



Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Escola Politécnica & Escola de Química  
Programa de Engenharia Ambiental

Rogério Ferreira Pereira

ANÁLISE DO DEEPWATER HORIZON *BLOWOUT* : APLICAÇÃO DOS MÉTODOS  
FRAM e STAMP

Rio de Janeiro  
2016



UFRJ

Rogério Ferreira Pereira

ANÁLISE DO DEEPWATER HORIZON *BLOWOUT* : APLICAÇÃO DOS MÉTODOS  
FRAM e STAMP

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadores:

Cláudia do Rosário Vaz Morgado, Prof. D.Sc. e

Isaac José Antônio Luquetti dos Santos, Prof. D.Sc.

Rio de Janeiro  
2016

Pereira, Rogério Ferreira.

Análise do Deepwater Horizon Blowout: aplicação dos métodos FRAM e STAMP / Rogério Ferreira Pereira – 2016.  
107 f.: il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2016.

Orientadores: Cláudia do Rosário Vaz Morgado e Isaac José Antônio Luquetti dos Santos.

1. Blowout 2. FRAM. 3. STAMP 4. Petróleo I. Morgado, Cláudia e Santos, Isaac II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica e Escola de Química. III. Título.



UFRJ

ANÁLISE DO DEEPWATER HORIZON *BLOWOUT* : APLICAÇÃO DOS MÉTODOS  
FRAM e STAMP

Rogério Ferreira Pereira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadores:

Cláudia do Rosário Vaz Morgado, Prof. D.Sc. e

Isaac José Antônio Luquetti dos Santos, Prof. D.Sc.

Aprovada pela Banca:

---

Cláudia do Rosário Vaz Morgado, Prof<sup>a</sup>. D.Sc, PEA

---

Isaac José Antônio Luquetti dos Santos, Prof. D.Sc, PEA

---

Ofélia de Queiroz Fernandes Araújo, Prof<sup>a</sup>. PhD, PEA

---

Ana Paula Fonseca, D.Sc, PETROBRAS

---

Jonathan Marcello de Oliveira Pinto, D.Sc, CNEN

Rio de Janeiro  
2016

*Dedicamos esta dissertação à memória dos trabalhadores que infelizmente perderam suas vidas no acidente da plataforma Deepwater Horizon no Golfo do México em abril de 2010.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por tudo.

Aos meus orientadores Cláudia do Rosário Vaz Morgado e Isaac José Antônio Luquetti dos Santos pela paciência, dedicação em transmitir conhecimento e pela presteza e proatividade em todos os momentos em que precisei.

A minha família, amigos e professores pelo apoio e incentivo.

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – e do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI pelo apoio financeiro por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCTI – PRH41

A minha esposa Joseane e ao meu filho João Pedro pela força e motivação.

Muito obrigado!

*"Sistemas complexos quase sempre falham de forma complexa"*

Columbia Accident Investigation Board - NASA,  
26/08/2003

## RESUMO

Esta pesquisa tem como objetivo a análise do acidente da plataforma de exploração de petróleo Deepwater Horizon, ocorrido em 20 de abril de 2010 no golfo do México. A análise do acidente foi realizada através dos modelos FRAM – Functional Resonance Analysis Method e STAMP – System Theoretic Analysis Method and Process, baseados na teoria de sistemas e na engenharia de resiliência. São utilizados como fonte de dados os relatórios oficiais do acidente, especialmente o relatório baseado em árvore de falhas emitido pela operadora do poço, British Petroleum – BP. Os resultados da análise do blowout demonstram uma visão diferente do relatório oficial devido a mudança de ênfase. As análises não identificam falhas de componentes humanos ou tecnológicos, mas compreendem o sistema como um todo através de sua estrutura de controle e combinações de variabilidades que podem levar a resultados indesejáveis. Nos modelos FRAM e STAMP, os acoplamentos e as realimentações permitem identificar combinações, nas quais as variabilidades e retroalimentações influenciam decisões futuras.

Palavras-chave: 1. Blowout 2.FRAM 3.STAMP . 4. Petróleo



## **ABSTRACT**

This research aims to analyze the accident of the oil drilling platform Deepwater Horizon, occurred on April 20, 2010 in the Gulf of Mexico, located at the southeastern corner of North America. The analysis of the accident was performed using the accident analysis models FRAM - Functional Resonance Analysis method and STAMP - Analysis System Theoretic Method and Process based on the systems theory and engineering resilience. Official reports of the accident, mainly the Fault Tree Analysis based report of the British Petroleum Company – BP are used as data source. The blowout analysis results show a different view of the official report, due to change of emphasis. The analysis does not identify human or technological component failures, but comprise the whole system through its control structure and variability combinations which can lead to undesirable results. In the FRAM and STAMP models, couplings and feedbacks allow to identify combinations in which the variability and feedbacks influence future decisions.

Kew-words: 1. Blowout 2.FRAM 3.STAMP . 4. Oil.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - MODELOS DE ANÁLISE DE ACIDENTES - ADAPTADO DE HOLLNAGEL (2010) .....	22
FIGURA 2 - MODELOS SEQUENCIAIS DE ACIDENTES .....	24
FIGURA 3 - MODELO EPIDEMIOLÓGICO DE ACIDENTES .....	27
FIGURA 4 - ETAPAS DO PROCESSO DE EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO OFFSHORE .....	35
FIGURA 5 - CANAIS DE COMUNICAÇÃO E CONTROLE ENTRE NÍVEIS - ADAPTADO DE LEVESON (2004) .....	41
FIGURA 6 - MODELO FRAM (HOLLNAGEL, 2012). .....	46
FIGURA 7 - VISÃO EPIDEMIOLÓGICA DO DEEPWATER HORIZON BLOWOUT (BP, 2010).....	51
FIGURA 8 - MODELO STAMP / CAST .....	57
FIGURA 9 -ESTRUTURA DE CONTROLE DA DEEPWATER HORIZON PARA O POÇO MACONDO .....	60
FIGURA 10 - ETAPAS DO MÉTODO FRAM .....	80
FIGURA 11 - FUNÇÕES DE INTERESSE PARA O POÇO MACONDO.....	81
FIGURA 12 - MODELO FRAM PARA DEEPWATER HORIZON .....	82
FIGURA 13 - VARIABILIDADES POR FUNÇÃO - EXEMPLO FUNÇÃO "PERFURAÇÃO" .....	90

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - GUIA DE SEGURANÇA X MODELO DE ANÁLISE .....	34
TABELA 2 - CLASSIFICAÇÃO DE FALHAS DE CONTROLE (LEVESON, 2011).....	42
TABELA 3 - PERIGO E RESTRIÇÕES DE SEGURANÇA .....	58
TABELA 4 - SEQUÊNCIA CRONOLÓGICA DO ACIDENTE (BP, 2010) .....	61
TABELA 5 - RESPONSABILIDADES E AÇÕES DE CONTROLE: ENLACE 1 .....	64
TABELA 6- RESPONSABILIDADES E AÇÕES DE CONTROLE: ENLACE 2 .....	68
TABELA 7 - RESPONSABILIDADES E AÇÕES DE CONTROLE: ENLACE 3 .....	71
TABELA 8- RESPONSABILIDADES E AÇÕES DE CONTROLE: ENLACE 4 .....	74
TABELA 9- RESPONSABILIDADES E AÇÕES DE CONTROLE: ENLACE 5 .....	75
TABELA 10 - RESPONSABILIDADES E AÇÕES DE CONTROLE: ENLACE 6 .....	76
TABELA 11 - ASPECTOS DO MODELO FRAM PARA A FUNÇÃO PERFURAR.....	83
TABELA 12 ASPECTOS DO MODELO FRAM PARA A FUNÇÃO “REVESTIR” .....	84
TABELA 13 ASPECTOS DO MODELO FRAM PARA A FUNÇÃO CIMENTAR .....	84
TABELA 14 ASPECTOS DO MODELO FRAM PARA A FUNÇÃO ABANDONAR.....	85
TABELA 15 - ASPECTOS DO MODELO FRAM PARA A FUNÇÃO PLANEJAR.....	86
TABELA 16 - ASPECTOS DO MODELO FRAM PARA A FUNÇÃO FABRICAR EQUIPAMENTOS .....	86
TABELA 17 - ASPECTOS DO MODELO FRAM PARA A FUNÇÃO REGULAR .....	87
TABELA 18 - ASPECTOS DO MODELO FRAM PARA A FUNÇÃO LEGISLAR.....	87
TABELA 19 - ASPECTOS DO MODELO FRAM PARA A FUNÇÃO GERENCIAR A PLATAFORMA .....	87
TABELA 20 - ASPECTOS DO MODELO FRAM PARA A FUNÇÃO PRODUZIR .....	88
TABELA 21 - ASPECTOS DO MODELO FRAM PARA A FUNÇÃO ELABORAR PASTA DE CIMENTO .....	88
TABELA 22 - COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE ANÁLISE .....	94

## LISTA DE ABREVIATURAS

AAF	Análise de Árvore de Falhas
AMF	Automatic Model Function
BOP	Blowout Preventure
BOEM	Bureaul Ocean Energy Management
BP	British Petroleum
CAST	Causal Analysis Based on Stamp
EDS	Emergency Desconnection System
FRAM	Functional Ressonance Analysis Method
STAMP	System Theoretic Analysis Method and Process

## SUMÁRIO

1	Introdução .....	15
2	Objetivo .....	17
2.1	Limitações .....	17
3	Fundamentação teórica .....	19
3.1	Sistemas Complexos em exploração <i>offshore</i> .....	19
3.2	Métodos de análise de acidente e riscos na indústria petrolífera .....	21
3.2.1	Modelos Sequenciais .....	23
3.2.2	Modelos Epidemiológicos .....	26
3.2.3	Modelos não lineares .....	27
3.3	Engenharia de Resiliência .....	30
3.4	Segurança de Processos .....	33
3.5	Processo de exploração <i>offshore</i> de petróleo .....	34
3.5.1	Planejamento .....	35
3.5.2	Perfuração .....	36
3.5.3	Completação .....	38
3.5.4	Produção .....	38
3.5.5	Abandono .....	38
3.6	STAMP – System Theoretic Analysis and Process .....	39
3.6.1	Fundamentos do STAMP .....	39
3.6.2	Restrição de Segurança .....	40
3.6.3	Estrutura de Controle Hierárquico .....	40
3.6.4	Modelo de Processo .....	41
3.6.5	Teoria de controle aplicada à segurança .....	42
3.6.6	CAST .....	43
3.7	FRAM – Functional Resonance Analysis Method and Process .....	44
3.7.1	Fundamentos do FRAM .....	44
3.7.2	Resonância Funcional .....	45
3.7.3	Aspectos do Modelo .....	45
4	Metodologia .....	49
4.1	Passos para execução da pesquisa: .....	49
4.2	Modelagem .....	50

4.3 Software utilizado.....	51
5 Deepwater Horizon Blowout .....	53
5.2 Análise de Segurança utilizando STAMP .....	56
5.2.1 Identificar o perigo e as restrições de segurança do sistema violadas .....	57
5.2.2 Documentar a estrutura de Controle .....	59
5.2.3 Determinar os eventos imediatos que levaram à perda.....	61
5.2.4 Responsabilidade e Ações de Controle dos Componentes .....	63
5.2.5 Avaliar comunicação e coordenação.....	76
5.2.6 Consideração de dinâmica e migração para alto risco .....	77
5.2.7 Gerar recomendações .....	78
5.3 Análise de Segurança Utilizando FRAM .....	79
5.3.1 Identificar as funções requeridas.....	80
5.3.2 Identificar as variabilidades e descrever o acoplamento de variabilidades ..	89
5.3.3 Identificar Medidas .....	92
6 Comparativo entre métodos.....	94
7 Conclusões .....	100
REFERÊNCIAS .....	103
APENDICE .....	107

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios da indústria de exploração marítima (*offshore*) de petróleo nos dias atuais é garantir a segurança de suas instalações. Além da importância econômica do petróleo, a qual pode gerar uma necessidade de urgência conflitante com os requisitos de segurança ambiental, as incertezas geológicas e do ambiente são agravadas por novas fontes de desconhecimento do processo oriundas do rápido avanço tecnológico.

Neste ambiente hostil do sistema de exploração *offshore*, as constantes mudanças tornam praticamente impossíveis a prescrição e manutenção de procedimentos atualizados e normas que contemplem todas as atividades necessárias para garantir a segurança e o funcionamento correto dos sistemas. Neste contexto, as condições e inter-relações entre os componentes do sistema, sejam eles humanos ou tecnológicos, fazem com que a convivência com a variabilidade se transforme em uma habilidade imprescindível.

Para endereçar mais adequadamente as necessidades específicas e os novos desafios da convivência com a variabilidade nas indústrias químicas e de petróleo, foram desenvolvidos diversos guias direcionados aos acidentes maiores (OECD, 2008), (CCPS, 2007), (HSE, 2006a) e (OGP, 2011). O conteúdo destes guias detalha em forma de requisitos e recomendações as principais lições aprendidas e as boas práticas oriundas da experiência adquirida pelas empresas, reguladores, consultores e governos ao longo dos anos. De acordo com alguns destes guias, segurança de processos seria diferente de segurança ocupacional, pois enquanto a segurança ocupacional é direcionada a saúde dos trabalhadores, a segurança de processos estaria relacionada ao processo químico e de segurança das instalações (OGP, 2011, p. 3) (HSE, 2006a, p. 6).

Uma abordagem específica de segurança de processo pode ser bastante interessante para promover uma visão complementar de segurança na indústria de petróleo, todavia quando se coloca ênfase em uma área muito específica para abordagem de segurança, começamos a perder a visão do todo e este reducionismo

pode levar a incompreensão de como as funções do processo estão conectadas e em constante modificação. Acidentes de processos e ocupacionais podem ter causas semelhantes (PEREIRA et al., 2014, p. 2). Além deste arriscado reducionismo, as metodologias para análise de acidentes e riscos tradicionalmente utilizadas pela indústria de exploração *offshore*, tais como: hazop, fmea, árvore de falhas, bow tie, APR e PRA, tem objetivo na busca por uma ou poucas causas raízes como origem de acidentes, todavia em um sistema complexo como o de exploração *offshore*, as causas raízes são praticamente impossíveis de identificar, pois sempre é possível ir além da causa identificada como raiz no processo de investigação. Por este motivo, as causas são subjetivas e ficam condicionadas ao investigador, o qual normalmente para a investigação de causas raízes quando encontra aquelas "politicamente corretas" e que sejam passíveis de que possam ser tomadas algumas ações. Causas sistêmicas e organizacionais normalmente não são consideradas.

Como a exploração de petróleo é um sistema complexo, com muitas fontes internas de variabilidade, em constante transformação e envolvendo incertezas sobre o ambiente, há uma necessidade clara de pesquisas que utilizem métodos de análise de acidentes e riscos que se proponham a complementar as lacunas deixadas pelos guias e métodos tradicionalmente utilizados. Neste intuito, esta pesquisa realiza uma análise de segurança do processo de exploração *offshore* de petróleo através dos métodos FRAM - Functional Resonance Analysis Method (HOLLNAGEL, 2012) e STAMP - System Theoretic Analysis Method and Process (LEVESON, 2004), os quais são baseados na teoria de sistemas e na engenharia de resiliência. FRAM e STAMP foram aplicados em estudos anteriores em diversos campos, como a área de aviação (DE CARVALHO, 2011) e pela agência espacial norte americana - NASA (LEVESON, 2008). Com este estudo, busca-se compreender o processo como um todo e suas variabilidades intrínsecas, não objetivando somente a identificação de falhas específicas de componentes, sejam eles humanos ou tecnológicos. Contudo, utilizou-se o acidente da plataforma Deepwater Horizon, ocorrido em 20 de abril de 2010 no golfo do México, pois este é um dos maiores acidentes ambientais da indústria do petróleo (ECKLE; BURGHERR; MICHAUX, 2012a, p. 13002).



## 2 OBJETIVO

O objetivo geral desta pesquisa é fornecer uma análise do Deepwater Horizon *blowout*, ocorrido em 20 de abril de 2010 no Golfo do México, através das metodologias FRAM - *Funcitonal Resonance analysis Method* (HOLLNAGEL, 2012) e STAMP - *System Theoretic Analysis Method and Process* (LEVESON, 2004), baseadas na engenharia de resiliência e no pensamento sistêmico.

Os objetivos específicos deste estudo são:

- a) Modelar o processo de exploração de petróleo de acordo com as metodologias FRAM e STAMP, utilizando como referência o estudo de caso da Deepwater Horizon, empregando com fonte de dados as publicações, artigos e relatórios oficiais de investigação do acidente;
- b) Identificar características de resiliência e a estrutura de controle do processo estudado;
- c) Avaliar como as estruturas de controle existentes enfraqueceram ou reforçaram as características de resiliência do processo;
- d) Identificar oportunidades para melhorias que possam aumentar a resiliência dos processos;
- e) Comparar os métodos utilizados.

### 2.1 Limitações

Em conformidade com os objetivos estabelecidos nesta pesquisa, não é escopo deste estudo a reconstrução da investigação do acidente da Deepwater Horizon para o processo de exploração offshore, todavia a análise do acidente será realizada através da leitura dos relatórios oficiais e artigos. Apesar das possíveis restrições de informações da análise através de relatórios já publicados e das eventuais limitações ocasionadas pela influência do pensamento linear dos investigadores que elaboraram os materiais consultados, adotou-se como premissa a possibilidade de obter resultados diferentes através da análise do acidente com uma visão distinta e abrangente, fornecida pelos métodos aqui propostos. A eventual

falta de alguma informação para conclusão do modelo ajuda a entender eventuais fragilidades dos modelos lineares de investigação de acidentes, limitando as soluções possíveis.

O escopo da análise também não tem como objetivo avaliar a efetividade das ações realizadas pelas empresas, governo e voluntários que levaram 87 dias para contenção do vazamento após o acidente.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Sistemas Complexos em exploração *offshore*

Não há como negar que os modelos de análises de acidentes e riscos baseados no pensamento linear e reducionista trouxeram importantes contribuições para a área de segurança ambiental, haja vista que somente com esta forma de abordagem foi possível decompor os processos com muitos elementos em partes menores e entender profundamente o comportamento de determinadas partes dos sistemas, promovendo a segurança através do aumento da confiabilidade dos componentes. Todavia, para os sistemas de exploração *offshore* construídos atualmente, somente o aumento da confiabilidade não é suficiente, pois acidentes podem ocorrer por meio da combinação de partes dos sistemas, mesmo que nenhum componente específico tenha deixado de funcionar da forma para qual foi projetado (KHAN et al., 2014). A análise das causas do acidente da embarcação Zeebrugge realizada por (RASMUSSEN, 1997) e a análise do acidente ocorrido com perda da nave espacial da NASA na tentativa de um pouso em marte (LEVESON, 2011) são exemplos de situações nas quais os acidentes ocorrem sem que nenhum componente tenha falhado no seu funcionamento, ou seja, sem que nenhum componente tenha funcionado em desacordo com suas especificações.

Atualmente, há um número cada vez maior de componentes e possíveis combinações, incluindo o imenso aumento de possibilidades com a revolução de software, a qual tornou as possibilidades de combinações sem limitações físicas, sendo limitadas apenas pela capacidade humana de criar. Estes atributos fazem com que o sistema de exploração *offshore* torne-se cada vez mais complexo.

Sistema complexo é um sistema que exhibe comportamentos emergentes e não triviais de auto-organização (MITCHELL, 2009). Esta definição é complementada por (RICKLES; HAWE; SHIELL, 2007), os quais afirmam também que os sistemas complexos possuem um grande número de subunidades, cujas interações repetidas

resultam em um comportamento coletivo, o qual realimenta o comportamento das partes individuais.

Desta forma, sistemas complexos possuem algumas características muito particulares que podem ser destacadas, sendo que o princípio da emergência talvez seja um dos mais importantes para este estudo. Quando o processo possui propriedades emergentes, significa que as propriedades do sistema surgem da combinação de elementos, sendo que pequenas variações na entrada podem gerar variações desproporcionais na saída. Outro ponto importante é a realimentação, pois neste tipo de comportamento, as ações atuais fornecem resultados que realimentam o sistema e influenciam as ações futuras.

Algumas vezes a complexidade pode ser confundida com a complicação, todavia estamos tratando de coisas distintas, pois em um sistema complicado é possível ter muitos elementos com grande independência entre eles, ou seja, se for removido algum elemento, não necessariamente o sistema sofrerá grandes alterações. Todavia, em um sistema complexo, a interdependência faz com que a remoção de um componente modifique o sistema completamente ou o torne inoperante (MILLER; PAGE, 2007).

Neste contexto, é possível notar que os sistemas de exploração *offshore* de petróleo possuem um grande número de subunidades de componentes (equipamentos, pessoas e software), os quais interagem resultando em um comportamento coletivo entre pessoas e equipamentos de diferentes empresas (auto-organização). Os resultados das ações individuais tomadas são constantemente verificados e realimentam as decisões futuras, introduzindo o aprendizado (realimentação), entretanto os efeitos do processo de exploração surgem (emergem) da combinação das ações dos componentes, produzindo um resultado para o conjunto e promovendo uma auto-organização para manter o sistema funcionando quando influências internas ou externas aos processos ocorrem. Com todas essas características de um sistema complexo, os modelos para análise de acidentes e riscos que busquem contemplar estas particularidades podem ser uma alternativa para lidar com os desafios atuais e a necessidade de

manter os sistemas funcionando mesmo quando as variabilidades ocorrem. Desta forma, os tradicionais modelos de análise de acidentes e riscos precisam ser atualizados para que possam contemplar fatores importantes como as realimentações dos sistemas e os fatores sistêmicos.

