5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

TÍTULO DO TRABALHO:

ANÁLISE DA ÁRVORE DE FALHA DE UMA CABEÇA DE POÇO GIRATÓRIA EM OPERAÇÕES DE PERFURAÇÃO SUB-BALANCEADA

AUTORES:

Gabriel Camargo [a], Ana Carolina Católico [a], Bernardo Duarte [b]

INSTITUIÇÃO:

[a] Graduandos em Engenharia de Petróleo - UFRJ

[b] Engenheiro de Petróleo - OGX

ANÁLISE DA ÁRVORE DE FALHA DE UMA CABEÇA DE POÇO GIRATÓRIA EM OPERAÇÕES DE PERFURAÇÃO SUB-BALANCEADA

Abstract

The underbalanced drilling (UBD) has been used for many years, with more than 15,000 wells drilled underbalanced in Canada and the USA. With the introduction of annular pressure controlled rotating BOPs and rotating heads, along with a complete pressurized surface control system, drilling underbalanced has become a viable and safe alternative to drilling overbalanced. This paper will perform a fault tree analysis of the rotating wellhead, indispensable equipment to the underbalanced drilling operations.

Key words: Underbalanced, fault tree analysis, rotating head

Introdução

As complexas instalações de produção da atualidade que lidam com produtos perigosos são projetadas de modo a prover barreiras múltiplas contra os vários tipos de acidentes capazes de ocorrer durante a operação das mesmas. Podemos citar como um desses ambientes complexos as plataformas de petróleo offshore, estas dependem da interligação de uma série de sistemas produtivos, onde os efeitos decorrentes de interações imprevistas podem ser altamente deletérios para a manutenção da segurança operacional da instalação.

Em particular, o sistema de perfuração de poços de petróleo se caracteriza pela relação entre a pressão dinâmica exercida pelo fluido de perfuração contra a parede do poço e a pressão de poros na área da formação próxima àquela parede. Quando a pressão dentro do poço é maior que a pressão da formação, a perfuração é dita *overbalanced* ou convencional. Nos casos em que a pressão no interior do poço é mantida intencionalmente menor que a pressão da formação (seja pelo uso de ar, água, gás natural, espuma ou líquidos) a perfuração é definida como *underbalanced*.

Embora a perfuração UB apresente muitas vantagens sobre a perfuração convencional, este é um sistema que exige maior complexidade operacional e logística, maiores riscos de segurança e ambientais associados à presença de hidrocarbonetos na superfície, maiores chances de instabilidade das paredes do poço (desmoronamentos), custos diários de perfuração potencialmente maiores, além da presença de fluxos indesejáveis do poço para a superfície o que caracteriza um kick podendo progredir para um blowout.

Sendo assim, torna-se fundamental que os equipamentos selecionados e os procedimentos operacionais sejam submetidos à uma análise de risco, com o objetivo de melhorar a qualidade das avaliações técnicas e das técnicas de mitigação de riscos. Para tal, faremos uso de uma metodologia clássica; a Árvore de Falhas, onde propomos uma aplicação desta metodologia para a cabeça de poço giratória.

Revisão Teórica

Primeiramente, devemos destacar que nenhuma metodologia é capaz de garantir que sejam identificadas todas as possíveis interações entre os vários sistemas de uma instalação complexa, como é o caso das plataformas de petróleo. O que se busca é a identificação e avaliação do maior número possível de interações cujo resultado certamente inclui as interações mais críticas de segurança.

A avaliação de risco tem sido utilizada de uma maneira informal ao longo de toda a história da humanidade. O risco está sempre associado à decisão. Algo deve ser feito; uma ação deve ser tomada.

Existem duas estratégias principais para controlar o risco. Uma é ser mais conservador ao planejar, a fim de compensar incertezas. A segunda estratégia global é envidar mais esforço na avaliação cuidadosa do risco, para manter níveis de segurança e reduzir risco, ao mesmo tempo em que aperfeiçoam-se projetos e reduz-se custos. Ambas as estratégias são legítimas. A segunda estratégia levou ao desenvolvimento de métodos formais de avaliação de risco.

