população de 13 conectores avaliados o conector apresentou falha em aberto representando como uma causa ocasional, porém com severidade alta. A análise da árvore de falhas juntamente com a base de dados colhida mostra, uma dependência do vazamento hidráulico como devido a constantes correções de movimentação, denotando certa instabilidade na Plataforma de perfuração, que pode se um indício de falha no sistema de posicionamento dinâmico.

8.2. Árvore de Falhas do *Kick*

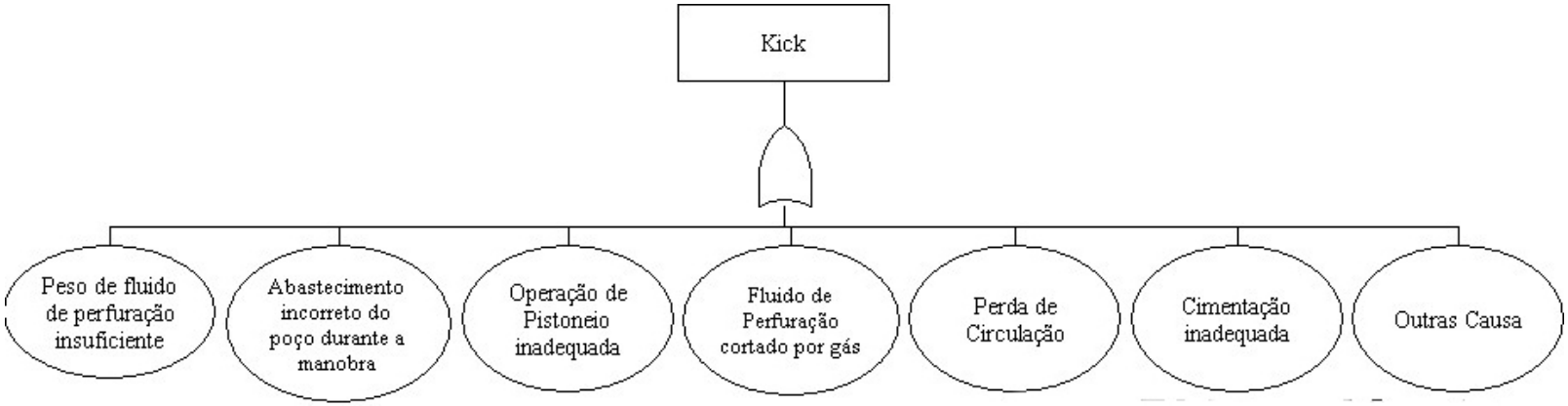


Figura 25 - Árvore de Falhas do Kick