### **3.2 Métodos de análise de acidente e riscos na indústria petrolífera**

Atualmente não existe nenhum método de análise de acidentes e riscos capaz de representar perfeitamente a realidade, pois qualquer modelo que adotarmos será uma abstração do mundo real, na qual são incluídos ou excluídos aspectos que se acreditam que sejam mais ou menos adequados para realizar a análise. Todavia, quando escolhermos um método, este exercerá um papel crítico na investigação e na prevenção de acidentes e riscos, pois nos informará as causas ou potenciais causas para os acidentes e influenciará diretamente a definição de ações para recorrência futura (LUNDBERG; ROLLENHAGEN; HOLLNAGEL, 2009). Os cuidados na escolha do método são primordiais, pois se for escolhido um método direcionado para falhas humanas, será identificado que os processos falham por conta das pessoas e o mesmo vale para métodos direcionados para falhas tecnológicas, ou seja, quando é escolhido um aspecto para direcionar a atenção, muito provavelmente não será possível identificar aspectos que não sejam o objetivo e não estejam relacionados a nossa expectativa, sendo este um comportamento chamado pelos psicólogos (CORBETTA; SHULMAN, 2002) e (HOLLNAGEL, 2009) de "atenção seletiva".

Devido à importância de sempre procurar identificar modelos adequados para cada caso estudado, ao longo de nossa história foram desenvolvidas diversas tentativas de modelar acidentes e riscos procurando adequá-los a realidade dos processos e as complexidades que foram incorporadas em cada momento. De acordo com Hollnagel (2004), os modelos de análise de acidentes podem ser categorizados, segundo sua ênfase, em três classes: sequenciais, epidemiológicos e sistêmicos. Outros autores sugeriram uma classificação dos modelos de acidentes utilizando critérios diferentes (HOVDEN; ALBRECHTSEN; HERRERA, 2010) (KATSAKIORI; SAKELLAROPOULOS; MANATAKIS, 2009), todavia adotaremos aqui a divisão em 3 tipos proposta por Hollnagel de modo a facilitar a compreensão

da forma como as informações são trabalhadas em cada modelo para a análise de acidentes. A figura 1, adaptada de Hollnagel (2010), mostra na linha do tempo o período em que cada classe de modelos de acidentes se desenvolveu. A evolução dos modelos remete também às preocupações que guiaram os desenvolvedores e profissionais de segurança em cada período.

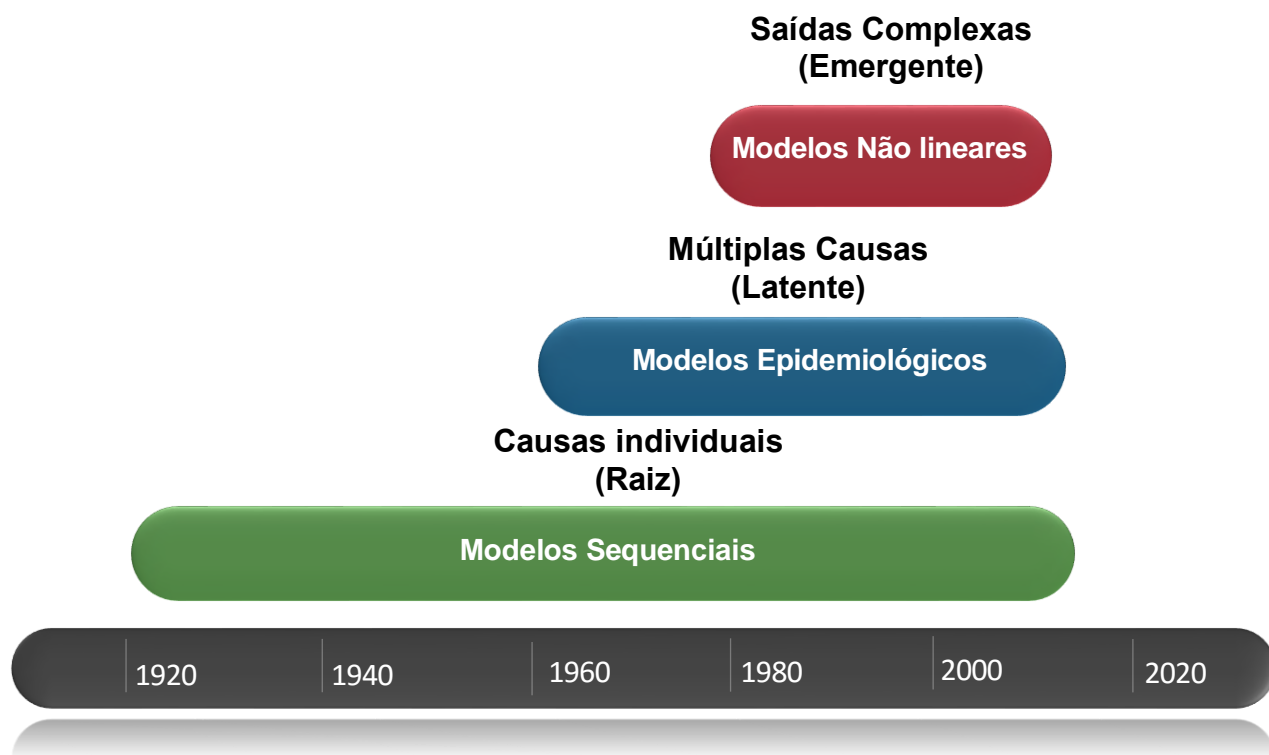


Figura 1 - Modelos de análise de acidentes - adaptado de Hollnagel (2010)

Acidentes podem ser definidos como eventos inesperados, os quais geram saídas indesejadas, podendo causar danos ou ferimentos (HARMS-RINGDAHL, 2013) (ENERGY/DOE, 2012). Para melhor compreensão da forma como cada uma das classes de modelos de análise busca identificar as causas dos eventos inesperados durante a investigação de acidentes ou avaliação de riscos, detalharemos cada uma das classificações de modelos.

O termo “não lineares” utilizado por Hollnagel para classificar alguns modelos refere-se à capacidade dos mesmos em adaptar-se a processos nos quais não é possível avaliar as partes do sistema separadamente como forma de obter os resultados da saída. Em sistemas “não lineares”, uma pequena variação na entrada não terá uma pequena variação proporcional na saída e uma grande intervenção em

uma variável não resultará necessariamente em grandes variações na saída, ou seja, o sistema precisa ser estudado como um todo para que sua saída seja compreendida através da interação dos componentes (RICKLES; HAWE; SHIELL, 2007) (FORRESTER, 1987) (MITCHELL, 2009) (LEVESON, 2011).

### **3.2.1 Modelos Sequenciais**

Os modelos sequencias são muito utilizados pela indústria de exploração offshore de petróleo, sendo que os métodos HAZOP, FMEA, Árvore de Falhas, Bow Tie e APR fazem parte desta classe de modelos. De acordo com os modelos sequenciais, acidentes ocorrem devido a uma sucessão de eventos bem definidos e ordenados na linha do tempo, os quais ocorrem em cadeia, gerados por uma ou poucas causas raízes (UNDERWOOD; WATERSON, 2013a).

Uma das limitações desta classe de modelos está na necessidade de identificação de um ou poucos eventos que iniciam o acidente (causa raiz). Neste processo de busca pela causa que originou todas as outras causas subsequentes, como ilustrado pela figura 2, a definição de causa raiz é totalmente subjetiva, pois depende somente do critério que o investigador utiliza para parar na retrospectiva da cadeia de causas que antecedem o evento. Normalmente o investigador para a reconstrução da sequência retrospectiva de causas quando encontra uma ou mais nas quais possam ser tomadas ações(ENERGY/DOE, 2012). Falhas humanas são frequentemente identificadas como causa raiz de acidentes devido à dificuldade em identificar eventos predecessores e apontar os fatores que moldam o comportamento (HOLLNAGEL, 2009). Na maioria das vezes não é uma tarefa trivial identificar os fatores que fizeram com que as decisões tomadas fossem aparentemente as mais adequadas para quem as tomou, considerando as informações, limitações e condições de cada ocasião.



*Figura 2 - Modelos sequenciais de acidentes*

Os modelos sequenciais, assim como os outros dois modelos aqui apresentados, podem ser utilizados tanto para análise de riscos quanto para investigação de acidentes, todavia o enfoque aqui é nos aspectos relacionados à análise de acidentes devido aos objetivos do estudo. Segundo este tipo de modelo, as investigações de acidentes são realizadas através da reconstrução da cadeia de causas que levaram ao evento da falha, conforme ilustrado na figura 2. Uma das formas de se fazer isso seria perguntar sucessivamente o porquê um determinado evento de falha ocorreu, sempre relacionando ao evento de falha anterior, chegando desta forma a uma causa que originou todos os eventos de falha, também chamada de causa raiz (UNDERWOOD; WATERSON, 2013a).

A ideia atomística da causa raiz tem suas limitações da escolha do momento de parar a investigação, conforme comentado anteriormente, entretanto, além desta restrição, há adicionalmente uma limitação na escolha de ocorrências que podem fazer parte desta cadeia de eventos. Os modelos sequenciais também possuem a limitação da necessidade de causalidade direta, pois de acordo com este tipo de modelo há a necessidade de que um evento seja causa direta de outro para que possa ser montada a sequência de acontecimentos que gerou o acidente. Devido a esta limitação deste tipo de modelo, causas sistêmicas que atingem toda a organização, como reduções de custo e restrições de prazos dificilmente poderiam ser incluídas, pois é aceitável que exista a influência, todavia, a causalidade não é direta e dificilmente poderia ser incorporada ao modelo.

Apesar das limitações, os modelos sequenciais foram os primeiros modelos que surgiram ao longo de nossa história e seus conceitos se perpetuam ao longo do tempo (LUNDBERG; ROLLENHAGEN; HOLLNAGEL, 2009). Sua influência é tão acentuada que alguns guias importantes e recentes de segurança de processos na



indústria química e de petróleo continuam com a premissa de identificação e tratativa de causa raiz como forma de melhorar a segurança (OGP, 2011), (CCPS, 2007) e (OECD, 2008). Da mesma forma que o conceito de causa raiz influencia a identificação de causas para os acidentes na indústria petrolífera, os impactos da escolha deste tipo de modelo também repercutem na forma como são desenvolvidas as medidas de prevenção, pois uma vez que as causas ocorrem em cadeia, medidas de redundância e superdimensionamento para aumento da confiabilidade de componentes poderiam ser utilizadas para evitar que a falha de um componente desencadeasse a sequencia de falhas que provocariam o evento indesejado (acidente) e uma forma de impedir isso seria através do aumento da confiabilidade.

Confiabilidade pode ser compreendida como a probabilidade de que um item possa executar uma função requerida sem falhas, sob condições estabelecidas por um determinado período de tempo (O'CONNOR; KLEYNER, 2012). Como os modelos sequenciais partem da premissa de que a falha de um componente humano ou tecnológico inicia a sequência de eventos que ocorrem em cadeia até que aconteça o evento indesejado, bastaria aumentar a confiabilidade dos componentes para que os acidentes não ocorressem, todavia esta forma de pensar também traz algumas limitações, pois em sistemas complexos é possível que acidentes ocorram sem que nenhum componente tenha falhado em realizar a atividade para a qual ele foi projetado, pois causas sistêmicas e combinações de variabilidades podem levar o sistema como um todo para as margens da segurança e gerar resultados desproporcionais ao processo (RASMUSSEN, 1997).

Segurança não é sinônimo de confiabilidade, pois como não é possível prever todas as interações dos elementos com o ambiente e entre os elementos, é possível que ocorram acidentes sem falhas específicas em componentes. Deste modo, o oposto também é plausível, pois é possível que um processo seja seguro, mas não seja confiável (LEVESON, 1995). Quando um procedimento deixa de ser seguido para evitar um acidente, a adaptação faz com que o sistema não seja confiável, pois não está funcionando conforme projetado, todavia o resultado é uma operação segura.

Quando se utilizam modelos sequenciais para avaliar probabilidades de acidentes através de cálculos estatísticos, é necessária muita cautela com a interpretação dos resultados, haja vista que serão utilizados dados históricos para elaboração dos modelos, todavia os processos mudam muito rapidamente. As pessoas reprojeta os processos continuamente para adaptá-los às restrições de recursos, informações, tempo, materiais e etc, como por exemplo o caso do processo de cimentação da Deepwater Horizon, no qual os procedimentos mudaram pelo menos 3 vezes para se adequarem as restrições de peças, tempo e custo. Os processos que são obserados hoje, certamente são diferentes dos processos de ontem e também não serão iguais aos processos de amanhã. Os resultados quantitativos obtidos com os cálculos estatísticos pouco indicarão sobre as condições atualizadas de segurança dos processos avaliados.

### **3.2.2 Modelos Epidemiológicos**

Os modelos epidemiológicos buscam compreender acidentes de forma análoga aos patógenos residentes no corpo humano, os quais ficam inativos até que sejam desencadeados quando se combinam com fatores que permitem que os sistemas de defesa sejam violados (GORDON, 1949) (LUNDBERG; ROLLENHAGEN; HOLLNAGEL, 2009). De acordo com este tipo de modelo, os acidentes são vistos como a combinação de falhas ativas (atos inseguros) e condições latentes (condições inseguras), nas quais os acidentes são evitados através da aplicação de barreiras (QURESHI, 2008).

O modelo do queijo suíço apresentado na figura 3 é um modelo epidemiológico bastante utilizado na indústria de exploração offshore (REASON; HOLLNAGEL; PARIES, 2006), pois está associado a uma cultura de desenvolvimento de barreiras para evitar que as condições latentes possam se combinar com as falhas ativas, as quais são normalmente as falhas humanas dos atuantes no processo (OGP, 2011) (CCPS, 2009). Os modelos epidemiológicos como o modelo do queijo suíço (REASON, 1990) (REASON; HOLLNAGEL; PARIES, 2006) são uma extensão do modelo sequencial (ZIMMERMANN et al., 2010), ou seja, as principais premissas de

causalidade direta do modelo permanecem, todavia aqui há uma ênfase maior em falhas humanas.

A ênfase em falhas humanas pode ter ocorrido devido ao aumento da confiabilidade dos equipamentos e dificuldade em identificar os fatores que moldam o comportamento das pessoas que atuam nos sistemas, ou seja, os modelos foram desenvolvidos em conformidade com os desafios da época. Adicionalmente a necessidade de causalidade direta permanece nestes modelos, influenciando a forma como as equipes de engenharia lidam com segurança, neste caso a segurança baseia-se no desenvolvimento e fortalecimento de barreiras que buscam evitar o desencadeamento das falhas. A figura 3 mostra um exemplo do funcionamento do modelo epidemiológico de análise de acidentes (REASON; HOLLNAGEL; PARIES, 2006).

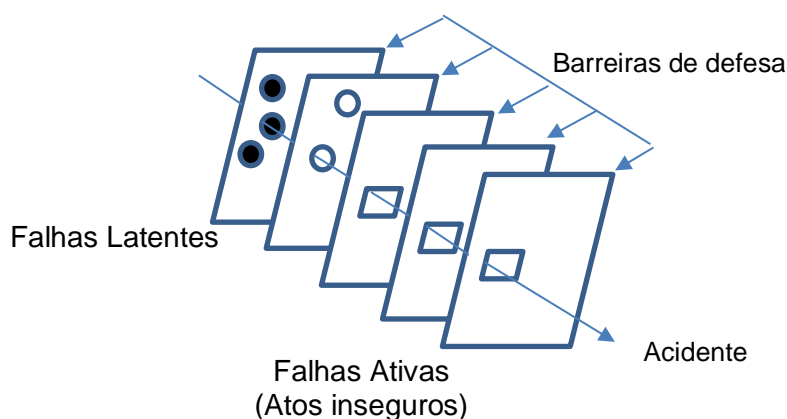


Figura 3 - Modelo Epidemiológico de Acidentes – Adaptado de Reason, Hollnagel e Paries (2006)

### 3.2.3 Modelos não lineares

Os modelos sequenciais e epidemiológicos apresentados neste trabalho apresentam diferentes formas de enxergar os acidentes, todavia possuem como premissa comum a ideia de divisão do todo em partes menores para facilitar a compreensão. Ao longo dos anos os processos mudaram radicalmente e alguns dos novos desafios da atualidade apresentam-se mais complexos, nos quais as variáveis estão inter-relacionadas e comportam-se de forma diferente quando a separadas do

todo na tentativa de dividir em partes menores. Outro ponto importante que deve ser destacado é que os modelos sequenciais e epidemiológicos não consideram que um processo seja realimentado pelos resultados das interações entre em suas variáveis.

Por outro lado, a simplificação dos modelos permite que suas aplicações possam ser executadas com facilidade e enfrentem menor resistência dos gestores das empresas, pois os métodos baseados neste tipo de modelo são mais intuitivos e em alguns casos necessitam de menor tempo investido para aplicação e isso é uma grande vantagem, uma vez que restrições de tempo são imperativas nas organizações.

Para lidar com algumas das lacunas deixadas pelos modelos sequenciais e epidemiológicos, começaram a surgir os modelos não lineares. Os modelos não lineares buscam uma forma distinta para a análise de acidentes e também para a avaliação de riscos, enraizando os modelos na teoria de sistemas. Segundo a teoria de sistemas, para entender o processo é necessário partir do todo para as partes, ou seja, deve-se objetivar entender relacionamentos ao invés de eventos isolados. Nesta forma de enxergar processos, os eventos surgem do relacionamento entre variáveis (SENGE, 1990). Outro ponto importante é a mudança de visão linear entre os acontecimentos para uma visão circular, ou seja, as variáveis exercem influência umas nas outras e as ações atuais realimentam as ações futuras através de enlaces de retroalimentação (FORRESTER, 1961).

Nesta visão sistêmica, busca-se sintetizar o dinamismo das relações entre variáveis tirando a ênfase dos eventos, pois os eventos seriam pontuais e as relações permanecem ao longo do tempo, carregando o dinamismo e produzindo eventos diferentes de acordo com as influências que sofre. Neste sentido, é possível que um sistema eventualmente migre e torne-se não seguro sem que um evento de falha ocorra, todavia bastaria apenas um ajuste inapropriado, eventualmente da combinação de relações entre variáveis que tinham baixa probabilidade de acontecer, entretanto, quando as combinações acontecem os resultados são desproporcionais.

Vale ressaltar que os eventos estão incluídos nas análises não lineares, mas há uma mudança de objetivo, pois quando se investigam acidentes o ponto mais importante não deve ser a identificação em detalhes minuciosos do que aconteceu. Os detalhes dos eventos podem ser interessantes, mas podem ser pouco úteis se perder o direcionamento. A maior das intenções na investigação de acidentes é descobrir como o sistema que foi projetado para evita-los permitiu que o mesmo acontecesse, e a partir destas informações busca-se atuar no sistema para evitar reincidência futura.

Outro ponto importante dos modelos não lineares é a inclusão do dinamismo das combinações. Já foi tratado anteriormente da visão do todo para as partes e da questão dos enlaces circulares, todavia outro ponto importante que deve ser destacado é que diferentemente dos modelos lineares, os modelos não lineares consideram que há um dinamismo na combinação entre variáveis, ou seja, os enlaces causais entre as variáveis atuam através dos seus próprios algoritmos promovendo uma auto-regulação do sistema para mantê-lo funcionando, mesmo que perturbações internas ou externas ocorram. Com este princípio, entende-se que mesmo quando ocorre uma falha de componente, seja ele humano ou tecnológico, o sistema tende a tentar manter-se em funcionamento. Esta visão influencia uma forma diferente de fazer engenharia de segurança, pois o enfoque de confiabilidade muda para uma visão de falha segura. Neste contexto, amplia-se a visão de apenas evitar falhas para uma visão de projetos de sistemas que possam falhar, mas que falhem de forma segura.

Os métodos não lineares geralmente utilizam os conceitos da teoria de sistemas baseadas nos estudos pioneros de Forrester (1961) e Bertalanffy (1969), os quais não são necessariamente uma novidade, mas a sequência lógica para o desenvolvimento dos modelos faz com que apresentem uma visão diferente de segurança e tornam-se opções para lidar com os sistemas complexos atuais. Dois métodos recentes de investigação de acidentes baseados na teoria de sistemas são FRAM (Functional Resonance Analysis Method and Process) e STAMP (System Theoretic Analysis Method and Process) (HOVDEN; ALBRECHTSEN; HERRERA, 2010), os quais são objetos deste estudo.

Por outro lado, há uma resistência das empresas na aplicação de novos métodos como os relacionados aos modelos não lineares, gerando uma lacuna entre os modelos desenvolvidos através de pesquisas científicas e os modelos efetivamente aplicados na indústria (UNDERWOOD; WATERSON, 2013b). Os modelos não lineares, ou sistêmicos, geram uma resistência na aplicação por se mostrarem menos intuitivos e demandarem uma mudança de paradigma na construção de suas modelagens, uma vez que representa mais uma ruptura entre os métodos desenvolvidos com os modelos de cadeia de eventos e epidemiológicos do que uma evolução dos modelos anteriormente desenvolvidos. A aplicação de modelos não lineares como alternativa para as análises de segurança dos processos de exploração offshore de petróleo, como proposto neste estudo, também auxiliam na avaliação da viabilidade de aplicação prática destes modelos para o seguimento de petróleo e gás.

### **3.3 Engenharia de Resiliência**

A mudança de visão dos modelos não lineares mostra que os processos são dinâmicos e é necessário aprender a conviver com a variabilidade. Todavia, alguns métodos bastante difundidos na gestão das organizações tratam a variabilidade como uma inimiga da produtividade e conseqüentemente da segurança. Entre estes métodos, podem ser citados o Six Sigma (RAY, 2005) e o Lean Manufacturing (GA et al., 2011), todavia esta visão de combater a variabilidade a qualquer custo, eventualmente pode não ser a solução para todos os problemas.