Vários tipos diferentes de risco podem ser distinguidos. Considera-se usualmente quatro: risco percebido individualmente, risco percebido coletivamente, risco calculado e "risco real". Para execução da avaliação de risco, necessita-se de uma metodologia denominada de "análise de risco", a qual visa quantificar o risco associado a uma dada decisão.

Provavelmente a tarefa mais importante na eliminação ou redução da probabilidade da ocorrência de acidentes e/ou falhas de sistemas é identificar os mecanismos pelos quais eles acontecem. Por esta razão um número substancial de procedimentos tem sido desenvolvido para uma análise mais estruturada dos mecanismos de falha de um sistema. As duas metodologias mais largamente utilizadas, as quais são: FMEA – Análise dos Modos e Efeitos das Falhas (do inglês "Failure Mode and Effects Analysis") e FTA – Análise da Árvore de Falha (do inglês "Fault Tree Analysis").

Análise da Árvore de Falha

O desenvolvimento das árvores de falhas foi feito de modo a se identificar as combinações lógicas dos eventos básicos (falhas de componentes) que pudessem levar a plataforma a estados finais críticos para a sua estabilidade operacional. A AAF pode ser utilizada não apenas para a análise da confiabilidade e/ou melhorias e modificações, mas de uma forma geral, na determinação das causas potenciais de um acidente ocorrer ou de um sistema complexo falhar.

O principal conceito na AAF é a transformação de um sistema físico em um diagrama lógico estruturado (a árvore de falhas), onde são especificados as causas que levam a ocorrência de um específico evento indesejado de interesse, chamado evento topo. A partir deste nível o sistema é dissecado de cima para baixo, enumerando todas as causas ou combinações delas que levam ao evento indesejado. Os eventos do nível inferior recebem o nome de eventos básicos ou primários, pois são eles que dão origem a todos os eventos de nível mais alto.

AAF é uma técnica dedutiva que se focaliza em um acidente particular e fornece um método para determinar as causas deste acidente, é um modelo gráfico que dispõe várias combinações de falhas de equipamentos e erros humanos que possam resultar em um acidente. Consideram o método como "uma técnica de pensamento-reverso". Portanto, é certo supor que a árvore de falhas é um diagrama que mostra a inter-relação lógica entre estas causas básicas e o acidente. A AAF pode ser executada em quatro etapas básicas: definição do sistema, construção da árvore de falhas, avaliação qualitativa e avaliação quantitativa.

Os meios utilizados na árvore de falha com o objetivo de visualizar as relações casuais a partir da falha de topo são compostos de eventos expressos como caixas e portas lógicas. Dois tipos de portas são utilizados, a porta lógica *OU* e a porta lógica *E*. A porta *OU* é utilizada para mostrar que o evento de saída ocorre apenas se um ou mais eventos de entrada ocorrerem. A porta *E* é utilizada para mostrar que o evento de saída ocorrerá se todos os eventos de entrada ocorrerem. Desta forma, o método de AAF pode ser desenvolvido através das seguintes etapas:

a) Seleção do evento indesejável ou falha, cuja probabilidade de ocorrência deve ser determinada;

b) Revisão dos fatores intervenientes: ambiente, dados do projeto, exigências do sistema, etc., determinando as condições, eventos particulares ou falhas que possam vir a contribuir para ocorrência do evento topo selecionado;

c) Montagem, através da diagramação sistemática, dos eventos contribuintes e falhas levantados na etapa anterior, mostrando o interrelacionamento entre estes eventos e falhas, em relação ao evento topo. O processo inicia com os eventos que poderiam, diretamente, causar tal fato, formando o primeiro nível - o nível básico. A medida que se retrocede, passo a passo, até o evento topo, são adicionadas as combinações de eventos e falhas contribuintes. Desenhada a árvore de falhas, o relacionamento entre os eventos é feito através das comportas lógicas;

d) Através de Álgebra Booleana são desenvolvidas as expressões matemáticas adequadas, que representam as entradas da árvore de falhas. Cada comporta lógica tem implícita uma operação matemática, podendo ser traduzidas, em última análise, por ações de adição ou multiplicação;

e) Determinação da probabilidade de falha de cada componente, ou seja, a probabilidade de ocorrência do evento topo será investigada pela combinação das probabilidades de ocorrência dos eventos que lhe deram origem.