8.3. Árvore de Eventos

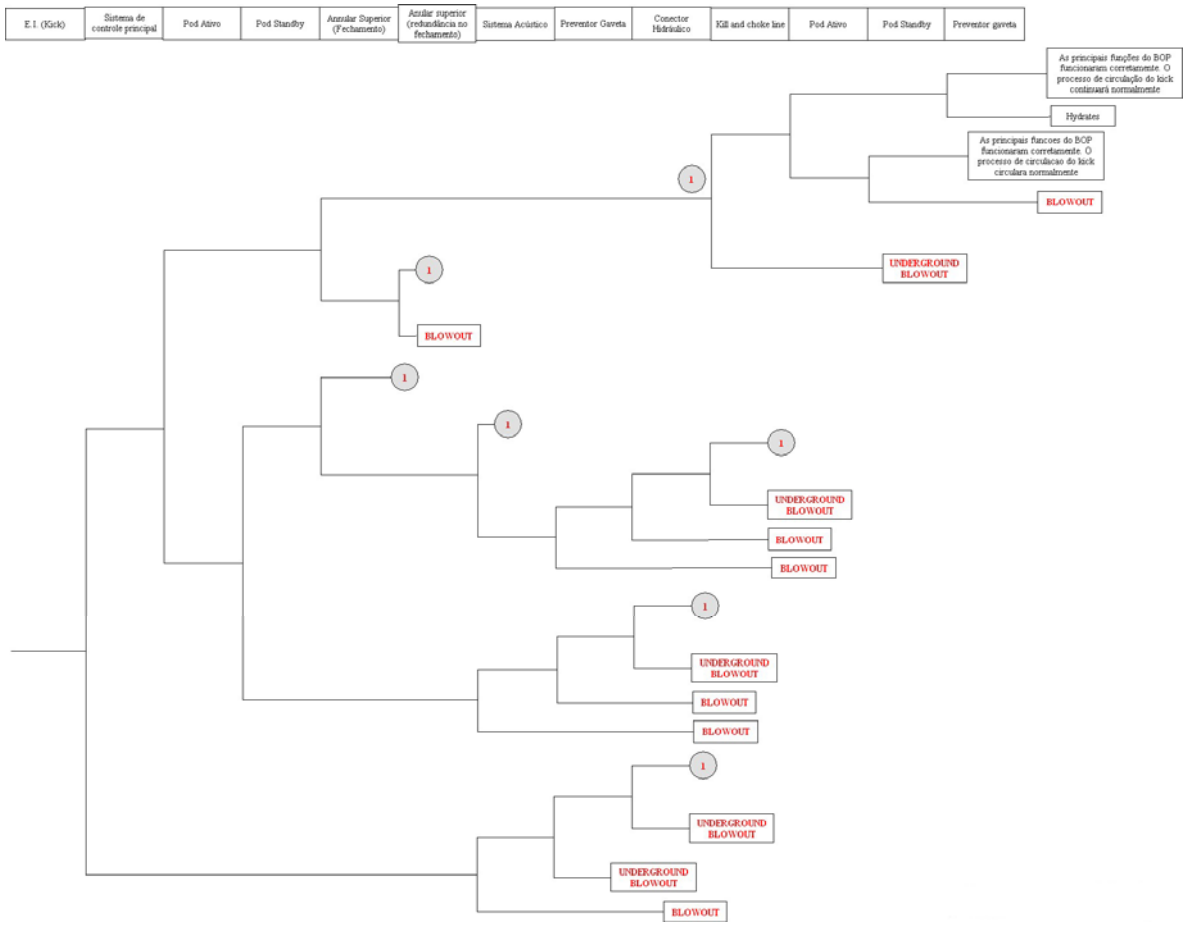


Figura 26 - Árvore de Eventos, dado que ocorreu um kick

8.3.1.1. Árvore de Falha do Preventor Anular

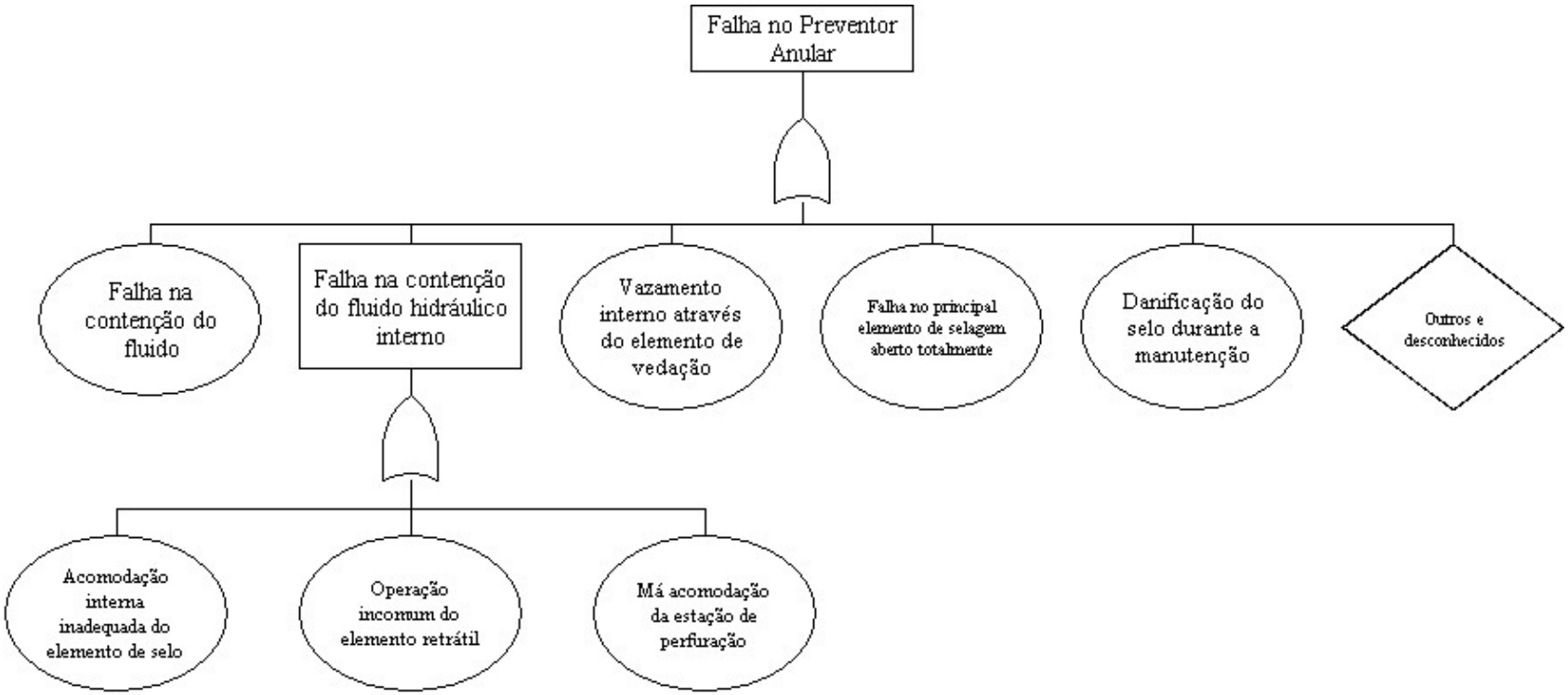


Figura 27 - Árvore de Falha do Preventor Anular

8.3.1.2. Árvore de Falha do POD

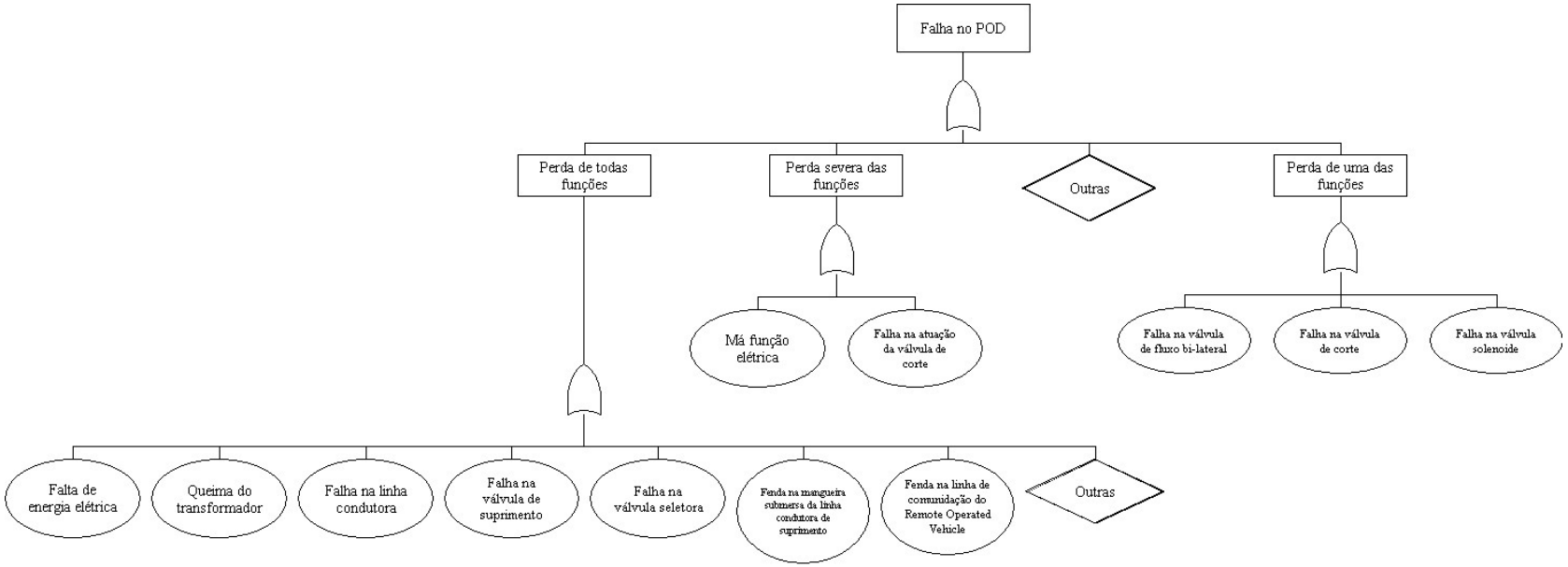


Figura 28 - Árvore de Falha do POD

8.3.1.3. Árvore de Falha do Conector Hidráulico LMRP

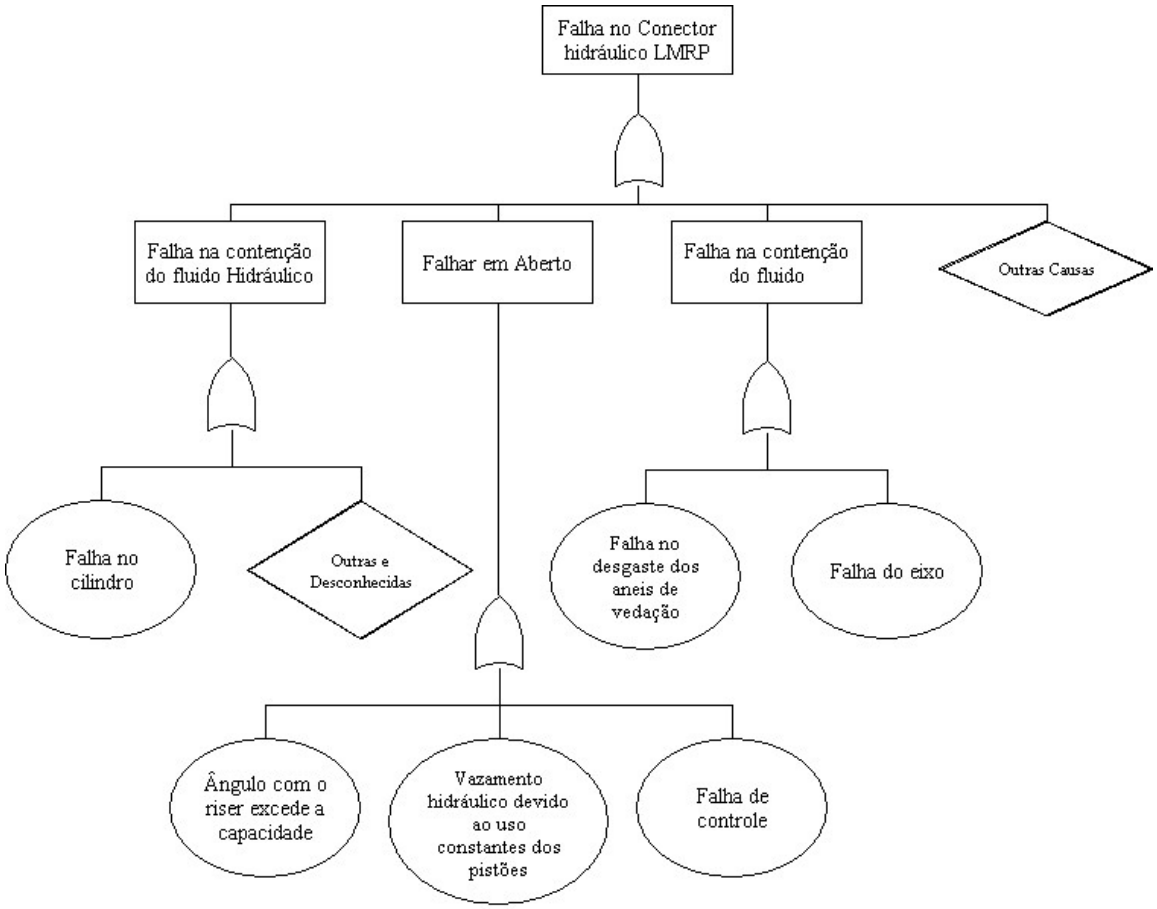


Figura 29 - Árvore de Falhas do Conector Hidráulico LMRP

9. CONCLUSÕES

- Dentre os eventos analisados no estudo em questão, podemos ressaltar a importância que deve ser dada ao Sistema Principal de Controle, uma vez que, quando ocorra sua falha, as possibilidades de que ocorra um evento indesejável são bastante altas. Sendo necessária atuação de equipamentos como Sistema Acústico, Preventor Gaveta, Conector Hidráulico e a atuação eficiente do POD. Sendo que logo o primeiro equipamento, como é descrito em Jorge (2000), é um equipamento de baixa confiabilidade. Além do que, o sistema principal de controle é um equipamento operado manualmente.

- Os POD são equipamentos atuadores do sistema principal de controle, e pelo mesmo motivo anterior, caso haja a falha de ambos os PODs, ocorrerá toda seqüência anteriormente descrita.

- As linhas de *Kill e Choke* são equipamentos que são freqüentemente exigidos em situações de *kick*, possuindo ainda modos de falha relacionados à atuação de válvulas e conexões em pelo menos três diferentes pontos, indicando se tratar de um recurso extremo e freqüentemente exigido pelas altas pressões dos fluidos que por eles passam.