Evidentemente que não é possível prescrever todas as atividades e rotinas de trabalho, bem como mesmo quando se consegue prescrever as atividades, não é possível identificar todas as restrições de informações, tempo, conhecimento, recursos e etc., as quais os componentes humanos e tecnológicos que atuam no sistema estão sujeitos, pois as influências internas e externas estão em constantes mudanças (CRANDALL; KLEIN; HOFFMAN, 2006). Neste contexto de processo, a capacidade de adaptação torna-se de fundamental importância. Considerando os

sistemas que combinam fatores humanos, tecnológicos, hardware e software, a habilidade de conviver com a variabilidade torna-se fundamental.

A engenharia de resiliência surge então como uma forma de conviver com a variabilidade, pois trata-se de uma forma de usar a engenharia para preparar os sistemas de forma que se tornem resistentes e capazes de continuar funcionando mesmo quando as variabilidades ocorrem (HOLLNAGEL, 2012), ou seja, os sistemas são trabalhados para que não sejam perdidas as propriedades de controle e as variáveis permaneçam controladas, mesmo que perturbações possam influenciar (LEVESON, 1995). Neste contexto, também são estabelecidos meios para que o processo se recupere rapidamente e possa ser reestabelecido quando houver interrupção no funcionamento ou perda das propriedades de controle.

Quando se investiga um acidente ou realiza-se qualquer análise de segurança, usualmente direcionam-se os esforços em compreender as saídas indesejadas e procuram-se entender “o que” falhou. Obviamente que é natural que as saídas indesejadas ocorram com uma frequência muito menor que as saídas desejadas, ou seja, o funcionamento normal da maioria dos processos é que sejam geradas muito mais saídas positivas que negativas. Entender “o que” falhou é interessante para investigação de acidentes e avaliações de segurança, todavia esta informação precisa ser complementada para que ações possam ser tomadas e possibilite evitar a recorrência das saídas indesejadas. Desta forma, procura-se identificar informações que permitam compreender “porque” as falhas acontecem.

Como os processos estão em constante mudança e adaptação, optou-se por observar somente as saídas negativas para entender “porque” as falhas acontecem, seguramente a amostragem será muito pequena para entender o processo como um todo. Os componentes humanos e tecnológicos adaptam-se às restrições do processo com grande frequência e velocidade, todavia quando as adaptações dão certo, não é muito comum que investigações sejam feitas para entendê-las, por outro lado, quando as adaptações não são bem sucedidas, buscam-se respostas urgentes para os eventos indesejados gerados (HOLLNAGEL, 2009).

A engenharia de resiliência considera que as saídas positivas e negativas possuem causas semelhantes, pois ambas são resultantes das adaptações dos processos às influências internas ou externas. Para engenharia de resiliência, segurança não é somente a ausência de acidentes e incidentes, pois engenharia de resiliência é a habilidade de um sistema ajustar ao seu funcionamento inicial durante e depois de mudanças ou perturbações (HOLLNAGEL, 2011). Deste modo, a engenharia de resiliência não procura identificar falhas específicas humanas ou tecnológicas, mas busca entender o processo como um todo, considerando suas adaptações e combinações de variáveis independentemente da geração de eventos positivos ou negativos.

A engenharia de resiliência entende que os sistemas são capazes de se manter funcionando nos mais diversos cenários e sujeitos a diversas fontes de influência internas e externas principalmente devido a capacidade dos seus componentes humanos e tecnológicos se adaptarem às restrições. Todavia, as adaptações que levam aos eventos indesejados são muito próximas das adaptações que permitem que o sistema possa desempenhar como desejado. Com esta premissa, no caso de simplesmente tentar eliminar as adaptações que levam aos eventos indesejados, também estaria diminuindo as chances de adaptações que fazem com que o sistema possa desempenhar como pretendido.

A engenharia de resiliência pode ser mais bem definida como a capacidade de ajustar para o funcionamento, sendo que esta capacidade de ajuste estaria relacionada a quatro habilidades (HOLLNAGEL; WOODS; WREATHALL, 2010):

- Antecipação: Saber o que fazer (Potencial)
- Monitoramento: Saber o que olhar (Crítico)
- Resposta: Saber o que esperar (Atual)
- Aprendizado: Saber o que aconteceu (factual)

A engenharia de resiliência entende que as explicações para coisas que dão certo são basicamente as mesmas explicações para as coisas que dão errado, todavia como normalmente é mais comum as coisas darem certo com uma frequência muito maior, deve-se entender também as adaptações que geraram



resultados positivos, pois o enfoque exclusivo nos eventos indesejados não permitiria compreender o sistema estudado na sua completude e as decisões provavelmente não seriam as mais assertivas. Os métodos utilizados para a análise do acidente da Deepwater nesta pesquisa têm como premissa a análise holística do processo, sem buscar identificar um único culpado específico, seja ele humano ou tecnológico.

### **3.4 Segurança de Processos**

Para melhor lidar com a complexidade dos processos da indústria de exploração e produção de petróleo, incluindo a área que atua em sistemas marítimos (*Offshore*), alguns guias, tais como (CCPS, 2007), (OECD, 2008), (HSE, 2006b), tem adotado pelas organizações na tentativa de disseminar as melhores práticas para evitar os acidentes de processo. De acordo com estes guias, acidentes de processo, também chamados de acidentes maiores, diferem-se de acidentes ocupacionais, pois acidentes de processos seriam acidentes que provocam um maior número de vítimas e estão relacionados à segurança das instalações (HSE, 2006b). Neste entendimento, segurança ocupacional estaria relacionada à saúde dos trabalhadores e segurança de processos estaria preocupada com a segurança das instalações e com o adequado funcionamento dos processos químicos.

Utilizar o conceito de segurança de processos como forma complementar a segurança ocupacional pode ser uma alternativa, todavia quando se privilegia um aspecto específico da segurança, pode-se perder a visão do todo e deixar de enxergar aspectos que possam estar relacionados à segurança ocupacional e de processos simultaneamente. O conceito de “atenção seletiva” comentado anteriormente também se aplica para este caso, ou seja, passa-se a ter dificuldades em identificar os aspectos que não estejam relacionados ao nosso foco de atenção.

Neste estudo, foram realizadas pesquisas bibliográficas de guias de análise de segurança para identificar qual seria a melhor opção para o aprofundamento dos estudos e aplicação na indústria offshore, uma vez que buscou-se realizar nesta pesquisa uma análise de segurança baseada em um método sistemático. Para um

melhor aproveitamento das lições aprendidas com as experiências da indústria química e de petróleo, revisitaram-se os guias para identificar, dentro das recomendações e abordagem, quais seriam os modelos de análise de acidentes e riscos que ajudaram a influenciá-los.

Foram avaliados 5 guias que exercem grande influência na indústria química e petrolífera para a implementação de programas de gestão de segurança de processos, conforme Tabela 1. Nesta avaliação dos guias de segurança de processos é possível observar que os guias avaliados enfatizam modelos lineares ou epidemiológicos para entender como ocorrem os acidentes e riscos. Provavelmente a forma mais intuitiva de análise e a impressão de previsibilidade do futuro dada pelos modelos lineares e epidemiológicos pode ter gerado uma maior difusão também nas áreas químicas e de petróleo.

*Tabela 1 - Guia de Segurança x Modelo de Análise*

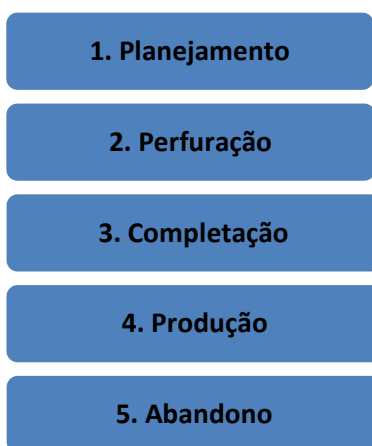
Guia avaliado	Modelo de Análise
(CCPS, 2008)	Linear / Epidemiológico
(HSE, 2006b)	Epidemiológico
(OECD, 2008)	Linear / Epidemiológico
(OGP, 2011)	Epidemiológico

### **3.5 Processo de exploração *offshore* de petróleo**

Usualmente o processo de exploração *offshore* de petróleo tem custos superiores ao processo de exploração em terra firme (*onshore*), todavia com a redução das descobertas de reservas de petróleo em terra, as empresas de exploração e produção são empurradas para áreas ainda não exploradas, em especial, as áreas de águas cada vez mais profundas. Esta busca por novas reservas exige grandes investimentos e possui muitos riscos e incertezas, pois poços em águas profundas como o caso do bloco de Macondo - 252, utilizado como

estudo de caso nesta pesquisa, podem custar centenas de milhares de dolares (BOESCH, 2012).

Não somente as influências relacionadas ao processo de exploração e produção em si, mas aspectos políticos e da economia global, como crises econômicas e redução da atividade industrial podem influenciar fortemente a viabilidade deste tipo de investimento e eventualmente provocar restrições econômicas e de tempo, gerando uma necessidade de rápida adaptação para que isso não afete a segurança. Como este estudo de caso trata-se da análise de um acidente em exploração marítima (offshore) de petróleo, foram descritas resumidamente as etapas de um processo genérico de exploração offshore. Obviamente, o objetivo desta descrição não é esgotar o tema, mas fornecer uma visão geral das etapas do processo para uma melhor compreensão do acidente estudado. A atividade de exploração e produção offshore pode ser dividida em 5 fases (OFFSHORE CENTER DANMARK, 2010):



*Figura 4 - Etapas do processo de exploração e Produção Offshore*

### **3.5.1 Planejamento**

Nesta etapa, a empresa que recebeu os direitos de explorar elabora o seu plano de exploração e normalmente passa pelas aprovações do órgão regulador. O planejamento inclui a definição das etapas, recursos, metas e condições nas quais

as metas serão alcançadas. A legislação para as permissões de exploração diferem para cada país, todavia usualmente o regulador exerce a função de ponderar entre os benefícios econômicos da atividade de exploração e os potenciais impactos ambientais e sociais resultantes da atividade.

### **3.5.2 Perfuração**

A etapa de perfuração de um poço offshore inicia-se após as aprovações do planejamento e autorização pelos órgãos competentes para início das atividades.

As atividades de perfuração usualmente são precedidas por estudos geológicos e geofísicos, os quais ajudam a conhecer melhor a formação e detalhes dos locais onde são mais prováveis as chances de encontrar reservas de petróleo comercialmente viáveis. Para suportar os equipamentos e fornecer uma base de apoio para a realização das atividades de perfuração, são normalmente utilizadas instalações conhecidas como Plataformas (OFFSHORE CENTER DANMARK, 2010). Existem tipos diferentes de plataformas, conforme o local e as necessidades do projeto de exploração e produção.

No caso da Deepwater Horizon, a embarcação utilizada era uma plataforma do tipo semi-submersível com posicionamento dinâmico. Neste caso, a plataforma possui uma parte da estrutura que é alagada e fica submersa dando maior estabilidade. O posicionamento da plataforma é realizado através de potentes propulsores que mantêm a plataforma em uma posição estável no mar através de um sistema de posicionamento dinâmico, no caso, via GPS (NAE, 2011a).

A perfuração do poço de petróleo é realizada em etapas e o poço é construído em um formato parecido com um telescópio, pois começa a ser construído com um diâmetro maior e vai sendo reduzido o seu diâmetro conforme cada etapa é finalizada. A maior parte do processo de perfuração é realizada por meio de brocas rotativas que vão perfurando o leito do mar, sendo suportadas por um fluido de perfuração. A função do fluido de perfuração é refrigerar a broca, remover os resíduos de perfuração de dentro do poço e exercer pressão hidrostática para evitar

que os hidrocarbonetos, gás e água dos reservatórios adentrem ao poço de forma indesejada. A entrada de hidrocarbonetos, gás e água de forma indesejada dentro do poço é chamada de *Kick* e deve ser controlada pelo aumento da densidade do fluido de perfuração ou utilização de válvulas de controle. Quando o *kick* não pode ser controlado e o controle do poço é perdido, é dito que ocorreu o *Blowout* (SKALLE, 2012).

Desta forma, o fluido de perfuração exerce algumas atividades bastante críticas e importantes durante a etapa de perfuração e deve ser cuidadosamente controlado, pois sua formulação não pode ser densa demais, pois poderia fraturar a formação, e também não pode ser “leve” demais, pois permitiria que fluidos escapassem da formação para o poço gerando o *kick*. Quando o fluido de perfuração fratura a formação e começa a penetrar na fratura, a coluna de fluido que exerce pressão sobre os hidrocarbonetos pode ser diminuída e conseqüentemente a pressão exercida sobre a formação diminui, gerando a possibilidade de *kick*. Como o fluido de perfuração circula em um circuito fechado entrando e saindo do poço através do tubo de perfuração e da broca, os resíduos de perfuração são movidos junto com o fluido de perfuração para os reservatórios e ali são peneirados para que o fluido possa retornar ao poço. Os resíduos retirados do fluido de perfuração são analisados para assegurar que a formação encontrada está de acordo com o esperado nos estudos geológicos e geofísicos (BLYTHE et al., 2011).

A perfuração também necessita dos equipamentos de transporte de cargas e içamento embarcados e utiliza tubos específicos de perfuração conforme a necessidade e plano de perfuração. Para assegurar a segurança do poço, são utilizados dispositivos de monitoramento de pressão, volume de fluido de perfuração no poço, vazão de fluido e outros parâmetros sobre o processo de perfuração. Um aumento de volume de fluido de perfuração pode indicar, por exemplo, que gás está invadindo o poço e criando uma pasta de fluido de perfuração misturado com o gás. Além dos sistemas de monitoramento, o poço conta ainda com um dispositivo de segurança chamado BOP – Blowout Preventure. O BOP é uma válvula de segurança que fica na entrada do poço no leito do mar. Em caso de situações de emergência, o BOP possui um conjunto de válvulas que podem selar o espaço entre

as paredes do poço e o tubo de perfuração ou até mesmo cortar o tubo de perfuração e selar o poço para evitar um *Blowout* (WASSEL, 2012).

A etapa de perfuração é cuidadosamente projetada e é realizada em etapas. Após perfurar uma etapa do poço, é instalado em seu interior um tubo de revestimento, o qual após devidamente posicionado é cimentado no local, isolando o poço da formação. Este isolamento impede que o fluido de perfuração continue exercendo pressão sobre a formação e eventualmente possa fazer com que ela desmorone. Além disso, o isolamento também evita que fluídos da formação possam invadir o poço e eventualmente também venham a provocar um *Blowout* (SKALLE, 2012).

### **3.5.3 Completação**

A completação é o conjunto de atividades que preparam o poço para produção depois de chegar até a zona alvo. As atividades de completação buscam assegurar e revestir o poço de forma a torná-lo adequado para garantir uma produção segura e buscam uma eficiência de funcionamento e durabilidade para evitar a necessidade de manutenções futuras durante a fase de produção. Nesta etapa, são utilizados tubos de revestimentos específicos para produção e a cimentação é configurada para permitir melhor desempenho na atividade posterior de produção.

### **3.5.4 Produção**

A produção de petróleo é a etapa de colocar o poço de petróleo para produzir efetivamente. Nesta fase, um conjunto de válvulas é posicionado sobre o poço para colocá-lo em produção e embarcações específicas são utilizadas para obter maior eficiência. Este conjunto de válvulas é conhecido como árvore de natal (GRAHAM et al., 2011) e permite monitorar e controlar a produção de diversos poços conectados a ela.

### **3.5.5 Abandono**

Como a perfuração do poço usualmente é realizada por uma plataforma com recursos diferentes dos recursos necessários para produzir e com um custo normalmente superior. As atividades de abandono são um conjunto de procedimentos para avaliar a integridade do poço e tamponar para que a plataforma possa abandonar o poço removendo a coluna de perfuração e parte do fluido utilizado, sem comprometer a integridade estrutural (GRAHAM et al., 2011). Outra possível situação para abandono é quando o poço deixa de ser produtivo e a atividade de produção no local é finalizada.

### **3.6 STAMP – System Theoretic Analysis and Process**

#### **3.6.1 Fundamentos do STAMP**

O STAMP – *System Theoretic Analysis Method and Process* é um método de análise de acidentes e riscos baseado na teoria de sistemas. O método é fundamentado nos conceitos de restrição de segurança, estrutura de controle hierárquico e modelo de processos. De acordo com o STAMP, o sistema usualmente é mantido em um estado de equilíbrio ativo de controle e retroalimentação, pois os sistemas seriam tratados como um processo dinâmico e que estariam em constante adaptação reagindo às mudanças internas e externas (LEVESON, 2004).

Conforme o método, segurança é entendida como uma propriedade emergente do sistema, a qual surge da interrelação de variáveis que se combinam e buscam um constante e dinâmico equilíbrio. Neste caso a segurança não seria obtida através da confiabilidade de componentes, mas através do reforço das ações de controle que robustecem o comportamento seguro através de restrições e buscam manter sua efetividade adaptando-se as mudanças ao longo do tempo (LEVESON, 1995).

Deste modo, segurança torna-se um problema de controle onde a meta é controlar o comportamento do sistema e reforçar as restrições de segurança. Para entender acidentes seria necessário então mudar a busca de falhas de componentes

para procurar identificar como a estrutura de controle não conseguiu evitar que as falhas ocorrem. Os acidentes futuros seriam então prevenidos através do reforço da estrutura de controle que robusteceria as restrições de segurança necessárias (LEVESON, 2011).

A idéia de aplicar teoria de sistemas na prevenção de acidentes não é nova, pois os estudos de Rasmussen já buscavam compreender este dinamismo das estruturas de controle aplicadas a segurança para lidar com sistemas complexos (RASMUSSEN, 1997). A proposta também buscava incorporar o dinamismo da evolução dos sistemas, pois os trabalhos de (PERROW, 1981) chegaram a utilizar a expressão “acidentes normais” como forma de expressar a dificuldade em prevenir acidentes em sistemas complexos, pois a constante mudança tornava-os imprevisíveis e mais difícil preveni-los.

### **3.6.2 Restrição de Segurança**

STAMP tem como premissa que os eventos indesejados ocorrem somente quando as restrições de segurança não são reforçadas adequadamente. As restrições de segurança para o método seriam então a imposição de limites nos quais o processo poderia gerar relações entre variáveis de forma segura.

### **3.6.3 Estrutura de Controle Hierárquico**

A premissa de estrutura de controle hierárquico considera que os sistemas sócio-técnicos que construímos atualmente podem ser modelados como uma hierarquia de níveis de organização, na qual os níveis mais altos conseguem impor restrições no funcionamento dos níveis mais baixos para assegurar o controle. Os controles inadequados ocorreriam então quando não existirem restrições ou elas forem inadequadamente aplicadas. Retroalimentações inadequadas do nível inferior para o superior também poderiam gerar ações de controle inadequadas (LEVESON, 2002b).



Descrever acidentes em termos de retroalimentações e adaptações em níveis de controle seria então uma forma de atuar na prevenção de acidentes. Em cada nível da estrutura de controle hierárquico canais de comunicação para estabelecer a estrutura de controle e retroalimentação são necessários.

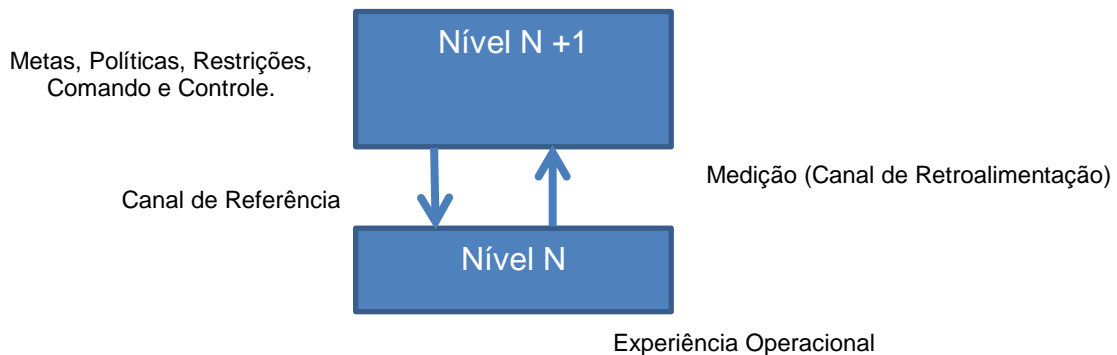


Figura 5 - Canais de Comunicação e Controle entre níveis - Adaptado de Leveson (2004)

### 3.6.4 Modelo de Processo

O modelo de processo é o terceiro pilar da estrutura do método STAMP. Para que um modelo de processo funcione são requeridas 4 condições:

1. Meta
2. Ação de Controle
3. Ação de Observação
4. Condição modelo

A **Meta** no caso do STAMP é a restrição de segurança que precisa ser reforçada. Para que o modelo de processo funcione é necessário que seja possível atuar sobre a variável controlada através de uma **ação de controle**. Ao tomar a ação de controle, deve ser possível medir o processo e avaliar a efetividade da ação de controle tomada por meio de uma **ação de observação**. A **condição modelo** é que o operador seja ele humano ou automatizado deve ter um modelo de processo que permita que ele avalie as informações de entrada e através de um algoritmo próprio de controle possa atuar no processo para buscar corrigir eventuais variações e mantê-lo dentro da meta desejada (LEVESON, 2011).

Como dentro do controlador, seja ele humano ou automatizado, há um modelo de processo para que possa auxiliá-lo na tomada de decisão, acidentes também ocorrem quando há desatualização deste modelo de processo fazendo com que o controlador exerça uma ação de controle inadequada.