Metodologia

Uma árvore de falha começa sempre com um evento principal, que é, geralmente, um acidente ou outro evento indesejável. As árvores são construídas do topo para baixo, buscando a unidade, que seriam as causas primárias do evento analisado. As causas apresentadas no nível mais baixo da árvore são as condições básicas para que o evento de topo o corra ou são eventos que não aconteceram. As árvores de falha mostram diversas sequências de acidentes que nos levam até o topo.

O evento de topo é uma importante condição de contorno. Em um dado sistema existem vários eventos investigados, mas uma árvore de falha lida apenas com um evento de topo. Segue-se que a avaliação de riscos em um sistema não se torna compreensível até que uma árvore de falha seja desenhada para todos os eventos de topo significativos.

Essa metodologia é usada para avaliar medidas mitigatórias que reduzem os eventos de topo. A freqüência da ocorrência de um evento de topo é calculada desde a data de falha dos eventos mais simples, os chamados eventos básicos. Esses simples acontecimentos, como falha em uma inspeção ou algum acontecimento da natureza, são tratados como sendo genéricos. No entanto os bancos de dados de falhas para esses tipos de eventos são utilizados para aplicação em diversas situações.

A definição dos eventos topo indesejados das árvores de falha foi feita de forma a identificar os eventos que pudessem levar a unidade a um dos estados finais. Na tabela 1 apresentamos os eventos indesejados considerados como eventos topo da árvore de falha e os estados finais ao qual estão associados.

Uma vez construída a árvore de falhas para cada um dos eventos topo definidos, procedeu-se a avaliação qualitativa das combinações dos eventos básicos ou não desenvolvidos que causam a ocorrência desse evento topo. Ou seja, procedeu-se à identificação dos cortes mínimos da árvore.

Análise dos cortes mínimos de uma Árvore de Falha

Denomina-se corte de uma árvore de falhas qualquer conjunto de eventos básicos ou não desenvolvidos cuja ocorrência ou existência simultânea implica na ocorrência do evento topo, ou seja, na falha do sistema. Desta forma, um corte pode ser definido como uma combinação de eventos

básicos (como por exemplo: falhas dos componentes) que ao ocorrerem levam necessariamente à falha do sistema (ocorrência do evento topo da Árvore de Falha).

Um corte é denominado corte mínimo quando for constituído pelo menor número possível de eventos básicos cujas ocorrências simultâneas permitem observar o evento topo da árvore de falha. Em outras palavras, um corte mínimo é um conjunto de eventos cuja ocorrência é necessária e suficiente para causar a ocorrência do evento topo, não podendo ser reduzido sem perder a sua condição de corte.

Outro conceito importante é o de ordem de um corte mínimo, que pode ser definido como o número de eventos pelos quais o corte é formado. Assim, por exemplo, um corte composto de apenas um evento é denominado um corte mínimo de primeira ordem, ou seja, basta apenas que um evento ocorra para que o evento topo venha a ocorrer. Já um corte composto de dois eventos é um corte de segunda ordem. Em um sistema complexo, a existência de cortes de primeira ordem pode ser um indicador de baixa confiabilidade do sistema, pois significa que há falhas únicas capazes de causar a falha do sistema. Obviamente que isto nem sempre é verdadeiro, pois mesmo cortes de primeira ordem podem ter baixas probabilidades de falhas, o que não necessariamente compromete a confiabilidade do sistema.