- Os BOPs, tipo gaveta e anular, são equipamentos que possuem alta confiabilidade, devido principalmente às diversas barreiras contidas em seu interior.

- Os conectores hidráulicos LMRP são equipamentos críticos para a atividade de exploração, e a sua correta manutenção, bem como a atuação eficiente do sistema de posição dinâmica, são importantes pontos a serem levados em consideração para a prevenção de acidentes.

- A união entre as técnicas de avaliação de Árvore de Eventos aliada à Árvore de Falhas, traz importantes conclusões a respeito da confiabilidade de sistemas.

- Fica a oportunidade para trabalhos futuros, a quantificação das Árvores de Falha e com isso permitir a mensurarão da confiabilidade da ocorrência de um *kick*.

BIBLIOGRAFIA

MODARRES, M. KAMINSKIY, M. KRIVTSOV, V. - *Reliability engineering and risk analysis*, New York.

STAMATELATOS, M. *Fault tree handbook with aerospace applications*. Edição 1.1, 2002. Washington, DC, NASA Office of Safety and Mission Assurance.

ALMEIDA, A. T.; CAMPELLO DE SOUZA, F. M. *Gestão da manutenção na direção da competitividade*. Recife, Edufpe/UFPE, 2001.

BARROS JUNIOR, P, F, R. *Análise de confiabilidade de um sistema de preventores submarinos*. Recife, 2004. (Graduação – Universidade Federal de Pernambuco).

CAMPELLO DE SOUZA, F. M. *Decisões racionais em situações de incerteza*. Recife, Edufpe/UFPE, 2002.

DAVIS, L, D., *Rotary, Kelly, Swivel, Tongs, and Drive – Unit I*, Lesson 4. Rotary drilling series, 1ª ed. 1953.

DROGUETT, E. L., *Modelos de markov em confiabilidade*, Recife,s.ed, 2002;

DROGUETT, E. L., *Estimando a confiabilidade de produtos em desenvolvimento* ", in Anais do 3º Congresso Brasileiro de Desenvolvimento de Produtos, Florianópolis – SC, 25 – 27 de Setembro, 2001.

DROGUETT, E. L., *Análise de confiabilidade de sistemas* – Árvores de falhas, material não publicado – notas de aula, Recife, 2002.

DROGUETT, E. L., *Introdução aos métodos bayesianos para Aplicações em Confiabilidade* – notas de aula, Recife, 2002.

DUARTE, D. C. de L., *A perfomance overview about fire risk management in the Brazilian hydroeletric generating plants and transmission network*. Journal of Loss Prevention, 2004.

DUARTE, D. C. de L., *Gerênciamento de Riscos, notas de aula*, Natal, s.d.

JORGE, N. M., *Reliability assessment and risk analysis of submarine blowout preventers*. United Hingdom, 2000. (PhD – Heriot-Watt University).

LAFRAIA, J. R. B. *Manual de confiabilidade, mantenabilidade e disponibilidade*. Rio de Janeiro, Qualitymark, 2001.

MOUBRAY, J. *Manutenção centrada em confiabilidade*. São Paulo, Aladon, 2000.

PINTO, A. K.; XAVIER, J. A. N.. *Manutenção: função estratégica*. 2 ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

RASMUSON, D. M., *A comparison of the small and large event tree approaches used in PRAs*, Elsevier Science Limited, Washington, Reliability Engineering and System Safety 37, 79-90 Outubro/1990.

RAUSAND, M.; Oien K., *The basic concepts of failure analysis*.Elsevier Science Limited, Norway, Reliability Engineering and System Safety 53 , 73-83 Outubro/1996.

RELIASOFT. *Resumo teórico*, Engenharia de Confiabilidade, s.ed., s.l., s.d.

SHANKS, E.;DYKES, A.; QUILICI, M.; PRUITT, J., *Deepwater BOP Control Systems – A Look at Reliability Issues*. Offshore Technology Conference held in Houston, Texas, U.S.A., 5–8 Maio/2003.

TIZZEI, L. P. Árvore *de eventos avaliação de riscos redução de perigo.* material não publicado, São Paulo.

<http://www.camerondiv.com>,acessado em 12/04/2004.

<http://www.hydril.com>, acessado em 10/04/2004.

<http://www.imca-int.com>, acessado em 12/04/2004.

<http://www.melco.com>, acessado em 02/04/2004.

<http://www.rigzone.com>, acessado em 10/04/2004.