Adicionalmente, como em qualquer estrutura de controle, há um tempo entre a leitura da informação de retroalimentação, o processamento da informação através do modelo de processo e a resposta através de uma ação de controle, pois estas ações não são instantâneas e possuem os tempos necessários de leitura das informações e processamento. Em alguns casos, é possível que o processo possua dois controladores, todavia nestes casos os modelos de processo devem ser avaliados para que não sejam executadas ações de controle conflitantes ou deixem de ser tomadas as devidas ações de controle que garantiriam a resposta do sistema dentro das condições desejadas.

### 3.6.5 Teoria de controle aplicada à segurança

Segundo STAMP, acidentes ocorrem então quando há inadequação da imposição das restrições para implantação das ações de controle, inadequação da execução das ações de controle, perda de retroalimentação ou retroalimentação inadequada. A tabela a seguir mostra de forma mais completa as situações em que podem ocorrer acidentes de acordo com o método.

*Tabela 2 - Classificação de Falhas de Controle (LEVESON, 2011)*

---

<b>1 - Inadequação da imposição de restrições para implantação das ações de controle (ações de Controle)</b>
1.1 - Perigos não identificados
1.2 - Perda, ineficácia ou inadequação de ações de controle para fatores de risco identificados
1.2.1 - Projeto do algoritmo de controle (processo) não impõe restrições.
- Falhas na criação do processo.
- Mudança de processo sem a correspondente mudança no algoritmo de controle (assincronia de evoluções).

---

- 
- Modificação ou adaptação incorreta
  - 1.2.2 - Modelo de processo inconsistente, incompleto ou incorreto,
  - Falhas na criação de processo.
  - Falhas na atualização de processo (evolução assíncrona).
  - Defasagem de tempo
  - Imprecisões de medição não contabilizadas
  - 1.2.3 - Coordenação inadequada entre controladores e tomadores de decisão (áreas de fronteira entre atividades e co-atividades)
- 

## **2 - Inadequação da execução de ações de controle:**

- 2.1 - Falha de comunicação
  - 2.2 - Operação inadequada do atuador
  - 2.3 - Defasagem de tempo
- 

## **3 - Perda de retroalimentação ou retroalimentação inadequada**

- 3.1 - Não fornecida no projeto do sistema
  - 3.2 - Falha de comunicação
  - 3.3 - Defasagem de tempo
  - 3.4 - Operação inadequada do sensor (informação incorreta ou não fornecida)
- 

### **3.6.6 CAST**

O Método STAMP pode ser usado tanto para análises retrospectivas de acidentes quanto para análises prospectivas de riscos. As análises prospectivas de riscos recebem o nome de STPA - Systems-Theoretic Process Analysis e as análises retrospectivas baseadas no STAMP recebem o nome de CAST Causal Analysis based on STAMP (LEVESON, 2011) (LEVESON, 2013) .

CAST é um padrão de trabalho para análises de acidentes baseadas no modelo STAMP, todavia como o modelo STAMP é baseado na teoria de sistemas, CAST não tem foco na identificação de culpados pelos acidentes e pouca utilidade teria quando esta informação é necessária, como por exemplo nas investigações judiciais. Entretanto CAST procura entendimento da estrutura de controle, procurando respostas para os motivos do sistema de controle não ter se adaptado as mudanças e permitido a falha. Como usualmente as causas identificadas para os acidentes estão relacionadas a ênfase do método utilizado (LUNDBERG; ROLLENHAGEN; HOLLNAGEL, 2009), CAST tem como premissa que saber “o que” aconteceu é menos importante do que entender “porque” aconteceu, pois o grande motivo da investigação de acidentes é identificar como melhorar os processos no futuro.

Quando se identificam falhas humanas como causas dos acidentes, se deve procurar entender porque as decisões tomadas faziam sentido no momento do evento. CAST tem a premissa de que as pessoas procuram fazer bem o seu trabalho e os acidentes normalmente são adaptações às variabilidades internas e do ambiente.

Segundo Leveson (2011), os passos para análise de acidentes usando CAST são:

1. Identificar os perigos e as restrições de segurança violadas;
2. Construir a estrutura de segurança como ela foi projetada para funcionar;
3. Para cada componente, determinar as responsabilidades e ações de controle inadequadas. O contexto em que as decisões foram tomadas auxiliam na análise;
4. Avaliar comunicação e coordenação;
5. Considerar dinâmica e migração para alto risco;
6. Determinar as mudanças que possam reforçar as restrições de segurança no futuro;
7. Gerar recomendações.

### **3.7 FRAM – Functional Resonance Analysis Method and Process**

#### **3.7.1 Fundamentos do FRAM**

FRAM – *Functional Resonance Analysis Method* é um método para análise de acidentes e riscos baseado na teoria de sistemas e na engenharia de resiliência. O método é baseado nos seguintes princípios (HOLLNAGEL, 2013):

1. **O Princípio da equivalência:** O método tem como premissa que sucessos e falhas não possuem necessariamente explicações diferentes e a mesma explicação poderia ser usada na maioria dos casos.

2. **O princípio dos ajustes aproximados:** As pessoas estão se ajustando continuamente e o que elas fazem é correspondente as condições.
3. **O princípio da emergência:** é o princípio de que nem tudo tem uma causa específica.
4. **O princípio da ressonância:** é o princípio de que as explicações com base em causa e efeito não são adequadas. A combinação de variabilidades e interações não lineares seria uma explicação mais adequada.

### 3.7.2 Resonancia Funcional

Quando a variabilidade das funções coincide, uma função pode exercer influência sobre outra e isso gerar uma amplificação ou atenuação do comportamento desta função, sendo que os impactos emergem da combinação de variáveis. Este ajuste de comportamentos normais e diários das variáveis pode se combinar com múltiplas variáveis e gerar resultados desproporcionais (HOLLNAGEL, 2012).

### 3.7.3 Aspectos do Modelo

Para identificar as dependências e acoplamentos entres funções, o modelo prescreve a classificação das funções em 6 aspectos:

1. Entrada: Descreve aquilo que é transformado ou inicia a função
2. Saída: Descreve os resultados da função
3. Pré-condição: Descreve as condições que devem ser atendidas antes da função começar a desempenhar o seu papel

4. Recurso: Descreve o que é necessário ou consumido durante o desempenho da função.
5. Controle: Descreve o que supervisiona ou regula a função
6. Tempo: Representa as varias formas em que o tempo pode afetar a função.

A representação gráfica do modelo FRAM utiliza hexagonos com os aspectos identificados pelas suas iniciais nas extremidades, conforme a figura 6:

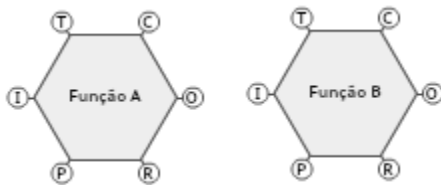


Figura 6 - Modelo FRAM (HOLLNAGEL, 2012).

A construção do modelo FRAM para análise de acidentes segue os seguintes passos:

1. Definição do propósito;
2. Identificação das funções;

A identificação das funções é realizada para mapear o processo, ou seja, funções são as atividades necessárias para a realização do processo. As funções de apoio que não exercem grande influência no sistema estudado podem ser suprimidas do modelo pelo simples fato de não contribuírem na análise. A identificação das funções também contempla a necessidade de mapeamento dos 6 aspectos (entrada, saída, pré-condição, controle, recurso e tempo).

3. Identificação das variabilidades;

A identificação das variabilidades é realizada através da avaliação das possibilidades de variação dos aspectos de cada função;

4. Análise dos acoplamentos;

A análise dos acoplamentos avalia o impacto das variabilidades dos aspectos mapeados no item 2 quando acopladas às outras funções.

#### 5. Determinação de medidas.

Para contruir um modelo FRAM, inicialmente são identificadas as funções ou a função de interesse. Uma vez realizada a identificação, as funções são descritas conforme os seis aspectos prescritos pelo método, sendo que o software *FRAM Model Builder* pode ser utilizado para auxiliar na organização dos dados. A identificação não precisa incluir todos os aspectos possíveis, mas somente aqueles necessários para a análise, mantendo assim a constância de propósito, entretanto sem esquecer que ao incluir os aspectos deve-se considerar que eles são saída de outras funções e as mesmas devem constar no modelo, sejam elas funções “background” ou “foreground”.

As funções “background” ficam representadas no *FRAM Model Builder* por hexágonos na cor cinza e para o estudo são aquelas funções que podem ser consideradas constantes, pois sua variabilidade não é interpretada nas instanciações da análise, precisando apenas que seja descrito um aspecto de entrada ou saída, não necessitando que seja detalhada. As funções “foreground” são parte do interesse de estudo e devem ser detalhadas em relação aos aspectos relevantes, pois sua variabilidade é avaliada nas instanciações do modelo, incluindo seus acoplamentos. A representação das funções é “foreground” é realizada na cor branca (HOLLNAGEL, 2013).

Além dos termos *foreground* e *background*, as funções também são descritas como “a montante” e “a jusante” como forma de representar sua relação temporal com outras funções, ou seja, dada uma função de interesse naquele instante de tempo, temos algumas funções que ocorrem antes “a montante” e outras funções que recebem as saídas da função “a jusante”. Como o sistema é avaliado em instanciações, é considerado o que ocorre em determinado instante para uma situação típica, sendo possível que as funções em outros momentos possam alterar suas posições de “a jusante” para “a montante” e vice e versa (HOLLNAGEL; HOUNSGAARD; COLLIGAN, 2014).

Durante as instanciações do modelo são avaliados como os acoplamentos podem levar a resultados inesperados, todavia para esta análise o método considera que as variabilidades de saída são mais importantes que as variabilidades internas das funções, pois caso as variabilidades internas não alterem a saída, não existem possíveis acoplamentos que possam ser afetados. Para esta análise o método assume também que funções humanas, tecnológicas e organizacionais possuem características diferentes de variabilidade e tipicamente variam da seguinte forma (HOLLNAGEL, 2013):

**Funções humanas:** Constumam variar com grande frequência e em grande amplitude;

**Funções tecnológicas:** Usualmente não possuem variabilidades significativas;

**Funções organizacionais:** Variam com pouca frequência, mas em grande amplitude.

As instanciações do modelo avaliam as variabilidades que podem ocorrer em diferentes condições, ou seja, as variabilidades potenciais, e a variabilidade esperada que realmente aconteça em determinado cenário específico, a qual é chamada de variabilidade atual. A variabilidade de saída é considerada mais importante para o estudo dos acoplamentos utilizando FRAM, desta forma, o modelo prescreve que os acoplamentos das saídas de uma função a montante com outros aspectos (pré-condição, recurso, controle, tempo, entrada) da função a jusante geram um conjunto de possíveis variabilidades potenciais (HOLLNAGEL, 2012).



## 4 Metodologia

### 4.1 Passos para execução da pesquisa:

Os passos enumerados abaixo apresentam o fluxo macro da sequência utilizada por nesta pesquisa, desde a fase de estudo dos modelos de análise de acidentes até a comparação dos resultados apresentados pelos modelos FRAM, STAMP e Árvore de falhas.

1. Estudo dos métodos e sequência de passos para modelagem, conforme referencial teórico;
2. Identificação das variáveis e aspectos que devem compor o modelo através da leitura dos relatórios de acidentes e conformidade com as premissas do modelo adotado. Os guias para construção dos modelos estão disponíveis em Hollnagel (2012) para o método FRAM e Leveson (2002a) para STAMP.
3. Construção dos modelos com a utilização de software de apoio para organização dos dados. Foi utilizado o software FRAM Model Builder.
4. Elaboração de proposta de melhorias com base nos aspectos que reduzem a resiliência do sistema identificados por cada modelagem.
5. Comparação dos modelos, verificando facilidade de construção do modelo, necessidade de software para modelagem, capacidade de identificar causas sistêmicas, sistemática para priorização das causas, adequação para sistemas complexos, subjetividade da análise, capacidade de identificar culpados.
6. Descrição da análise dos resultados e conclusões da pesquisa.

## 4.2 Modelagem

A modelagem do acidente ocorrido no poço Macondo, em 20 de abril de 2010 no golfo do México é desenvolvida nesta pesquisa de acordo com os procedimentos apresentados para análise retrospectiva de segurança baseada nos métodos FRAM (HOLLNAGEL, 2012) e STAMP (LEVESON, 2002a), sendo que estes métodos são apontados pelos autores como mais adequados para serem utilizados em análises de acidentes em sistemas complexos.

No caso do STAMP, o método retrospectivo de análise também recebe o nome de CAST (*Causal Analysis based on STAMP*) (LEVESON, 2011). Conforme proposto por esta pesquisa, as fontes de dados para o desenvolvimento das modelagens são os relatórios e publicações oficiais do acidente, em especial o relatório oficial de investigação emitido pela BP - *British Petroleum*, a qual era legalmente a operadora dos contratos de concessão do bloco 252 e tinha como parceiros Anadarko Petroleum and MOEX Offshore (BP, 2010).

Como o relatório da BP também aplica em sua análise e apontamentos o modelo epidemiológico de análise de acidentes (REASON, 1990) e modelos de árvore de falhas, utilizou-se como premissa para esta pesquisa a possibilidade de identificar resultados distintos ou complementares na análise do acidente, mesmo utilizando as informações já coletadas e organizadas no relatório oficial da BP, uma vez que utilizou-se uma abordagem diferenciada para análise. A Figura 7 apresenta o digrama publicado pela BP contendo as causas do acidente da Deepwater Horizon no poço Macondo do ponto de vista do modelo epidemiológico de análise de acidentes.

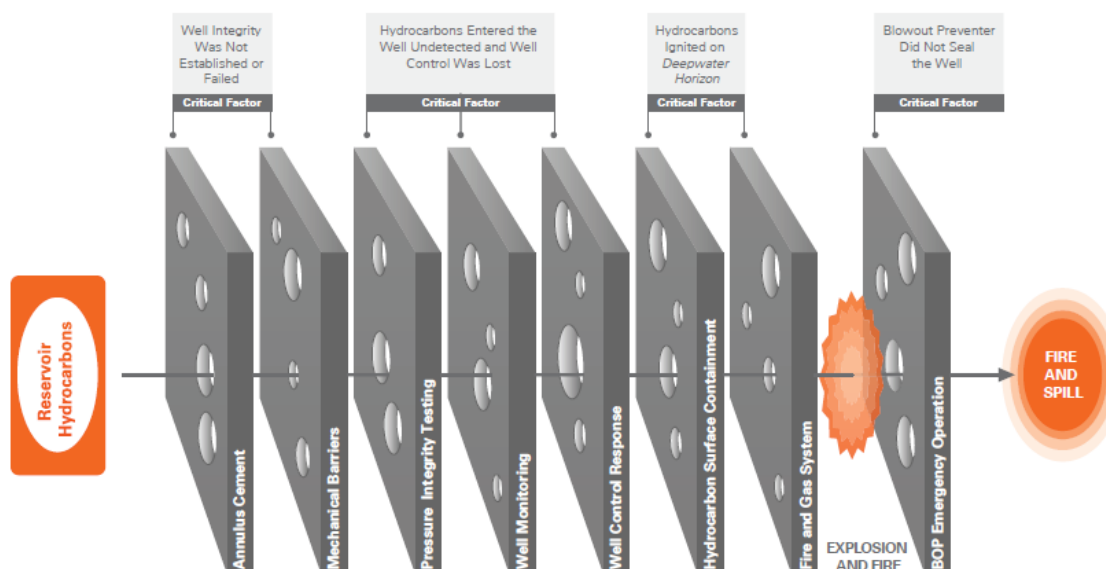


Figura 7 - Visão Epidemiológica do Deepwater Horizon Blowout (BP, 2010)

De acordo com a Figura 7, pode-se observar a visão geral do acidente apresentada pelo relatório oficial. A forma de análise de acidentes baseada no modelo epidemiológico influencia a forma como os engenheiros e equipes de segurança atuam para evitar acidentes, pois uma vez que os acidentes ocorrem de forma sequencial e as barreiras atuam como forma de evitá-los, os esforços concentram-se em eliminar a fragilidade das barreiras ou introduzir barreiras adicionais para que o evento indesejado não ocorra.

Desta forma, entende-se que aumentando a confiabilidade dos componentes humanos ou tecnológicos seria evitado o evento indesejado, entretanto a confiabilidade dos componentes não representa necessariamente a ausência de acidentes, pois é possível que acidentes ocorram mesmo que nenhum componente específico tenha deixado de realizar as funções para as quais foi projetado, mas levem ao evento indesejado quando as variabilidades se combinam no pior caso.

### 4.3 Software utilizado

Para o desenvolvimento das modelagens realizadas neste estudo, foi utilizado o software FRAM model Visualizer durante a elaboração dos modelos e gráficos em conformidade com a metodologia FRAM. No caso do processo de elaboração de

modelos utilizando a metodologia STAMP, não foi requerido nenhum software específico. Como o objetivo dos métodos é uma análise qualitativa e não quantitativa, os softwares fornecem um meio para organização de dados e representação gráfica, não sendo imperativos os recursos de simulação.

## 5 Deepwater Horizon Blowout

Em 20 de abril de 2010 a plataforma semissubmersível Deepwater Horizon, de propriedade da empresa Transocean e arrendada pela empresa British Petroleum perdeu o controle do poço que estava sendo construído no Canion do Mississipi, Macondo, bloco 252, no golfo do México. A perda de controle de poço, também conhecida como *blowout*, levou á explosão e incêndio, na qual 11 trabalhadores que estavam na plataforma perderam suas vidas, 17 ficaram feridos e o vazamento de petróleo provocado pelo acidente durou 87 dias (BP, 2010).

O acidente da deepwater permitiu o vazamento de aproximadamente 680000 toneladas de petróleo no mar e gerou para a BP um prejuízo imediato de aproximadamente 14 bilhões de dólares para contenção e limpeza (ECKLE; BURGHER; MICHAUX, 2012b). Possivelmente este seja o maior acidente ambiental da história do petróleo, todavia as consequências econômicas e ambientais são incalculáveis.

Quando a plataforma perdeu o controle de poço e explodiu, a tripulação se preparava para realizar os procedimentos de abandono temporário do poço. Estes procedimentos geralmente ocorrem para que a plataforma que foi utilizada nas atividades de exploração possa “abandonar” temporariamente o poço para conduzir perfurações em outros locais e seja possível posteriormente retornar e utilizar o poço para produção de óleo e gás utilizando uma plataforma de custo menor (NAE, 2011a).

O poço macondo começou a ser perfurado pela plataforma Marianas, a qual começou os trabalhos em outubro de 2009. Todavia devido aos impactos causados pelo furacão Ida, a plataforma Marianas precisou ser removida para reparos após 34 dias de trabalhos. A plataforma Deepwater Horizon chegou então ao poço em 31 de janeiro e recomeçou os trabalhos em 6 de fevereiro para substituir a plataforma Marianas (BP, 2010). Em 20 de abril de 2010 os trabalhos de perfuração do poço Macondo estavam 6 semanas atrasados e custando 58 milhões de dólares além do

planejado inicialmente, sendo que o planejamento inicial era 51 dias de trabalho ao custo de 96,2 milhões de dólares (GRAHAM et al., 2011).

A Plataforma Deepwater Horizon era propriedade da empresa Transocean e estava arrendada pela BP para perfuração do poço Macondo. A maior parte dos tripulantes era da Transocean, sendo aproximadamente 80 de um total de 126. Todavia, a atividade de exploração offshore requer serviços bastante especializados e por este motivo, além das equipes da Transocean e da BP, também trabalharam na plataforma alguns fornecedores de serviços específicos, como os bombeadores de fluido da empresa Sperry Sun, engenheiros de fluido da empresa M-I SWACO, técnicos da Oceaneering responsáveis pelos veículos remotamente operados (ROV), especialistas em cimentação da Halliburton e, especialistas da Schlumberger contratados para verificar a qualidade da cimentação do poço (BOEM, 2011). Com esta equipe formada por diversas empresas, com diferentes culturas, diversas especialidades, e as incertezas da exploração offshore, torna-se evidente que a capacidade de comunicação, controle e coordenação se tornam fundamentais para o sucesso das atividades.

A equipe da Deepwater Horizon realizava as atividades de abandono temporário no momento em que o controle do poço foi perdido. Após a finalização das etapas de perfuração, a equipe da BP havia acabado de cimentar o último de tubo de revestimento no poço. Como a atividade de cimentação de um poço de petróleo requer cuidados muito específicos, havia sido formulada uma pasta de cimento com bolhas de nitrogênio especificamente projetada para o poço Macondo, considerando entre outros aspectos a pressão que a coluna da pasta de cimento exerceria sobre a formação.

Para alcançar uma cimentação adequada, são utilizados dispositivos centralizadores para conseguir um posicionamento mais acertado do tubo de revestimento no poço, evitando assim que o cimento se desloque preferencialmente quando bombeado para preencher o espaço anular do poço e crie áreas mais frágeis na cimentação. O cimento é então bombeado pelo sistema de circulação de fluido de perfuração, tomando alguns cuidados como a colocação de plugs e fluidos

espaçadores para evitar que o cimento seja contaminado pelo fluido de perfuração. No caso da Deepwater Horizon, o projeto da cimentação, incluindo o número de centralizadores e a pasta de cimento foram desenvolvidos pela empresa Halliburton (BOEM, 2011).