Os critérios utilizados para a identificação e seleção dos cortes mínimos analisados no estudo foram baseados nas condições listadas abaixo:

a) Número de cortes na ordem de milhar. Ou seja, são analisadas quantas ordens de corte foram necessárias até que o evento indesejado esteja representado por milhares de cortes;

b) São analisados todos os eventos básicos da menor ordem encontrada e os vinte eventos básicos com maior grau de ocorrência da ordem subseqüente.

Esse critério permitiu detalhada análise dos cortes mínimos. Vale ressaltar que para que um corte seja analisado, basta que ao menos um de seus eventos básicos o sejam.

Resultados e Discussão

Na figura 2 mostramos a árvore de falha aplicada à cabeça de poço giratória (CPG), que é usada nas operações de perfuração UB. Essa tecnologia de CPG se tornou um elemento chave nas operações de perfuração UB. Elas são usadas para aumentar a segurança e a proteção ao meio ambiente, até em condições nas quais não é realmente necessário o uso desse tipo de equipamento.

Cabe ressaltar que esse equipamento não funciona como uma cabeça de poço tradicional. A CPG funciona de maneira a permitir o retorno do ar, juntamente com os cascalhos para a superfície e, em seqüência serem queimados em uma espécie de linha de *flair* chamada *blooie line*. A blooie line conduz o ar e os cascalhos até o ponto de queima e deverá ter, no mínimo, 100 metros de comprimento como medida de segurança. O uso desse tipo de equipamento tem alguns riscos inerentes que serão discutidos a seguir:

a- Interferência na rotação da CPG: Com a má colocação das mangueiras ou dos tensionadores da CPG há o risco de rompimento desses equipamentos, havendo o escoamento e/ ou retorno do fluido de perfuração para o lugar errado que não o determinado por um sistema fechado. Pode ocorrer, também, o colapso da CPG pelo movimento vertical (heave) excessivo da plataforma ou pelo atrito com as juntas da coluna de perfuração por isso, deverá ser realizada uma inspeção prévia nos equipamentos de modo a verificar se é possível aplicar o máximo de rotação possível sem interferência entre mangueiras e tensionadores.

b- Dano mecânico: O mais importante de ser estudado, pois também depende das condições geológicas e/ ou marítimas da locação a ser perfurada. Para assegurar que nenhum elemento da coluna de perfuração será danificado, comprometendo a operação, eles devem passar por inspeção rigorosa que certifiquem que tanto os Drill pipes como os comandos são feitos de ligas especiais e resistentes para os casos em que possamos ter a presença de gases corrosivos como CO_2 e H_2S e também com elevada resistência à tração devido ao movimento de heave da plataforma (mesmo com o compensador de movimentos).

É também devido a essa movimentação causada pelas ondas que devemos ter atenção aos materiais elastoméricos e poliméricos contidos na CPG. Tais materiais devem ter atenção especial por terem grande possibilidade de sofrerem degradação com fatores como: temperatura, gases e atrito. Sendo assim, devemos considerar a hipótese de estudar maneiras de diminuir o passeio (deslocamento vertical da coluna) através da borracha da CPG e a possibilidade de troca dessa borracha durante a operação, observadas as devidas condições de armazenamento dos materiais sobressalentes.

c-Erro humano: O erro humano é qualquer variação do comportamento humano que ultrapassa uma faixa considerada normal ou aceitável de operação. Nem sempre ocorrendo devido ao fator humano. É resultado das interações homem-máquina ou homem-ambiente. Podem ser divididos em erros de percepção (devidos aos órgãos e sentidos), erros de decisão (devidos à avaliações incorretas) e erros de ação (devidos à atos musculares).

As causas mais freqüentes estão no caso da deficiência para acompanhar e corrigir variações do comportamento da máquina ou ambiente. No caso, a cabeça de poço giratória pode estar excedendo rpm, pode estar ocorrendo um desalinhamento da cabeça de poço com o BOP rotativo. Um erro de percepção seria na inspeção visual da borracha da CPG. Existem também as falhas devido à ausência de motivação (monotonia, fadiga, stress).