Após a realização da cimentação, o poço passou por testes de avaliação da integridade, os quais foram avaliados pela tripulação como satisfatórios. Todavia, quando foram iniciadas as atividades preparatórias para o abandono temporário do poço houve um descontrole de poço seguido de explosão e incêndio da plataforma. As atividades de abandono contemplam a retirada de parte do fluido de perfuração de dentro do poço, o qual é substituído pela água do mar, menos densa, reduzindo assim, a pressão hidrostática do fluido no poço. Durante as atividades de preparação para abandono temporário do poço, houve uma invasão de hidrocarbonetos e gás. Conforme o gás sobe para a superfície, a pressão sobre ele diminui e ele expande rapidamente gerando um grande volume que empurrou o fluido de perfuração para fora do poço.

Na tentativa de conter o fluxo de gás, a equipe da plataforma desviou o fluido de perfuração misturado com o gás para o separador de gás e fluido, todavia o volume era muito grande e gerou uma grande nuvem de gás que invadiu a plataforma. Ao alcançar um ponto de ignição, a nuvem de gás gerou uma explosão que rompeu os cabos elétricos e hidráulicos que acionavam a válvula de segurança que permitiria o fechamento do poço, chamada BOP. A tripulação tentou então acionar o BOP sem sucesso e deram sequência aos procedimentos de evacuação de emergência. O incêndio tomou conta da plataforma e dois dias depois ela afundou, deixando um enorme vazamento de petróleo e gás no fundo do mar, o qual necessitou de 87 dias para ser controlado.

De acordo com (BP, 2010) a investigação do acidente encontrou as seguintes causas para o acidente, usando os métodos lineares de árvore de falhas:

1. O cimento do espaço anular do poço não isolou os hidrocarbonetos;

2. As barreiras do “shoe track” (barreira de cimento do fundo do poço) não isolaram os hidrocarbonetos;
3. O teste de pressão negativa foi aceito apesar de integridade do poço não ter sido estabelecida;
4. O fluxo de hidrocarbonetos não foi reconhecido até que estivessem no “riser” (tubo condutor que liga o poço à plataforma);
5. As ações de resposta e controle de poço não funcionaram;
6. O desvio para o separador de gás e lama resultou na libertação de gás para a plataforma;
7. O sistema de incêndio e gás não impediu a ignição;
8. O modo de emergência do BOP não selou o poço.

## **5.2 Análise de Segurança utilizando STAMP**

A análise de acidentes utilizando STAMP/CAST, parte do princípio de que a resiliência do processo está na capacidade do mesmo em manter o controle sobre determinada propriedade do sistema. Neste sentido, avaliou-se no STAMP/CAST a estrutura de controle e como estes controles reforçam ou enfraquecem a capacidade do sistema manter suas propriedades (LEVESON, 2004).

A análise retrospectiva do acidente baseada no modelo STAMP segue os passos apresentados na figura 8. Neste contexto, é possível que os passos a seguir possam ser desenvolvidos de forma modular e o analista do acidente altere eventualmente a sequência de algumas das atividades do modelo.



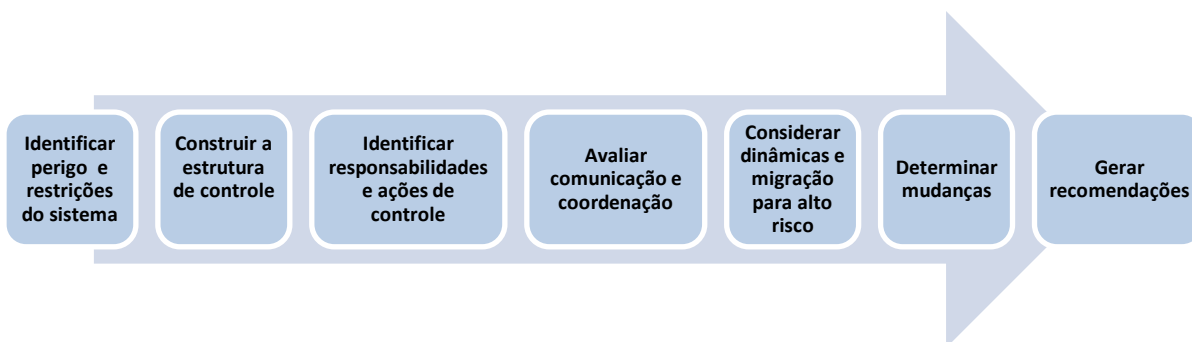


Figura 8 - Modelo STAMP / CAST

### 5.2.1 Identificar o perigo e as restrições de segurança do sistema violadas

No caso da Deepwater Horizon, trata-se de um poço de exploração, o qual foi perfurado, revestido com os tubos até a zona produtora e cimentado para evitar desmonoramentos e que os hidrocarbonetos adentrem ao poço. Neste tipo de atividade, o objetivo é perfurar o poço e alcançar a zona alvo onde está a reserva de petróleo e/ou gás, todavia este objetivo não pode ser alcançado de qualquer forma, uma vez que há perigos envolvidos nesta atividade e que podem comprometer o alcance dos objetivos, bem como podem causar prejuízos ambientais e para a saúde dos trabalhadores.

Estas condições nas quais o objetivo pode ser alcançado, chamou-se aqui de restrições, conforme proposto pelo método CAST. Verificou-se aqui as restrições relacionadas à segurança, todavia se estivesse sendo avaliado um processo produtivo com outros objetivos, estas restrições poderiam estar relacionadas a questões de qualidade, requisitos legais ou outras, ou seja, são as condições que não podem ser violadas para que o objetivo seja adequadamente alcançado.

No caso da Deepwater Horizon, o perigo é: fluxo descontrolado de hidrocarbonetos, gás ou água da formação para o poço que está sendo perfurado. Outros perigos poderiam ser adicionados aqui, todavia para manter o foco nos aspectos mais relevantes e severos da investigação do acidente será priorizado o evento *Blowout* (perda de controle de poço).

Uma vez identificado o perigo, são identificadas as restrições, ou seja, as leis de controle estabelecidas para reforçar o sistema e que não devem ser violadas de forma a evitar a exposição ao perigo identificado. Para este caso, foram identificadas as seguintes restrições que foram violadas:

1. Os hidrocarbonetos não devem invadir o poço durante a exploração.
2. Medidas de contenção devem ser capazes de reestabelecer o controle do poço, caso uma invasão de hidrocarbonetos ocorra.
3. O BOP deve ser capaz de selar o poço em situações de emergência no caso de pressões anormais.

Definidas as restrições acima, toda a estrutura de controle deve funcionar de forma a reforçar as restrições e evitar a exposição ao perigo. Para melhor organizar as informações, elaborou-se a Tabela 3, pois o próximo passo da investigação de acidentes utilizando CAST é exatamente a reconstrução da estrutura de controle que foi projetada para assegurar estas restrições. A elaboração da estrutura de controle utilizou como base os relatórios oficiais publicados.

*Tabela 3 - Perigo e restrições de segurança*

<b>Perigo</b>	<b>Restrição de Segurança</b>	<b>Restrição de Segurança Violada</b>
Invasão não intencional de hidrocarbonetos, gás e água para o poço	A pressão ou isolamento do poço deve assegurar a manutenção dos hidrocarbonetos fora do poço durante a fase de exploração	Invasão de hidrocarbonetos no poço
	Medidas de contenção devem ser capazes de reestabelecer o controle do poço, caso uma invasão de hidrocarbonetos ocorra.	O controle do poço foi perdido
	O BOP deve ser capaz de selar o poço em situações de emergência no caso de	BOP não foi capaz de selar o poço após desconexão de emergência (AMF) e

	pressões anormais.	intervenção dos ROVs
--	--------------------	----------------------

### 5.2.2 Documentar a estrutura de Controle

Este passo consiste em desenhar a estrutura de controle da forma como ela foi projetada para reforçar as restrições e conseqüentemente evitar a exposição ao perigo. Como o objetivo do STAMP/CAST não é identificar em detalhes o que aconteceu e sim por que aconteceu, o objetivo desta análise é entender a estrutura de controle de forma abrangente para posteriormente identificar porque ela não foi capaz de garantir que as restrições fossem reforçadas.

A diferença desta forma de análise neste ponto é que não se consideram os processos estáticos, pois o entendimento é que a variabilidade pode e deve existir, todavia as ações de controle devem impor restrições às atividades para evitar que as variabilidades levem a uma exposição ao perigo. Desta forma, todos os níveis da estrutura de controle reforçarão as restrições para assegurar que elas não sejam violadas. Caso o cenário mude ou ocorram variações em quaisquer níveis, o modelo de processo e a estrutura de retroalimentação devem garantir que as ações de controle também possam mudar, conforme algoritmo de controle e modelo de processo, e sejam proporcionais as mudanças necessárias para assegurar que as restrições não sejam violadas.

De acordo com a análise dos relatórios oficiais, a estrutura da Deepwater Horizon para exploração do poço Macondo funcionava conforme a Figura 9.

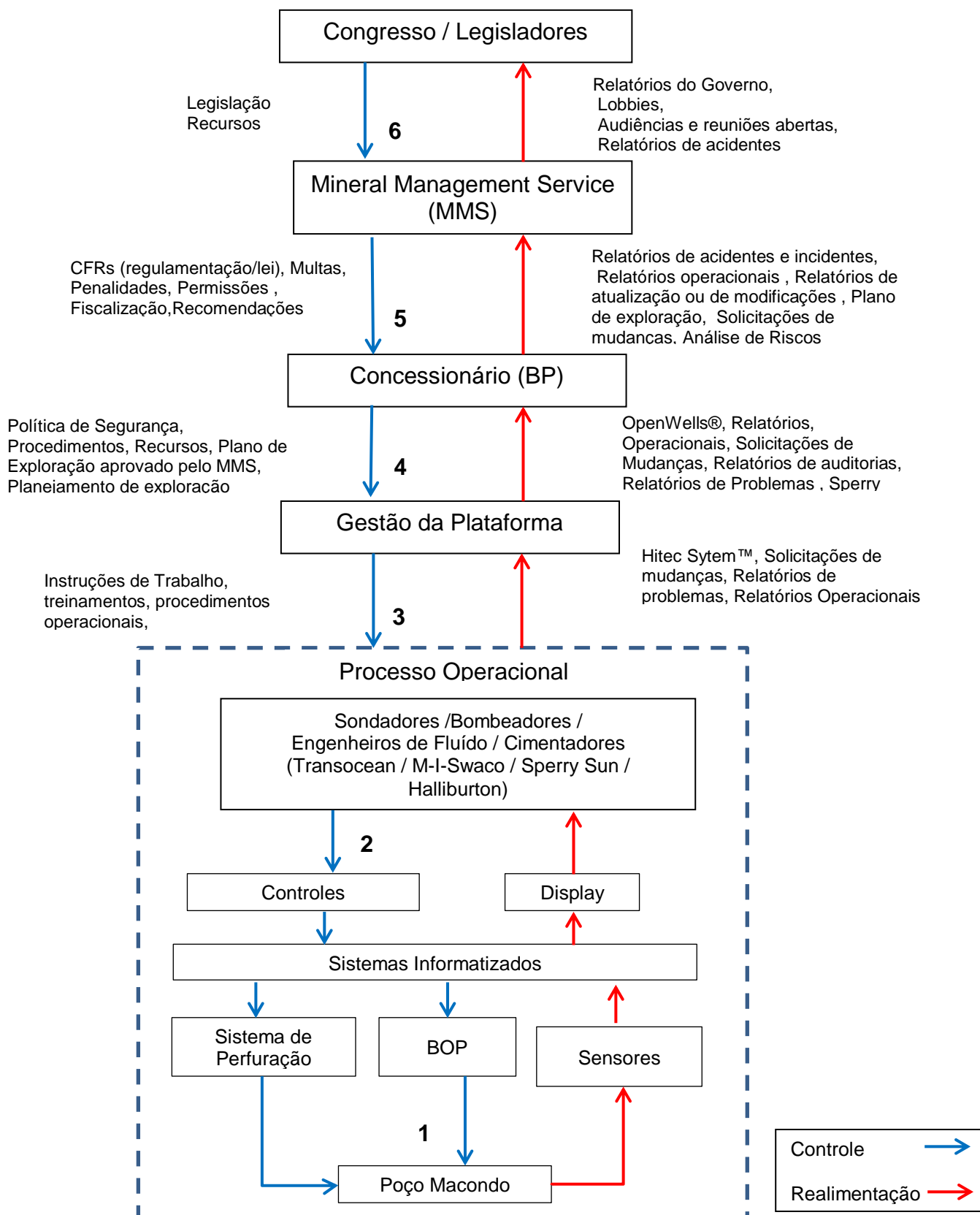


Figura 9 -Estrutura de Controle da Deepwater Horizon para o poço Macondo

### 5.2.3 Determinar os eventos imediatos que levaram à perda

A etapa de modelagem e definição da estrutura de segurança no momento em que ocorreu o Blowout poderia ser elaborada junto com a fase de identificação dos eventos imediatos que levaram a perda, todavia de acordo com o modelo CAST, esta é uma opção do modelador que conduz a análise. Neste estudo, elaborou-se primeiramente o modelo para evitar que os eventos diretos que levaram à perda exercessem alguma influência para a elaboração do modelo, ou seja, modelou-se sem enfatizar os eventos diretos para analisar imparcialmente após o modelo pronto.

Os eventos diretos que levaram ao Blowout em ordem cronológica estão apresentados na Tabela 4 (BP, 2010).

*Tabela 4 - Sequência Cronológica do acidente (BP, 2010)*

<b>Sequência</b>	<b>Quando</b>	<b>Evento</b>	<b>Fonte</b>
1	31/01/2010	Plataforma Deepwater Horizon chega ao poço Macondo para substituir a plataforma Marianas	Open Wells®
2	06/02/2010	Reinício dos trabalhos de perfuração pela Deepwater Horizon	Open Wells®
3	9/04/2010	Perfurada a profundidade de 18600 pés. Dados sobre a reserva coletados. Reserva possui hidrocarbonetos a uma pressão de 11850 psi	Open Wells®
4	14/04/2010	Halliburton modela a isolação do poço no Software OptiCem™ utilizando um revestimento Long String. O projeto inicial previa o revestimento Liner.	Halliburton production Casing Report
5	15/04/2010	OptiCem™ é atualizado com as informações do poço Macondo e recomenda 21 centralizadores	E-mails BP
6	15/04/2010	O fornecedor Weatherford havia disponibilizado 6 centralizadores do tipo Sub. Para atender a recomendação de 21 centralizadores do OptiCem™ foram solicitados mais 15 centralizadores via aérea	E-mails BP
7	16/04/2010	Os 15 centralizadores recebidos eram de tipo diferente dos 6 já fornecidos. Por receio de que os centralizadores diferentes comprometessem a integridade do poço, BP decidiu não os utilizar.	E-mails BP
8	18/04/2010	Testes parciais da fórmula de cimentação em laboratório foram realizados internamente na Halliburton.	E-mails Halliburton/ SperrySun Loggin System

		Nova modelagem do OptiCem™ da Halliburton e recomendações de cimentação foram fornecidos para BP. (Não há evidências de que os testes de laboratório da pasta de cimento tenham sido fornecidos para a BP)	
9	19/04/2010	Etapa de revestimento: Nove tentativas de estabelecer a circulação do poço, sendo possível somente em 3142 PSI.	Open Wells®/ SperrySun Loggin System
9	19/04/2010	Pressão de circulação de 340 psi é inferior ao previsto na modelagem de 570 psi.	Open Wells/
10	20/04/2010	Cimentação realizada através do bombeamento da pasta de cimento no poço. Necessária uma pressão superior ao planejado para fazer circular a cimentação	Open Wells®/ SperrySun Loggin System
11	20/04/2010	Realização de testes de pressão, sendo os resultados interpretados como positivos. Tudo de perfuração retirado do poço.	Open Wells®/ SperrySun Loggin System / Entrevistas
12	20/04/2010	Testes de avaliação da cimentação foram dispensados pela equipe (CBL- <i>Cement Blond Log</i> )	Entrevistas (BP)
13	20/04/2010	Teste bem sucedido de pressão positiva	SperrySun Loggin System /Entrevistas
14	20/04/2010	Iniciados testes de pressão positiva e pressão negativa para iniciar procedimentos de abandono	SperrySun Loggin System /Entrevistas
15	20/04/2010	Teste de pressão positivo bem sucedido	SperrySun Loggin System /Entrevistas
16	20/04/2010 12:00h	Tubo de perfuração é introduzido novamente no poço e fluido de perfuração é substituído por água do mar (menos densa) para realização do teste de pressão negativa	M/V Damon Bankston log / Entrevistas
17	20/04/2010 16:54h	Válvula "anular preventer" do BOP é fechada para o teste de pressão negativa	SperrySun Loggin System/ Entrevistas
18	20/04/2010 16:59h	Teste indica divergência de pressão entre tubo de perfuração e linha "kill line" do BOP (As pressões deveriam ser iguais (DNV, 2011) )	SperrySun Loggin System
19	20/04/2010 16:59h	Pressão no tubo de perfuração subiu de 273 para 1250 psi em 6 minutos	SperrySun Loggin System
20	20/04/2010 18:35	Equipe discute resultados anormais dos testes de pressão negativa	SperrySun Loggin System / Entrevistas
21	20/04/2010 19:55	Mudança de turno e novo teste é realizado. Os testes são considerados satisfatórios.	Open Wells®/ Entrevistas
22	20/04/2010 20:00	Iniciados trabalhos para abandono do poço	Open Wells®
23	20/04/2010 20:52 (aproximadamente)	O poço ficou desbalanceado	Olga® Model
24	20/04/2010 21:08	Fluxo de retorno de fluido de perfuração aumentou	Open Wells® Calculos

25	20/04/2010 21:14	Pressão no tubo de perfuração aumentou com as bombas desligadas. Sistema de monitoramento de fluido de perfuração foi desviado.	Open Wells® Olga® Model Entrevistas
26	20/04/2010 21:14 (aproximadamente)	Hidrocarbonetos invadiram o poço	Olga® Model
27	20/04/2010 21:40 a 21:48	O fluido de perfuração é empurrado pelo poço e invade a plataforma. Fluido é desviado para o separador Gás e Lama / “anular preventer” do BOP é acionado / O gás rapidamente dispersa sobre a plataforma e alarmes de gás disparam / Alimentação de energia da plataforma é perdida/ Ocorrem 2 explosões seguidas	Open Wells® Entrevistas
28	20/04/2010 21:57	Sistema de desconexão da plataforma que ativa o BOP para selar o poço e desconectar a plataforma é acionado e luzes se acendem no painel para confirmar ativação (Não ocorreu a selagem do poço pelo BOP )	Entrevistas (BP)
29	22:00 a 23:22	115 pessoas são resgatadas, 17 feridas e 11 ficam desaparecidas	Comando unificado
30	22/04/2010	A Deepwater Horizon afunda	Comando unificado
31	22/04/2010	Após várias tentativas de fechar o BOP utilizando ROVs, todas fracassam	IMT reports

Os eventos diretos que levaram ao Blowout são apresentados em sequência como uma cadeia de eventos e não são suficientes para entender por que o acidente ocorreu na visão do STAMP/CAST, todavia os eventos básicos relacionados aos processos físicos envolvidos devem ser compreendidos. Os relatórios de acidentes mostram-se fontes bastante detalhadas para a compreensão dos acidentes no nível físico, ou seja, no nível mais baixo da estrutura de controle.

#### 5.2.4 Responsabilidade e Ações de Controle dos Componentes

Uma vez compreendidos os eventos diretos que levaram à perda, conforme item 5.2.2 e identificada a estrutura de controle, conforme item 5.2.1, de acordo com a forma que ela foi projetada para funcionar, avaliou-se em cada nível se os componentes preencheram suas responsabilidades ou forneceram ações de controle inadequadas. Como a estrutura de controle é formada por enlaces e as referências são circulares, foram avaliados cada enlace de controle e retroalimentação, buscando identificar as responsabilidades de segurança, as ações

de controle inadequadas, as falhas no processo ou modelo mental e o contexto no qual as ações foram tomadas. Para auxiliar nesta análise, utilizou-se a Tabela 2 com as possibilidades de ações de controle inadequadas que levariam a acidentes segundo o método STAMP.

Observa-se aqui que o objetivo da análise, quando se mencionam falhas, não está nos componentes e sim na estrutura de controle que permitiu o evento indesejado, não ocorrendo a procura por um componente para ser apontado como culpado específico. Em cada etapa da análise da estrutura de controle, são verificadas as ações de controle que estão sobre a área de influência do componente analisado.

*Tabela 5 - Responsabilidades e ações de Controle: Enlace 1*

Enlace	Componente	Responsabilidade de Segurança	Ação de Controle Inadequada	Contexto em que as ações foram tomadas	Falha no processo ou modelo mental
1	<b>Blowout Preventure (BOP)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Selar o poço quando acionado em caso de pressões anormais;</li> <li>- Fornecer um meio para adicionar fluido ao poço;</li> <li>- Permitir o acesso ao poço para introdução de equipamentos de perfuração e monitoramento;</li> <li>- Selar automaticamente o poço quando houver desconexão da Plataforma (dispositivo de homem morto)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não foi capaz de selar o poço após acionamento de emergência AMF (Automatic Mode function).</li> <li>-Envio de retroalimentação incorreta quanto ao funcionamento</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não testado para as condições aplicáveis a Deepwater horizon.</li> </ul>

**Enlace 1:** A análise do enlace 1 apresentado na Tabela 5 é parte do processo operacional, todavia como o BOP é compreendido como a última linha de defesa para a indústria de exploração de Petróleo e recebe destaque nos relatórios de acidentes, avaliou-se a estrutura de controle e retroalimentação do BOP isoladamente no enlace 1. Verificou-se a falha no nível mais básico da estrutura de controle analisada, ou seja, com menor complexidade. Neste nível observa-se que o BOP não foi capaz de selar o poço quando acionado através do sistema de emergência AMF (Automatic Mode Function). Quando o BOP perdeu a comunicação



com a plataforma, ocorreu o acionamento de emergência “*deadman system*” ou acionamento de homem morto, o qual deveria selar o poço, mas as lâminas projetadas para cortar o tubo de perfuração e selar o poço, não conseguiram realizar esta atividade para qual o BOP foi projetado (DNV, 2011).

Algumas possíveis condições para que o BOP não tenha cumprido sua função e reforçado a restrição de segurança é a possível baixa carga de bateria e defeito em uma válvula solenóide apontada na análise realizada no equipamento após o acidente pela empresa Det Norske Veritas (DNV, 2011). Para assegurar o funcionamento do BOP e garantir que ele esteja em condições de funcionamento, incluindo baterias e componentes, os controles de segurança dos níveis hierárquicos superiores devem reforçar as restrições dos níveis inferiores independentemente de quais sejam as falhas nos níveis inferiores.

Nota-se aqui que falhas de componentes também estão inclusas na análise de acidentes utilizando CAST, todavia de forma indireta através da análise da estrutura de controle. Aqui não foram enfatizados os aspectos construtivos específicos de manutenção do equipamento, todavia compreende-se que restrições relacionadas a garantias de que o equipamento permaneça operacional são necessárias e retroalimentações da efetividade das restrições aplicadas para garantir a operacionalidade do equipamento são tão importantes quanto.

A investigação de acidentes utilizando STAMP/CAST direcionaria seus esforços aqui na avaliação dos procedimentos, testes, auditorias e especificações relacionadas ao BOP, todavia como não é possível extrair estas informações de forma adequada dos relatórios, a identificação de componentes não originais na manutenção da solenoide apontada pelo relatório da DNV (DNV, 2011) já aponta para uma necessidade de revisão da sistemática de manutenção e o não funcionamento do BOP já demonstra a necessidade de revisão dos procedimentos de testes definidos pelo MMS.

De acordo com BP (2010) a tripulação não conseguiu identificar no painel, durante o *Blowout*, que o BOP havia sido acionado pelo sistema automático de

emergência, o qual é acionado automaticamente quando o BOP perde conexão com a plataforma e tentaram ativar o sistema de desconexão de emergência manualmente, o EDS – Emergency Disconnection System, todavia após acionar o sistema EDS, receberam a retroalimentação no painel que o sistema EDS havia sido acionado.

Observando a estrutura de controle e retroalimentação é possível notar que não há sinal de retroalimentação relativo ao funcionamento do BOP, pois a indicação no painel de controle da tripulação mostra somente que o BOP foi acionado através do sistema de emergência (GRAHAM et al., 2011) e isso não significa que ele cumpriu sua função de selar o poço. A retroalimentação do acionamento do BOP poderia gerar uma interpretação incorreta de que ele selou o poço, pois não há retroalimentação para indicar aqui que o BOP funcionou conforme planejado, pois a retroalimentação informa somente que ele foi acionado.

Outro ponto importante é que a retroalimentação não estaria correta, uma vez que o sistema de desconexão de emergência que acionou o BOP foi o sistema de “homem morto”, o qual é acionado automaticamente quando a plataforma perde conexão com o poço, entretanto o painel da plataforma indicava que o botão de desconexão de emergência EDS havia sido acionado (GRAHAM et al., 2011). Apesar da retroalimentação incorreta, a existência de uma desconexão de “homem morto” é positiva para aumentar a resiliência do sistema, uma vez que não há um desenvolvimento de projeto de sistema preocupado apenas em não falhar, mas em desenvolver um modo de falha segura caso o sistema não funcione.

Outro ponto da análise é que em uma estrutura de controle e retroalimentação, quanto mais distante se está do nível físico, maior também será o atraso do sinal de controle ou das realimentações, pois será necessário atravessar um maior número de níveis. Do ponto de vista prático, significa que se colocarmos controles prescritivos nos níveis mais altos para aplicar restrições aos níveis mais baixos, podem ocorrer variabilidades nos níveis mais baixos e os componentes dos níveis mais baixos evoluírem em seu algoritmo de controle e forma de funcionamento para manter o sistema funcionando, entretanto a retroalimentação

destas mudanças pode demorar em chegar aos níveis superiores para que o algoritmo de controle dos níveis superiores seja corrigido também, logo a ação de controle não surtirá o efeito esperado. Este tipo de falha é, na visão do CAST, uma evolução assíncrona da estrutura de controle.

No caso da Deepwater, estudos preliminares encomendados pelo MMS e conduzidos pela empresa West Engineering Service em 2002 e 2004 reconheciam a deficiência dos BOPs para as novas tecnologias e ambientes em que estavam sendo empregados (NAE, 2011a), todavia as tecnologias relacionadas aos processos migraram sem que as regulamentações, entre elas o Code Federal Regulation (CFR-30), que serviam como ação de controle e estavam relacionadas aos testes do BOP conseguissem ter seus algoritmos corrigidos de forma a evitar o *Blowout* em Macondo.

As retroalimentações das mudanças nos processos também devem chegar aos fabricantes e desenvolvedores, como a fabricante do BOP, o qual era fornecido pela empresa Cameron. Quando a informação de retroalimentação para as alterações de projeto e desenvolvimento precisa subir toda a estrutura de controle e chegar até o MMS para então realimentar o projeto e desenvolvimento dos fabricantes, podem ocorrer atrasos na realimentação e conseqüentemente ações de controle para reforçar as restrições no BOP podem demorar em chegar até a atividade de exploração, fazendo com que o controle possa ser perdido.

**Enlace 2:** A análise das responsabilidades e controles do enlace 2, apresentado na tabela 6, mostra que uma das ações de controle inadequado é a interpretação incorreta ou não interpretação das alterações de pressão e volume de fluído do poço informadas pelos sistemas de monitormaneto de poço SperrySun® e Hictec (BARTLIT; SANKAR; GRIMSLEY, 2011). Os registros apresentados pelos sistemas de monitoramento do poço apresentaram por diversas vezes alterações anormais de pressão, todavia esta retroalimentação não foi interpretada pelos Sondadores e equipe de fluído de perfuração.

Considerando a estrutura de controle, temos duas situações aqui, pois pode haver uma falha no algoritmo de controle no qual os operadores, mesmo recebendo a retroalimentação não foram capazes de interpretar as informações do sistema, e a outra possibilidade é a de que a retroalimentação não tenha sido recebida pelos sondadores e equipe de fluido de perfuração (engenheiros e bombeadores), haja vista que é necessário executar diversas outras atividades concomitantemente na plataforma.

Para a possibilidade de interpretação incorreta das informações dos sistemas de monitoramento de poço, as ações para reforçar as restrições de controle envolvem prioritariamente preparo, treinamento, instruções e procedimentos, sendo que algumas retroalimentações possíveis seriam a verificação da eficácia de treinamento, auditorias e revisões periódicas dos procedimentos e treinamentos para assegurar a atualização do algoritmo de controle.

No caso de os operadores não terem recebido a retroalimentação, é possível que os sistemas SperrySun® e Hitec não emitissem alertas de alterações anormais de pressão, ficando a cargo dos operadores monitorarem constantemente as telas e interpretar resultados, independentemente do volume de informações disponibilizadas, e compararem com seu modelo mental/algoritmo de controle. Neste caso, quando os operadores não estão observando as telas corretas, falta retroalimentação que pode levar o sistema ao descontrole.

*Tabela 6- Responsabilidades e ações de Controle: Enlace 2*

<b>Enlace</b>	<b>Componente</b>	<b>Responsabilidade de Segurança</b>	<b>Ação de Controle Inadequada</b>	<b>Contexto em que as ações foram tomadas</b>	<b>Falha no processo ou modelo mental</b>
2	<b>Sondador / Engenheiros de Fluido / Bombeadores</b>	-Assegurar a integridade do Poço, -Avaliar as informações de fluxo/pressão e operar em conformidade com os procedimentos, - Separar resíduos de perfuração do fluido para análise. -Avaliar volume e pressão do fluido para detecção de Kicks -Operar o poço em Conformidade com a agenda da gestão da	- Informações de aumento de pressão e volume dos sistemas SpeerySun® e Hitec interpretadas incorretamente ou não interpretadas. - Não identificadas realimentações	- Projeto estava há mais de 40 dias atrasado - Mudança de Turno - Projeto estava 58 milhões de dólares acima do planejado - Plataforma estava 7 anos sem acidentes ocupacionais com afastamento	- Crença de que fluidez do cimento durante o bombeamento garante bom isolamento - interpretação das leituras anormais do teste de pressão negativa

		plataforma, -Detectar e controlar Kicks durante a perfuração, - Testar o BOP - Identificar Kicks durante a perfuração e tomar medidas para controla-los	de mudanças de volume do fluido de perfuração. - Envio do fluido de perfuração para o separador gás/fluido durante o Kick. - Acionamento tardio do BOP durante o Kick. - Reutilização de fluido para contenção de perda de circulação como espaçador		como “efeito bexiga.” - Sistema de monitoramento de volume de fluido desligado
--	--	--	---	--	---

Após a avaliação do teste de pressão negativa, os sondadores e bombadores começaram a enviar a água e o fluido de perfuração para o mar. Para realização desta atividade, os operadores desviaram o fluido de perfuração e a água do mar para fora do sistema de monitoramento de volume do SperrySun® (BP, 2010), gerando a perda de retroalimentação do aumento do volume de fluido para a equipe da concessionária que trabalha fora da plataforma, conforme estrutura de controle.

A retroalimentação de monitoramento do volume pela concessionária permite perceber a invasão de gás ou outros fluidos para dentro do poço ou a perda de fluido devido a fraturas provocadas na formação. Estas informações permitem que ações de controle e decisões possam ser tomadas pela equipe de fora da plataforma, reforçando restrições que ajudam a manter o controle sobre o poço. O atraso na execução das atividades de exploração em mais de 40 dias, provavelmente influenciou a equipe a procurar ações para ganhar tempo.

É dito que há um *kick* quando ocorre uma invasão de fluidos para o interior do poço, sendo que quando não é possível controlar esta invasão através dos dispositivos disponíveis para atuar, ocorre um Blowout, o qual nada mais é do que um descontrole de poço. Desta forma, uma das principais funções da equipe de Sondadores, Bombadores e Engenheiros de fluido é a detecção de kicks através

da avaliação do volume de fluido de perfuração e dos parâmetros de monitoramento do poço. O aumento do volume de fluido pode indicar que o poço está sendo invadido por gás e na verdade o fluido pode ter se transformado em uma pasta misturada com gás. A diminuição do volume de fluido de perfuração dentro do poço pode indicar uma fratura na formação, pela qual está ocorrendo uma migração de fluido de circulação e o mesmo está sendo perdido. Obviamente que quando há uma perda de circulação, a coluna de fluido que faz pressão sobre os hidrocarbonetos pode diminuir e a circulação perder a capacidade de manter os hidrocarbonetos dentro do poço.

No caso do poço macondo, quando a equipe identificou o kick, a ação de controle para fechamento do BOP foi atrasada como consequência da não interpretação ou não recebimento da realimentação das pressões anormais e aumento no volume de fluido do poço, posteriormente também simulado pelo software OLGA® e uma equipe de especialistas que trabalhou na investigação do acidente (BP, 2010, p. 21). Durante o teste de pressão negativa, o poço apresentou pressões anormais em seus sistemas de realimentação Hitec® que eram utilizados para monitoramento, todavia as pressões anormais foram interpretadas pela equipe como “efeito bexiga”.

O modelo de processo dos sondadores foi realimentado por experiências passadas que permitiram a interpretação de que a pressão exercida pelo fluido no BOP poderia gerar as leituras discrepantes de pressão dentro do poço durante os testes de pressão negativa e a divergência na atualização incorreta do modelo de processo seria o “efeito bexiga”. O entendimento da tripulação é de que a pressão do fluido de perfuração sobre as válvulas de segurança durante a avaliação de pressão negativa poderia ser transmitida para dentro do poço, como o deslocamento de pressão quando uma bexiga é comprimida em qualquer das extremidades.

No contexto em que as decisões foram tomadas, os testes foram realizados durante uma mudança de turno e o projeto estava há mais de 40 dias atrasado e provavelmente o contexto pode ter influenciado as decisões. Adicionalmente, o fato de a plataforma Deepwater Horizon estar 7 anos sem acidentes com afastamento

(GRAHAM et al., 2011) reduz as realimentações que suportam as melhorias no sistema de segurança como um todo, o qual não está especificamente no modelo desenvolvido nesta pesquisa, mas pode ter sido afetado pelo sentimento de complacência com as questões de segurança, uma vez que se não há acidentes, não há realimentação, e não haveria com o que se preocupar.

Além dos pontos apresentados, a equipe de engenheiros e bombeadores trabalha na plataforma formulando fluidos de diversas densidades para manter a pressão hidrostática da coluna de perfuração, entretanto quando há uma fratura na formação e parte do fluido de perfuração é perdida, a equipe formula um fluido bastante denso e viscoso que serve para conter a perda de fluido para a formação. No caso do poço macondo, a equipe de perfuração reaproveitou este fluido formulado para contenção de perda de circulação e aplicou para separação entre o fluido de perfuração e a água do mar durante os testes de pressão negativa. Esta ação de controle não havia sido aplicada ou testada antes e não há como afirmar que é uma ação de controle inadequada, todavia esta adaptação é provavelmente uma resposta da equipe a necessidade de redução de custos, pois o projeto estava 58 milhões de Dólares acima do planejado.

Caso o fluido de contenção de perda de circulação não circulasse no poço, deveria ser destinado como resíduo perigoso gerando maiores custos de acordo com a lei ambiental americana (GRAHAM et al., 2011). As investigações sugerem que o fluido utilizado pode ter sido responsável pelo entupimento da linha do BOP utilizada nos testes de pressão negativa (BP, 2010).

*Tabela 7 - Responsabilidades e ações de Controle: Enlace 3*

<b>Enlace</b>	<b>Componente</b>	<b>Responsabilidade de Segurança</b>	<b>Ação de Controle Inadequada</b>	<b>Contexto em que as ações foram tomadas</b>	<b>Falha no processo ou modelo mental</b>
<b>3</b>	<b>Gestão da Plataforma</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estabelecer o programa e agenda de perfuração,</li> <li>- Estabelecer procedimentos e instruções de trabalho</li> <li>- Assegurar treinamento/qualificação das equipes</li> <li>- Monitorar atividades</li> <li>- Fornecer suporte técnico para os problemas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ação de controle inadequada com a aplicação de 6 centralizadores na cimentação, contrariando os 21 recomendados pela Halliburton.</li> <li>- Início da cimentação sem a retroalimentação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Projeto estava há mais de 40 dias atrasado</li> <li>- Mudança de Turno</li> <li>- Projeto estava 58 milhões de Dólares acima do planejado</li> <li>- Plataforma estava 7 anos</li> </ul>	

		identificados pelas equipes de perfuração	dos testes de laboratório da pasta de cimento desenvolvida pela halliburton. - Falta de padrões de trabalho para testes de pressão negativa do abandono temporário - Não realização da análise da cimentação (Shumberger) - Alterações nos procedimentos de cimentação	sem acidentes ocupacionais com afastamento	
--	--	---	---	--	--

**Enlace 3:** A gestão da plataforma, apresentada no enlace 3 e de forma complementar na Tabela 7 contempla as atividades do Gerente de perfuração, Supervisor de perfuração e do Gerente de Instalação Offshore. Seria possível ter optado por representar as atividades separadas e em uma hierarquia diferente, conforme o cargo de cada um na estrutura, todavia não haveria um grande ganho para o entendimento do Deepwater Horizon *Blowout* e as decisões tornam-se mais significantes se avaliadas no contexto agrupado da organização como um todo.

Como apresentado no enlace 2, a cultura de complacência por conta do fato de a plataforma estar há mais de 7 anos sem acidentes com afastamento também pode ter afetado as decisões no enlace 3, no qual trata-se da gestão da plataforma. Provavelmente esta cultura de complacência pode ter se agravado pelo fato do atraso no projeto e custos além do planejado.

No enlace 3, observa-se a utilização de apenas 6 centralizadores para assegurar o posicionamento do tubo final de revestimento, todavia se pensarmos de acordo com uma estrutura de controle do STAMP, o modelo de processo possuía um algoritmo de controle baseado no software Opticem™, o qual servia para modelagem da cimentação do poço e informava a quantidade necessária de centralizadores, apontando neste caso a necessidade de 21 centralizadores. Uma falha na retroalimentação dos tipos de centralizadores utilizados fez com que os modelos enviados para a plataforma fossem diferentes do modelo esperado pela equipe da plataforma.



No contexto de atraso de projeto e custo elevado, a equipe optou por alterar a ação de controle utilizando 6 centralizadores que estavam disponíveis no modelo desejado, todavia o processo que forneceria o algoritmo de controle não chegou a ser atualizado e não é possível confirmar qual modelo de processo foi utilizado para gerar esta ação de controle inadequada, uma vez que não há registro das avaliações realizadas pela equipe da plataforma para fornecer tal ação de controle.

Neste caso, a retroalimentação que forneceria informações sobre os resultados da cimentação com 6 centralizadores permitiria uma nova ação de controle de remediação da cimentação, pois em um sistema complexo dinâmico as realimentações influenciam as ações futuras e o processo permaneceria sob controle. Infelizmente, a retroalimentação não ocorreu, pois a equipe da empresa Shumberger que realizaria a atividade de avaliação da cimentação foi dispensada (BEA, 2011, p. 38), possivelmente para redução de custo e tempo no contexto do atraso na agenda e o custo elevado do projeto.

Com a possibilidade de fraturar a formação durante a cimentação devido a pressão da coluna de cimento, a empresa Halliburton elaborou uma pasta de cimento com bolhas de nitrogênio desenvolvida especificamente para este poço de petróleo. Para assegurar que a pasta de cimento seria estável e que as bolhas de nitrogênio não iriam se fundir em bolhas maiores permitindo criar áreas mais frágeis na cimentação, a estrutura de controle previa uma retroalimentação de testes de laboratório realizados pela própria Halliburton (GRAHAM et al., 2011). Os testes foram iniciados 24 horas antes da cimentação do poço Macondo e o período para realização dos testes é de 48 horas, fazendo com que não houvesse ação de controle, pois não houve retroalimentação até o início da cimentação do poço (BEA, 2011). Provavelmente a decisão de bombear a pasta de cimento antes da conclusão dos testes pela Hallinburton foi influenciada atraso do projeto.

Ainda no enlace 3, ações de controle inadequado foram fornecidas com alterações nos procedimentos de cimentação, incluindo a circulação de fluido, mudanças nos espacadores e pressão maior que o especificado para circular a

pasta de cimento (BP, 2010). Neste caso, a ausência de retroalimentação do resultado da cimentação com a falta de especificações para os testes de pressão negativa e a dispensa da equipe da Shumberger que realizaria testes para avaliar a cimentação, incluindo o *shoe track* impediu que novas ações de controle permitissem levar o processo novamente para o estado de controle.

**Enlace 4:** O enlace 4 é representado pela Tabela 8. Neste nível estão as atividades de controle e realimentação do concessionário, no caso o concessionário é a empresa British Petroleum – BP. As principais ações de controle inadequado estão relacionadas ao não atendimento as restrições impostas pelo MMS, em especial ao Plano de atendimento a emergências. No caso do plano de atendimento a emergências, o modelo de processo que deveria fornecer a ação de controle apresenta indícios de que foi inadequadamente projetado, pois foram encontradas referências de animais que não habitavam o local e informações copiadas na integra do site <http://www.noaa.gov/> (GRAHAM et al., 2011).

A ausência de ações de controle para assegurar a integridade do poço através da realização dos testes de pressão negativa também é um ponto considerável. No caso, padrões aceitáveis para os resultados dos testes de pressão negativa não foram fornecidos (BARTLIT; SANKAR; GRIMSLEY, 2011).

Tabela 8- Responsabilidades e ações de Controle: Enlace 4

Enlace	Componente	Responsabilidade de Segurança	Ação de Controle Inadequada	Contexto em que as ações foram tomadas	Falha no processo ou modelo mental
4	Concessionário (BP)	- Estabelecer o programa de perfuração, -Atender a legislação, -Encaminhar informações Operacionais ao MMS, - Estabelecer o plano de trabalho em conformidade com as condições de perfuração, - Avaliar	- Falha no atendimento a CFRs do MMS,  -Ausência de padrões para testes de de pressão negativa em abandono temporário.	- Atrasos nas atividades programadas para a plataforma,  - Pressão para redução de custos,	Cultura anti-regulatória

		fornecedores, - verificar cumprimento dos procedimentos, - Fornecer recursos, - Realizar treinamentos, - Monitorar as Atividades, - Estabelecer política de segurança.			
--	--	---	--	--	--

**Enlace 5:** O enlace 5 da estrutura de controle, complementado pela tabela 9 mostra o caso comentado anteriormente no enlace 1, o MMS possuía ações de controle prescritivas para o BOP, todavia uma evolução assíncrona fez com que os controles ficassem obsoletos. Além da evolução assíncrona, também não foram fornecidas ações de controle para reforçar a restrição de adequação dos planos de emergência, conforme apresentado no enlace 4.

Os planos de emergência possuíam divergência do local onde seria aplicado e possuíam indícios de terem sido copiados de outro projeto, pois continham a citação de animais que não habitavam a região, e não foi aplicada ação de controle para assegurar a adequação do plano. A falta de ação de controle ocorreu devido a equipes subdimensionadas e uma exigência de aprovação dos planos em 30 dias independentemente da complexidade (GRAHAM et al., 2011).