O erro humano pode ser evitado com o investimento em um treinamento de segurança, por exemplo; pode ser ‘on-the-job training’, onde o trabalhador mais experiente ensina o novato ou mesmo com aulas e cursos com especialistas através de visitas, vídeos, etc. Deve ser considerado o treinamento da substituição das borrachas antes de começar perfurando a fase UB, como também os testes do conjunto de rolamentos após a instalação da CPG.

Conclusões

A operação de perfuração sub-balanceada, ao demandar maior atenção e cuidados em suas técnicas e instalações, atrai maior atenção quanto ao cálculo de risco associado ao processo do que uma operação convencional. Como a indústria do petróleo lida com custos operacionais elevados e qualquer hora inerte equivale a milhões de dólares perdidos, toda medida mitigadora para reduzir as possibilidades de problemas operacionais é válida.

Dessa forma, nas condições de operação sub-balanceada, os riscos associados à interferência da rotação da cabeça de poço giratória e aos danos mecânicos podem ser mitigados de acordo com a qualidade da inspeção e manutenção constante dos equipamentos de forma a evitar situações extremas comprometendo toda a operação (caso de kick, desmoronamento e colapso). Já o erro humano, em condições normais de operação, o risco operacional nele contido será altamente reduzido com treinamentos e cursos especializados de forma a indicar procedimentos corretos e seguros para minimizar os riscos.

Por fim, é necessário estabelecer parâmetros importantes de forma a relacionar a Árvore de Falhas desenvolvida especialmente para as operações de cabeça de poço giratória em perfurações sub-balanceadas. Fatores mais relevantes foram considerados apesar de que, em toda e qualquer operação

de alto risco, outros fatores podem ser a causa de falhas. Estudos de simulação elaborados para uma movimentação excessiva de heave e suas conseqüências podem ser altamente explicativos para exemplificar o quanto se influencia na operação e quais as causas associadas diretamente por ela.

Agradecimentos

Agradecemos ao professor Armando Gonçalves pelo apoio durante a execução do trabalho e por ter dado oportunidade à nossa iniciativa.

Referências Bibliográficas

KENT, R.P. e SANBORN, L.W. The Practical Application of Risk Analysis in the E&P Oil Industry. In: SPE Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium, 1991, Dallas, Texas, EUA. SPE, 1991. p.13.

BURNS, D.J.Advanced Fault Tree Analysis in Offshore Applications. In: First International Conference on Health, Safety and Environment, 1991, Hague, Holanda., 1991. p.8.

FOWLER, J.H. e ROCHE, J.R.. System Safety Analysis for Well Control Equipment. In: Offshore Technology Conference, 1994, Houston, Texas, EUA. SPE, 1994. p. 6.

MONTEIRO, Gilsa. et al. Metodologia para Análise de Risco/ Confiabilidade da Interação entre os Sistemas de Potência Elétrica e de Automação em Plataformas de Produção. In: 3° Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2005, Salvador, Bahia, Brasil. IBP, 2005. p.6.

BOURGOYNE, Adam. et al. Applied Drilling Engineering, 1986. SPE, 1986, 502p (SPE Text Book Series, Book 2)

CEPETRO; Centro de Estudos de Petróleo online; disponível em: <http://www.cepetro.unicamp.br/noticias/online/mar2005.pdf > Rio de Janeiro, acesso em 24 de novembro às 13h, 2008;

ENSISLIN, Leonardo. Uma metodologia para auxiliar no gerenciamento de riscos e na seleção de alternativas de investimentos em segurança/Análise de Árvores de Falha (AAF) – Fault Tree Analysis (FTA), pg. 57 a 58.