*Tabela 9- Responsabilidades e ações de Controle: Enlace 5*

5	Regulador (MMS)	Fiscalizar, fornecer autorizações para mudanças, fornecer regulamentação, Aprovar plano de exploração	- Ausência de Regulamentação com as especificidades de águas profundas, - Planos de emergência liberados com requisitos divergentes do local para onde seria aplicado	- Equipe subdimensionada, - Pressão por manter arrecadação - Prazo de 30 dias para aprovação do plano de exploração	
---	-----------------	---	--	---	--

**Enlace 6:** O enlace 6 é o mais alto nível da estrutura de controle e é representado pela Tabela 10. No caso do Congresso e legisladores, as restrições estão mais diretamente aplicadas ao MMS, o qual é controlado diretamente pelo

enlace 6. Uma das ações de controle inadequado aqui é a imposição de restrição de prazo de 30 dias para análise dos projetos pelo MMS, pois a análise deve depender da complexidade e uma imposição de 30 dias na verdade é uma ação de controle para resguardar a produtividade, uma vez que a demora na aprovação impactaria diretamente a aprovação e conseqüentemente no início das atividades de exploração. Como esta ação de controle inadequado provavelmente foi influenciada pela importância econômica e de arrecadação do petróleo, outra ação de controle inadequado neste enlace está em aplicar restrições conflitantes ao MMS, o qual foi designado para arrecadar e regular garantindo a segurança. Meta e restrição conflitantes são possíveis na estrutura de controle, pois a meta é onde se quer chegar e a restrição é como este resultado pode ser obtido, todavia esta configuração exige um algoritmo de controle robusto o suficiente para não gerar ações de controle conflitantes e pode diminuir a resiliência da estrutura de controle.

*Tabela 10 - Responsabilidades e ações de Controle: Enlace 6*

<b>Enlace</b>	<b>Componente</b>	<b>Responsabilidade de Segurança</b>	<b>Ação de Controle Inadequada</b>	<b>Contexto em que as ações foram tomadas</b>	<b>Falha no processo ou modelo mental</b>
6	Congresso / Legisladores	Legislar, Fornecer recursos	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Legislar metas conflitantes para o MMS (arrecadação e fiscalização)</li> <li>- Não assegurar recursos necessários</li> <li>-Restringir prazo para análise dos planos apresentados ao MMS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pressão popular por autosuficiência em Petróleo e consumo</li> <li>-Pressão das empresas devido a dependência econômica</li> <li>- Concessão é importante fonte de arrecadação</li> </ul>	

### **5.2.5 Avaliar comunicação e coordenação**

A análise até este ponto procurou avaliar a estrutura de controle e retroalimentação de cada componente dentro do seu enlace de controle. O próximo passo do método requer uma reavaliação da estrutura de controle do poço Macondo em busca de possíveis situações onde existem componentes com 2 ou mais

controles. A comunicação entre dois controles para o mesmo componente pode gerar um comportamento inseguro do sistema.

Da forma como foi desenhada a estrutura de controle é possível notar que não existem situações de 2 ou mais controles para o mesmo componente, todavia vale destacar aqui o componente MMS. No caso do MMS não existem dois controles, mas o departamento recebe duas ações de controles conflitantes, pois um dos papéis do MMS é aumentar a arrecadação pela expansão da venda de concessões e outro papel é assegurar a segurança das atividades do setor de Petróleo, mesmo que para isso seja necessário ser mais criterioso para concessões. Esta situação também poderia ser interpretada de outra forma, pois poderia ser projetada a venda de concessões como meta e a segurança da atividade de exploração e produção como restrição de segurança, ou seja, o meio no qual é aceitável que a meta seja alcançada.

#### **5.2.6 Consideração de dinâmica e migração para alto risco**

Esta etapa da avaliação utilizando STAMP/CAST requer uma avaliação da estrutura de controle para ponderar como o dinamismo dos relacionamentos pode ter levado a estrutura de controle para as margens de segurança. Neste caso, o rápido avanço tecnológico gera desconhecimento no processo e este desconhecimento pode levar a novos caminhos para perda. Em estruturas onde os componentes mudam constantemente, as ações de controle imediatas devem migrar para os níveis mais baixos, sempre que possível, para evitar o impacto dos atrasos no recebimento das retroalimentações e aplicação das ações de controle pelos níveis muito elevados da hierarquia.

Neste caso, as regras prescritivas do MMS podem ter se tornado obsoletas ao longo do tempo devido à evolução assíncrona, pois o relatório do (DNV, 2011) sugere que os equipamentos utilizados não eram capazes de operar neste novo cenário. Desta forma, caso a falha não acontecesse com o BOP, qualquer equipamento sujeito a esta rápida evolução tecnológica que estivesse subordinado as ações de controle de alto nível do MMS estão sujeitos a uma evolução assíncrona e o controle ser perdido.

Adicionalmente, o atraso no projeto do poço Macondo e o custo além do planejado podem ter permitido que os componentes recebam ações de controle adicionais para fortalecer as restrições de custo e prazo. Algumas decisões isoladas não forneceriam ações de controle capazes de levar ao Blowout, como o caso da cimentação com um número inferior de centralizadores, e alterações no procedimento de cimentação que poderia passar posteriormente por uma recimentação, todavia quando as ações para redução de custo e tempo se combinaram a consequência pode ter sido a migração da Deepwater Horizon para as margens da segurança. O exemplo do acidente Zeebrugge (RASMUSSEN, 1997) representa bem um caso parecido, no qual decisões aceitáveis isoladas levaram a uma catástrofe quando combinadas.

### **5.2.7 Gerar recomendações**

O objetivo de qualquer análise do acidente é fornecer subsídios para a melhoria contínua, evitando a recorrência de acidentes semelhantes no futuro. Para o caso do *Deepwater Horizon Blowout* a análise STAMP/CAST de cada componente mostra em detalhes quais foram as ações de controle inadequadas e o contexto em que elas foram tomadas, entretanto uma das principais considerações que deve ser feita neste caso é que as ações de controle aparentemente foram tomadas isoladamente sem o conhecimento pleno do impacto no todo.

Uma das principais recomendações seria que os planos de exploração aprovados pelo MMS tivessem como requisito a elaboração da estrutura de controle e retroalimentação pelo operador, incluindo as informações do fundo do poço até o MMS. Desta forma seria possível avaliar a ausência de retroalimentação, ausência de ação de controle, controles conflitantes, retroalimentações inadequadas ou com intervalos de retroalimentação muito grandes. Os perigos já são levantados nos planos de exploração atuais, desta forma seria necessário apenas complementar o levantamento das restrições que deveriam ser reforçadas para evitar os perigos e estabelecer a estrutura de controle. Estas são ações de baixo investimento, mas que

permitiriam que cada componente da estrutura de controle conseguisse avaliar o impacto das suas ações no sistema como um todo.

No nível físico, os BOPs deveriam ter retroalimentação do seu estado, informando se efetivamente conseguiram selar o poço. Entretanto, para que os equipamentos possam evoluir em conformidade com os novos requisitos das atividades de exploração é mais adequado que as ações de controle que sinalizem a necessidade de mudança dos componentes no nível físico venham de níveis mais próximos e não de níveis muito altos como o MMS, evitando assim a evolução assíncrona, como explicado anteriormente. Obviamente, que os demais recursos de monitoramento fornecem indiretamente retroalimentação do estado do BOP, todavia não informa diretamente o funcionamento de suas partes.

Para os níveis superiores de gestão da plataforma e do concessionário, os sistemas que fornecem retroalimentação do poço deveriam sinalizar as leituras anormais de pressão, agilizando assim a ação de controle. Além das leituras de pressões anormais, as restrições de integridade da cimentação deveriam ser reforçadas com a obrigatoriedade de avaliação das retroalimentações da avaliação da cimentação e planos de trabalho específicos para testes de pressão negativa em atividades de abandono temporário.

Nos níveis do MMS e Congresso, as recomendações são a alteração na estrutura de controle para evitar metas conflitantes, como arrecadação e segurança. Outro ponto proposto seria a flexibilidade na restrição de tempo para análise dos documentos de exploração, pois a análise depende da complexidade da exploração. Como a primeira recomendação de redesenhar a estrutura de controle para cada projeto trata diretamente de comunicação e controle, não anotamos recomendações adicionais de comunicação, mesmo considerando que seja um ponto importante para retroalimentações mais assertivas.

### **5.3 Análise de Segurança Utilizando FRAM**

A modelagem usando FRAM representa as funções com suas variabilidades normais e típicas do dia-a-dia. O método busca entender desta forma os ajustes e como eles afetam a variabilidade de outras funções e em alguns casos como que as funções podem ser ao mesmo tempo influenciadas umas pelas outras. Estas situações podem amplificar variabilidades levando a resultados desproporcionais (HOLLNAGEL; HOUNSGAARD; COLLIGAN, 2014). A Figura 10 apresenta os passos para execução da modelagem utilizando o método FRAM (HOLLNAGEL, 2012).

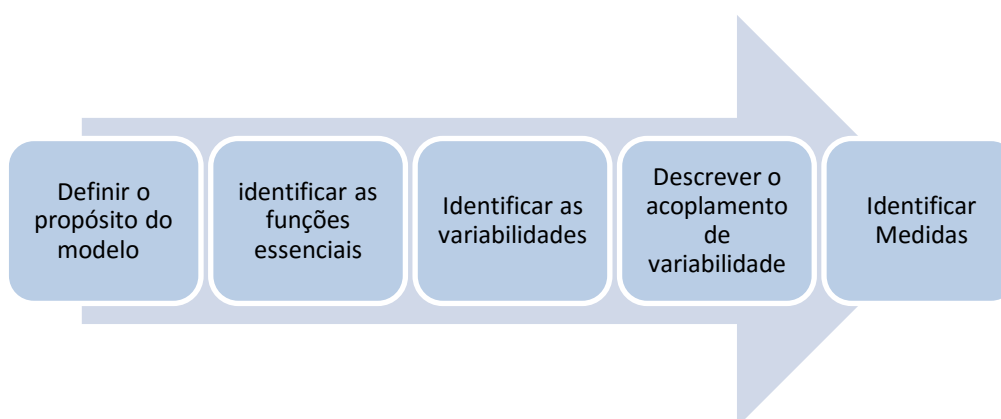


Figura 10 - Etapas do método FRAM

Uma vez definido que procurou-se entender os aspectos de resiliência do processo de exploração offshore para análise retrospectiva do Deepwater Horizon Blowout, o primeiro passo da análise é identificar as funções requeridas.

### 5.3.1 Identificar as funções requeridas

Com base nos relatórios de acidentes (BP, 2010) (NAE, 2011b), identificamos as funções de interesse para as etapas de exploração diretamente envolvidas no acidente (Figura 11). As funções são atividades necessárias para o processo e não estão direcionadas a especificidades que ocorreram naquele momento do acidente, mas são funções que nos permitem entender o dia-a-dia da atividade de exploração offshore na Deepwater Horizon. O objetivo de modelar desta forma é procurar identificar a variabilidade normal do processo, a qual quando combinada com outras



variabilidades normais das atividades poderia gerar resultados desproporcionais e tornar os processos menos resilientes.

Como, neste caso, o propósito da plataforma é perfurar até a zona alvo e deixar o poço em condições para que posteriormente possa ser colocado em produção, as funções da Figura 11 foram identificadas inicialmente como “funções de interesse” para as atividades de exploração da *Deepwater Horizon*. O poço de petróleo em exploração offshore é construído em etapas, sendo que as funções perfurar, revestir e cimentar se repetem algumas vezes até que ocorra a cimentação do último trecho do poço. Após a cimentação da última etapa, é realizada a função abandonar. No caso, este é um abandono temporário para que o poço possa ser posteriormente colocado em produção por outra plataforma.

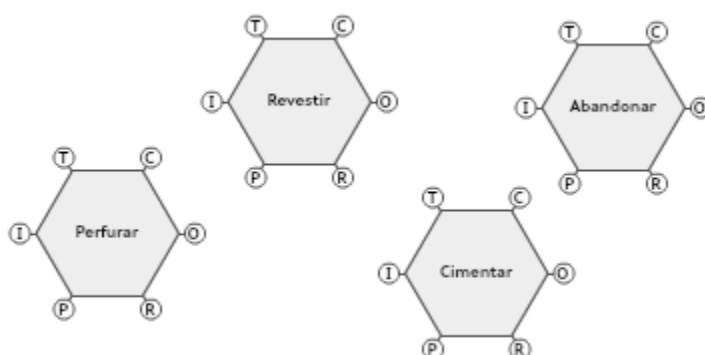


Figura 11 - Funções de interesse para o poço Macondo

Estas funções contemplam:

- **Perfurar** o poço através da utilização de sistemas de brocas, tubos e sistemas de circulação de fluidos de perfuração.
- **Revestir** o poço com um tubo especificamente projetado para este fim e posicioná-lo de forma adequada no poço.
- **Cimentar** o espaço entre a formação e o tubo de revestimento.
- **Abandonar** o poço após tamponar e avaliar a segurança para que posteriormente o mesmo possa ser utilizado para produção.

Uma vez definidas as funções essenciais, foram identificados os principais aspectos de entrada, saída, controle, monitoramento, tempo e pré-condição para

representação do sistema. Não há uma obrigatoriedade do método de definição de todos os aspectos para todas as funções, entretanto devem ser identificados os aspectos relevantes para a análise.

Como cada um dos aspectos identificados é saída de alguma função, novas funções foram incorporadas ao modelo de forma que nenhum aspecto identificado ficasse sem a representação da função que o gerou. Com as mudanças incorporadas, o modelo foi revisado e todos os acoplamentos foram identificados, conforme apresentado na figura 12. A figura 12 também está disponibilizada de forma ampliada para consulta no apêndice.

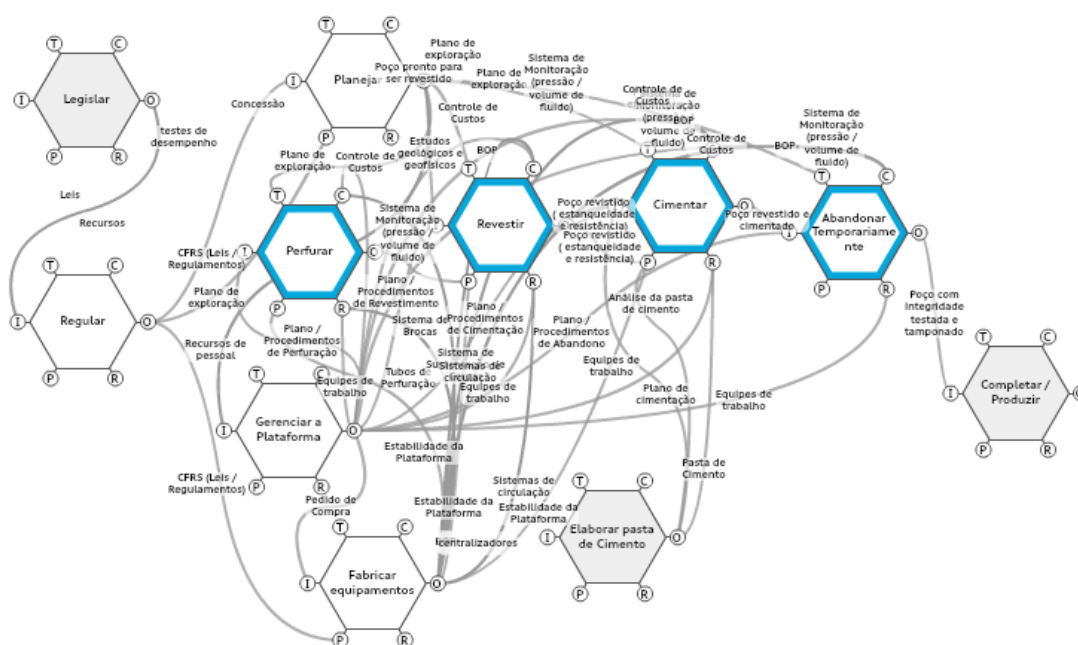


Figura 12 - Modelo FRAM para Deepwater Horizon

Devido ao volume de acoplamentos e para facilitar a leitura e compreensão, permitindo analisar adequadamente o modelo, as Tabelas de 11 a 21 apresentam os aspectos das funções essenciais, sendo que aspectos com nomes iguais em funções diferentes demonstram acoplamentos e possível combinação de variabilidades, nas quais as variabilidades podem ser amplificadas ou atenuadas pelas funções com as quais faz acoplamento.

A primeira função analisada foi a função perfurar. Na função “Perfurar” foram identificados novos acoplamentos a montante e inseridas as funções adicionais “Planejar”, “Gerenciar a plataforma” e “Fabricar equipamentos”. A função “Perfurar” também está acoplada a função “Revestir” a jusante, a qual já havia sido identificada anteriormente como uma das funções essenciais. Vale ressaltar que a função “fabricar equipamentos” foi incluída para representar a atividade realizada pelos diversos fabricantes de equipamentos, os quais exercem influência direta na segurança dos sistemas de exploração offshore, mas a atividade não foi representada individualmente por fabricante. A Tabela 11 apresenta os aspectos relacionados à função “perfurar”.

*Tabela 11 - Aspectos do modelo FRAM para a função Perfurar*

Nome da função	Perfurar
Descrição	Consiste em utilizar o sistema de brocas e fluídos de perfuração para realizar a perfuração do leito do mar conforme planejado no plano de exploração
Aspecto	Descrição do Aspecto
Entradas	Plano / Procedimentos de Perfuração
Saídas	Poço pronto para ser revestido
Pré-requisitos	Estabilidade da Plataforma
Recursos	Equipes de trabalho
	Sistemas de circulação
	Tubos de Perfuração
	Sistema de Sustentação de Cargas
	Sistema de Brocas
Controle	Sistema de Monitoração (pressão / volume de fluido)
	BOP
	Controle de Custos
Tempo	Plano de exploração

Como a função “perfurar” é baseada nas decisões humanas, o método de análise de ressonância funcional considera que esta é uma função com grande variabilidade em frequência e em amplitude. Para prosseguir na elaboração do modelo foram identificados os aspectos da função “Revestir”. A função “Revestir” tem sua saída acoplada a função “Cimentar” a jusante e também possui acoplamentos com as funções “Planejar”, “Gerenciar a plataforma” e “Fabricar

equipamentos” a montante. A Tabela 11 apresenta os aspectos da função revestir, a qual também foi classificada como predominantemente humana para análise da variabilidade proposta pelo método FRAM.

*Tabela 12 Aspectos do modelo FRAM para a função “Revestir”*

Nome da função	Revestir
Descrição	Posicionar o tubo de perfuração no interior do poço
Aspecto	Descrição do Aspecto
Entradas	Plano / Procedimentos de Revestimento
	Estudos geológicos e geofísicos
Saídas	Poço revestido (estanqueidade e resistência)
Pré-requisitos	Estabilidade da Plataforma
	Poço pronto para ser revestido
Recursos	Equipes de trabalho
	Sistemas de circulação
	Sistema de Sustentação de Cargas
	centralizadores
Controle	Sistema de Monitoração (pressão / volume de fluido)
	testes de desempenho
	BOP
	Controle de Custos
Tempo	Plano de exploração

A Tabela 13 apresenta os aspectos da função “cimentar”, a qual recebe os acoplamentos das funções “Planejar”, “Gerenciar a plataforma” e “Fabricar equipamentos” a jusante, mas também acoplando com a função “Abandonar” a montante. A função cimentar também foi classificada como predominantemente humana apesar do impacto tecnológico da atividade. Esta classificação nos permite avaliar posteriormente o comportamento esperado da variabilidade, uma vez que atividades humanas costumam variar em frequência e em amplitude.

*Tabela 13 Aspectos do modelo FRAM para a função cimentar*

Nome da função	Cimentar
----------------	----------

Descrição	Cimentar o espaço entre o tubo de revestimento e a formação
Aspecto	Descrição do Aspecto
Entradas	Plano / Procedimentos de Cimentação
	Plano de cimentação
Saídas	Poço revestido e cimentado
Pré-requisitos	Estabilidade da Plataforma
	Análise da pasta de cimento
	Poço revestido (estanqueidade e resistência)
Recursos	Equipes de trabalho
	Pasta de Cimento
Controle	Sistema de Monitoração (pressão / volume de fluido)
	BOP
	Controle de Custos
Tempo	Plano de exploração

A atividade abandonar foi a última atividade iniciada antes do acidente na deepwater Horizon, ou seja, no caso a combinação de variabilidades resultou em resultados desproporcionais e indesejados durante a função abandonar. A função abandonar amplificou as variabilidades de outras funções a montante.

*Tabela 14 Aspectos do modelo FRAM para a função abandonar.*

Nome da função	Abandonar
Descrição	Tamponar, avaliar a integridade e abandonar para que o poço posteriormente possa ser colocado em produção
Aspecto	Descrição do Aspecto
Entradas	Plano / Procedimentos de Abandono
Saídas	Poço com integridade testada e tamponado
Pré-requisitos	Poço revestido e cimentado
Recursos	Equipes de trabalho
Controle	BOP
	Controle de Custos
	Sistema de Monitoração (pressão / volume de fluido)
Tempo	Plano de exploração

Como o acidente da Deepwater Horizon já foi documentado e a sequência de eventos foi apresentada nesta pesquisa, conduziu-se aqui para os aspectos específicos da construção do modelo. Neste caso, além das funções “Gerenciar

Plataforma”, “Planejar” e “Fabricar equipamentos”, foram adicionadas as funções “regular” e “legislar”, pois, estas estavam acopladas às funções “Planejar” e “Fabricar equipamentos”. Adicionalmente, as funções “gerenciar a plataforma”, “fabricar equipamentos” e “Planejar” estão acopladas as funções “Perfurar”, “Revestir”, “Cimentar” e “Abandonar”. Para finalizar o modelo, incluí-se também a função “fabricar pasta de cimento”, a qual tem acoplamentos com a função cimentar e adicionou-se a função “Completar / Produzir”, a qual não chegou a ser desempenhada, mas era objetivo posterior do processo.