Anexos

Evento de Topo	Causas Primárias
INTERFERÊNCIA NA ROTAÇÃO	Má colocação das mangueiras
	Má colocação dos tensionadores
DANO MECÂNICO	Falha na inspeção
	Presença de gases corrosivos
	Passeio excessivo da coluna quando em heave
ERRO HUMANO	Falha do operador
	Falha no treinamento dos operadores

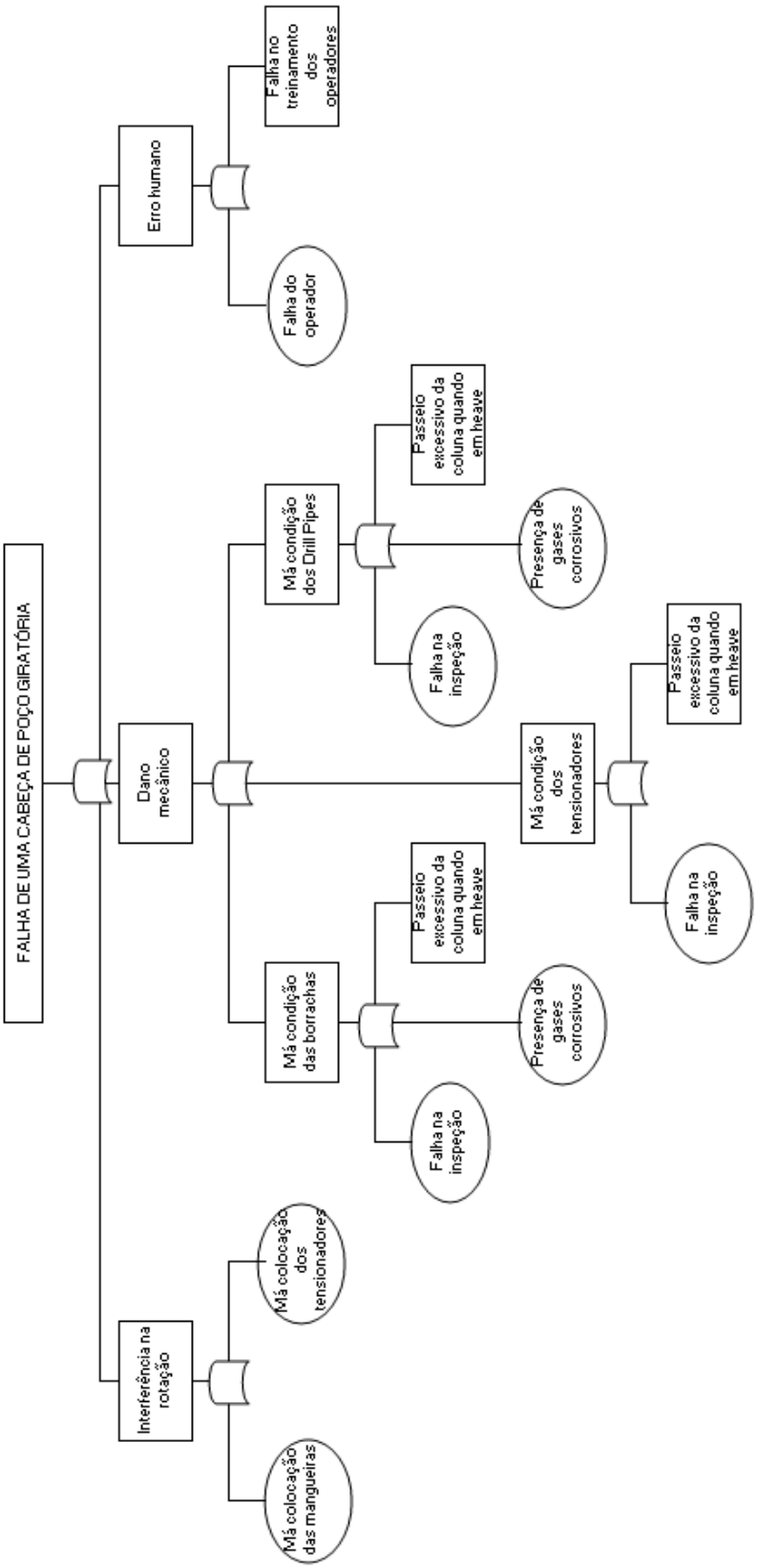

Figura 2: Árvore de falha de uma cabeça de poço giratória