Uma vez incluídas as funções que complementam o modelo, também foram organizados os dados dos aspectos mapeados para estas funções em tabelas específicas.

*Tabela 15 - Aspectos do modelo FRAM para a função planejar*

Nome da função	Planejar
Descrição	Realizar o Plano de exploração do Poço
Aspecto	Descrição do Aspecto
Entradas	Concessão
Saídas	Plano de exploração
	Estudos geológicos e geofísicos
	Recursos de pessoal
Pré-requisitos	CFRS (Leis / Regulamentos)
Recursos	
Controle	
Tempo	

*Tabela 16 - Aspectos do modelo FRAM para a função Fabricar Equipamentos*

Nome da função	Fabricar equipamentos
Descrição	Fabricar os equipamentos conforme especificações
Aspecto	Descrição do Aspecto
Entradas	Pedido de Compra
Saídas	Sistema de Monitoração (pressão / volume de fluido)
	BOP
	Estabilidade da Plataforma
	Tubos de Perfuração
	Sistema de Brocas
	Sistema de Sustentação de Cargas

	Sistemas de circulação
	centralizadores
	testes de desempenho
Pré-requisitos	CFRS (Leis / Regulamentos)
Recursos	
Controle	
Tempo	

*Tabela 17 - Aspectos do modelo FRAM para a função Regular*

Nome da função	Regular
Descrição	Desenvolver Regulamentação para realização das atividades de exploração offshore.
Aspecto	Descrição do Aspecto
Entradas	Leis
	Recursos
Saídas	Concessão
	CFRS (Leis / Regulamentos)
Pré-requisitos	
Recursos	
Controle	
Tempo	

*Tabela 18 - Aspectos do modelo FRAM para a função Legislar*

Nome da função	Legislar
Descrição	Elaborar as Leis Necessárias para as atividades de Petróleo e Correlatas.
Aspecto	Descrição do Aspecto
Entradas	
Saídas	Leis
	Recursos
Pré-requisitos	
Recursos	
Controle	
Tempo	

*Tabela 19 - Aspectos do modelo FRAM para a função Gerenciar a Plataforma*

Nome da função	Gerenciar a Plataforma
Descrição	Gerenciar todos as equipes, planos, recursos e procedimentos da plataforma
Aspecto	Descrição do Aspecto

Entradas	Recursos de pessoal
	Plano de exploração
Saídas	Equipes de trabalho
	Pedido de Compra
	Plano / Procedimentos de Perfuração
	Plano / Procedimentos de Revestimento
	Plano / Procedimentos de Cimentação
	Plano / Procedimentos de Abandono
	Controle de Custos
Pré-requisitos	
Recursos	
Controle	
Tempo	

*Tabela 20 - Aspectos do modelo FRAM para a função Produzir*

Nome da função	Completar / Produzir
Descrição	Completar o poço de forma a torná-lo produtivo
Aspecto	Descrição do Aspecto
Entradas	Poço com integridade testada e tamponado
Saídas	
Pré-requisitos	
Recursos	
Controle	
Tempo	

*Tabela 21 - Aspectos do modelo FRAM para a função Elaborar pasta de Cimento*

Nome da função	Elaborar pasta de Cimento
Descrição	
Aspecto	Descrição do Aspecto
Entradas	
Saídas	Análise da pasta de cimento
	Plano de cimentação
	Pasta de Cimento
Pré-requisitos	
Recursos	
Controle	
Tempo	



As tabelas de 11 a 21 permitem observar melhor os aspectos que se repetem em diversas funções, significando assim as possibilidades de acoplamento e também de combinação de variabilidades em determinados instantes.

Como é possível observar no modelo construído na Figura 12, as funções “Pefurar”, “Revestir”, “Cimentar” e “Abandonar” possuem acoplamento com aspecto tempo da função “planejar”, a qual é realizada pelo concessionário. Neste ponto já é possível observar que variabilidades na função planejar, como uma saída de planejamento de tempo imprecisa impactaria todas as funções que possuem o seus controles acoplados, no caso da Deepwater Horizon o projeto estava atrasado há mais de 40 dias (GRAHAM et al., 2011). Além deste aspecto que já é possível notar em uma primeira análise, a função “gestão da plataforma” também possui acoplamento com as funções “Pefurar”, “Revestir”, “Cimentar” e “Abandonar” em relação ao aspecto controle de custos, desta forma, também é possível notar que saídas imprecisas referentes ao aspecto controle de custos da função “gestão da plataforma” seriam amplificadas pelas demais funções gerando resultados desproporcionais. No caso da Deepwater Horizon, os custos estavam 58 milhões acima do planejado (GRAHAM et al., 2011).

### **5.3.2 Identificar as variabilidades e descrever o acoplamento de variabilidades**

Para identificação das variabilidades, cada função recebeu uma classificação informando se a base de decisão dela é Humana, Tecnológica ou Organizacional, pois o método prescreve que a variação potencial de cada uma delas deve diferir em frequência e amplitude (HOLLNAGEL; HOUNSGAARD; COLLIGAN, 2014).

O software FRAM Model Builder fornece um conjunto de tabelas, nas quais foram indicados os parâmetros de variabilidade por função para estudo dos possíveis acoplamentos e combinações de variabilidades. A figura 13 apresenta o modelo de tabela utilizado para que possam ser consideradas e indentificadas as possíveis variações. Uma vez considerados os parâmetros de variabilidades identificados e configurações do software, procedeu-se a análise dos possíveis acoplamentos das funções devido as prováveis e reais variabilidades. A análise

ocorre então através da avaliação de cenários, ou seja, avaliam-se as variabilidades de tempo e precisão para cada função, considerando os potenciais acoplamentos e as variabilidades mais prováveis.

Possível fonte de variabilidade		Probabilidade
Interna	Muita, fisiológico e psicológico	Elevada frequência, grande amplitude
Externa	Muita, social e organizacional	Elevada frequência, grande amplitude

Potencial variabilidade da saída em relação ao tempo	
<input type="radio"/> Demasiado cedo	Possível (resposta sob pressão, fruto do acaso)
<input type="radio"/> A tempo	Possível, deverá ser habitual
<input type="radio"/> Muito tarde	Possível, mais provável do que demasiado cedo
<input type="radio"/> Não a todos	Possível, em menor grau

Potencial variabilidade da saída em relação à precisão	
<input type="radio"/> Preciso	Possível, mas improvável
<input type="radio"/> Aceitável	Habitual
<input type="radio"/> Impreciso	Possível, provável

Figura 13 - Variabilidades por Função - Exemplo função "Perfuração"

Avaliando o modelo como um todo é possível observar que os processos possuem muitos acoplamentos dos aspectos relacionados a controle e recursos, uma vez que os recursos são compartilhados e os controles são comuns para as funções "Perfurar", "Revestir", "Cimentar" e "Abandonar". Como as funções "Planejar" e "Gerenciar a plataforma" geram os aspectos que estão acoplados aos aspectos de controle e tempo, suas variabilidades podem ser amplificadas aqui, como comentado anteriormente.

Além destes acoplamentos, a função "cimentar" tem como pré-requisito a saída da função "revestir", desta forma, variabilidades da função revestir podem ser amplificadas pela função "cimentar". No caso da Deepwater Horizon, a função "cimentar" recebeu a pré-condição de "Poço revestido (estanqueidade e resistência)" com uma variabilidade de saída em relação a precisão, no caso a saída foi imprecisa, pois a fixação do tubo de revestimento havia planejado um número de centralizadores divergentes da quantidade efetivamente utilizada no poço. Esta variabilidade pode ter sido amplificada pela variabilidade da função "cimentar", uma vez que a pré-condição "Análise da pasta de cimento" também não ocorreu por conta de variabilidade de tempo da função "Elaborar pasta de cimento".

As investigações do acidente apontam para uma possível combinação do posicionamento inadequado do tubo devido ao número de centralizadores e uma cimentação inadequada por uma provável fragilidade da pasta de cimento (BEA, 2011). A atividade de cimentação ocorreu sem que tivesse sido concluída a análise da pasta de cimento, provavelmente por conta da restrição de tempo, a qual era um aspecto de controle e a plataforma estava com o projeto atrasado, como citado anteriormente.

Observando a função “Fabricar Equipamentos”, temos acoplamentos com o aspecto de controle e recursos das funções “Perfurar”, “Revestir”, “Cimentar” e “Abandonar”, ou seja, variabilidades de precisão da função “Fabricar equipamentos” podem ser amplificadas ou atenuadas pelas funções com as quais está acoplada. No caso da Deepwater Horizon, os fabricantes de equipamentos forneceram o BOP inadequado para as condições para as quais eles estavam sendo utilizados, ou seja, houve aqui uma variação em relação a precisão. Independentemente de avaliarmos se as especificações partiram do concessionário, os acoplamentos relacionados ao aspecto de controle para o BOP inadequado foram atenuados pelas atividades de controle de poço das funções “Perfurar”, “Revestir”, “Cimentar”, todavia como a atividade de abandono não possuía procedimentos específicos para os testes de integridade de pressão negativa, segundo os relatórios de investigação (GRAHAM et al., 2011), conseqüentemente estava mais sujeita a variabilidades. As variabilidades na função “Abandonar” conseqüentemente se combinaram e esta combinação leva o poço a um descontrole.

A função “Fabricar equipamentos” está acoplada pelo aspecto de controle da saída da função “Regular”, o qual fica sujeito às variabilidades de tempo, as quais reduzem a resiliência do processo, quando a saída da função “Regular” é tardia. No caso da Deepwater Horizon, os procedimentos de testes para os BOPs não foram atualizados, apesar do conhecimento do MMS sobre a provável ineficiência dos atuais BOPs para contenção de Blowouts neste novo cenário. (BEA, 2011).

A função abandonar foi a última função desempenhada pela Deepwater Horizon antes do Blowout, neste caso uma variabilidade interna relacionada ao

aspecto “monitoração” amplificou as variabilidades recebidas pela função, em especial as variabilidades recebidas das funções “revestimento” e “cimentação” a montante por possível incorreto posicionamento do tubo, não realização da análise da pasta de cimento e possível contaminação e fragilidade do cimento no “shoe track”. No acidente avaliado, os sistemas de monitoramento foram desviados e ocorreram interpretações incorretas das informações de leitura dos instrumentos.

A função “Gerenciar a Plataforma” fornece os planos de trabalho que estão acoplados às entradas de cada processo. Neste caso, a elaboração dos planos de trabalho pela função “gerenciar a plataforma” recebe como entrada o plano de exploração do concessionário, desempenhado pela função “Planejar”. Neste caso, uma variação de precisão, por meio de um planejamento impreciso, da função “Planejar”, a qual é realizada pelo concessionário, pode ser amplificada pela função “Gerenciar a plataforma” e acoplada as funções “Perfurar”; “Revestir”; “Cimentar” e “Abandonar”, propagando assim a variabilidade provocada pela imprecisão.

### **5.3.3 Identificar Medidas**

De acordo com a análise FRAM da Deepwater Horizon para o poço Macondo, é possível notar que há um número muito grande de acoplamentos entre as Funções “Gerenciar a Plataforma”; “Planejar” e “Fabricar equipamentos” com as funções “Perfurar”, “Revestir”, “Cimentar” e “Abandonar” e isso se deve principalmente a compartilhamento de recursos, pré-requisitos e ações de controle comuns. Nestes casos com um número muito grande de acoplamentos, a medida para aumentar a resiliência dos processos deve considerar a capacidade de evitar que as variabilidades das funções a montante possam gerar resultados desproporcionais a jusante e uma forma de tornar isso possível é através do reconhecimento e atenuação das variabilidades que chegam para cada função.

Para que seja possível atenuar as variabilidades que chegam, uma proposta é a adoção de “Safety gates” (PEREIRA et al., 2014) para cada atividade, nesta proposta os “Safety Gates” funcionariam como semáforos, pois seriam um conjunto de requisitos que deveriam ser atendidos antes do início da atividade seguinte para

garantir um funcionamento adequado e seguro. Os resultados da análise destes requisitos poderiam gerar um “sinal verde” quando todos os requisitos foram atendidos e o processo pode prosseguir. Caso alguns requisitos (não críticos) não tenham sido atendidos, seria como um “sinal amarelo”, mas o processo pode prosseguir desde que ações para atenuar a variabilidade que chega sejam tomadas, e por fim, “vermelho” quando alguns requisitos críticos não foram atendidos e a variabilidade não pode ser atenuada por meios conhecidos e o processo deve ser paralisado (PEREIRA et al., 2014) Como há possibilidade que o acoplamento das funções com o aspecto tempo possa dificultar uma paralização de processo com não atendimento a requisito crítico, seria estabelecido um grupo de decisão, o qual tomaria as decisões críticas mais rapidamente em casos de paralização de processo, definindo assim meios para atenuar a variabilidade identificada e com o reconhecimento dos acoplamentos já mapeados para permitir o entendimento do todo e assegurar decisões mais abrangentes,

Outra ação proposta é o desenvolvimento de dispositivos que alertem os operadores em casos de leituras de pressão anormais que levariam a um Blowout, aumentando assim a possibilidade de que possam tomar ações para atenuar as variabilidades antecipadamente.

Procedimentos de abandono também deveriam ser criados para aumentar a capacidade dos operadores em responderem as variabilidades e também para ajudar a reduzir a variabilidade interna por conta da ausência de procedimentos. Outra recomendação seria a divulgação do modelo FRAM e utilização para o desenvolvimento de procedimentos e instruções de trabalho, pois usualmente as decisões que amplificam a variabilidade são tomadas sem o conhecimento dos acoplamentos existentes. Esta ação tornaria mais viável a construção de processos mais resilientes nos casos dos acoplamentos das funções “Cimentação” e “Abandono”, pois no caso da Deepwater Horizon, o desconhecimento do possível acoplamento entre uma cimentação inadequada e teste de abandono incorretos não permitiu que ações fossem tomadas para atenuar a variabilidade corrigindo a cimentação.

## 6 COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS

Apesar das limitações da pesquisa em relação a fonte de dados, pois são consideradas aqui somente informações já coletadas e sujeitas a influências dos analistas, é possível identificar diferenças acentuadas entre os resultados desenvolvidos com os métodos de Análise de Árvore de Falhas (AAF) utilizado pela British Petroleum e os métodos FRAM e STAMP aplicados nesta pesquisa. A comparação entre os métodos levou em conta os aspectos de facilidade de construção do modelo, necessidade de software para modelagem, capacidade de identificar causas sistêmicas, sistemática para priorização das causas, adequação para sistemas complexos, subjetividade da análise, capacidade de identificar culpados. A tabela 22 foi elaborada para facilitar a comparação.

*Tabela 22 - Comparativo entre métodos de análise*

	<b>Método</b>		
	<b>AAF</b>	<b>FRAM</b>	<b>STAMP</b>
<b>Facilidade de Construção do modelo</b>	Fácil	Difícil	Moderado
<b>Necessidade de software para modelagem</b>	Não	Sim	Não
<b>Identifica causas sistêmicas</b>	Pouco provável	Sim	Sim
<b>Sistemática para priorização das causas</b>	Sim	Não	Não
<b>Adequação para sistemas complexos</b>	Pouco adequado	Moderado	Moderado
<b>Subjetividade da Análise</b>	Moderado	Moderado	Moderado
<b>Capacidade de identificar culpados</b>	Sim	Não	Não

Pela comparação, nota-se que o método de árvore de falhas utilizado no relatório da British Petroleum apresenta uma forma intuitiva de questionar sucessivamente as causas do acidente, partindo do evento indesejado até a identificação de causas mais específicas. No caso, a equipe da BP chegou a conclusão de que ocorreram 8 causas bem definidas e sequenciais que desencadearam os eventos que levaram ao acidente. Esta forma intuitiva de construir os modelos facilita a abordagem, todavia os resultados possuem foco em falhas de componentes humanos ou tecnológicos. Por outro lado, os modelos FRAM e STAMP são mais difíceis de serem construídos, pois necessitam de informações sobre as variabilidades normais de processo e da estrutura de controle e seus resultados indicam possibilidades de combinações ou falhas na estrutura de controle, sem apontar para falhas específicas de componentes como causa para o acidente.

Como os modelos FRAM e STAMP não são direcionados para falhas em componentes, tornam-se contra-intuitivos e ao invés de gerar um conjunto de falhas específicas, fornecem possíveis combinações que podem levar ao evento indesejado. Esta característica dos modelos não lineares para análise de acidentes se deve a grande suscetibilidade as condições iniciais dos sistemas complexos, a qual faz com que seja necessário o levantamento de várias possibilidades, pois a premissa é de que o futuro é imprevisível e há necessidade de se preparar para adaptações. A falta da indicação de um número ou modelo matemático que permita simplificar o que aconteceu no passado e quais as chances de acontecer no futuro geram insegurança nas pessoas e contribuem para a rejeição deste tipo de modelo por alguns analistas.

Um exemplo aqui é o acaso da aplicação do AAF que identificou como uma das causas raízes que “O modo de emergência do BOP não selou o poço”, entretanto o mesmo aspecto da falha do BOP é tratado pelo STAMP como evolução assíncrona da estrutura de controle e o FRAM gera um conjunto de possibilidades de acoplamentos que permitiriam a falha do BOP se as variabilidades fossem combinadas. Nota-se aqui que os métodos baseados em teoria de sistemas (FRAM e STAMP) avaliam um conjunto de possibilidades e que poderiam fazer com que

pequenas mudanças possam gerar resultados desproporcionais. As falhas de componentes estão incluídas na análise, mas não diretamente.

Os métodos STAMP e AAF não necessitam de nenhum software específico para construção dos modelos, entretanto a organização das informações da construção de um modelo FRAM sem um software de apoio para organização dos dados torna-se impraticável. Por outro lado, a forma de construção dos modelos FRAM com apoio do software FRAM Model Builder tornam o modelo menos suscetível a esquecimentos de aspectos importantes no momento da modelagem.

O fato do AAF ser mais intuitivo pode levar a uma falsa impressão de que seja menos subjetiva sua análise, entretanto AAF, STAMP e FRAM possuem o mesmo grau de subjetividade na análise, pois dependem dos critérios do modelador. A fidelidade do modelo ao processo pode ser melhorada com a ampliação da participação das pessoas atuantes no processo e seus especialistas, todavia sempre será uma simplificação para facilitar o entendimento.

A AAF possui um detalhamento das falhas no nível físico, todavia não são incorporadas as questões sistêmicas como o atraso do projeto e os custos muito além do planejado, os quais podem ter influenciado o acidente e são mais facilmente incorporados nas análises utilizando FRAM e STAMP. A impossibilidade de inclusão de aspectos sistêmicos na análise está exatamente nas características de construção da árvore de falhas, a qual exige que todos os elementos tenham causalidade direta com o acidente. Neste caso, é plausível que os aspectos sistêmicos de atraso no projeto e pressão para redução de custos tenham influenciado as falhas no nível físico, todavia como a causalidade não é direta, não é possível incluí-los na AAF.

Como a AAF é direcionada para a investigação de causas raízes que provocaram toda a cadeia que levou ao acidente, seria então um método mais adequado para a apuração dos responsáveis pelo acidente em eventuais ações judiciais e indenizações legais, entretanto estaria sujeita aos critérios dos analistas com possíveis influências na seleção das causas e ponto escolhido pelo analista



para parar a investigação. Por outro lado, apesar de não possuírem um foco específico nas falhas dos componentes, os métodos FRAM e STAMP incorporam em suas análises as características de variação dos processos que levam os componentes a falhar, seja através da combinação de variabilidades e acoplamentos ou pela falta de reforço das restrições de segurança.

Os métodos FRAM e STAMP incluem a possibilidade de variabilidade dos componentes e até mesmo a combinação de variabilidades, sendo assim opções mais apropriadas para sistemas complexos, pois passam a preencher esta lacuna deixada pela AAF e definem a segurança como propriedade emergente do sistema, a qual surge da combinação dos elementos. Com a inclusão da variabilidade como parte da análise, é possível considerar também a migração do sistema para as fronteiras da segurança, ou seja, mudanças nos processos que não representam necessariamente uma falha, mas conduzem o sistema para insegurança. No caso Macondo, um exemplo seria a evolução assíncrona da estrutura de controle projetada para o MMS, a qual pode acontecer na estrutura de controle de qualquer sistema com rápida evolução tecnológica.

Adicionalmente, na análise utilizando o método STAMP, a avaliação possui foco na estrutura de controle e retroalimentação, conduzindo também o analista na avaliação das condições que influenciaram o controlador nas decisões tomadas, identificando assim os fatores que moldam o comportamento. A utilização da AAF não conduz o analista na identificação dos fatores que moldaram o comportamento e permitiram que as decisões fizessem sentido no momento em que foram tomadas, pois aqui também precisa estar evidente a causalidade direta e dependerá do analista identificar o momento de parar a investigação. Por outro lado, na análise utilizando FRAM, os fatores que modam os comportamentos estão incorporados a todas as funções através dos aspectos compartilhados que amplificam ou atenuam a variabilidade e até mesmo na avaliação de variabilidades endógenas das funções.

No caso dos resultados relativos ao modelo FRAM, não há uma ênfase na estrutura de controle e para o caso da Deepwater permitiu observar um número muito grande de acoplamentos e possíveis combinações que poderiam gerar

resultados desproporcionais, todavia são consideradas em suas análises as variabilidades normais de processo. Neste caso da Deepwater Horizon, o método FRAM deixou claro que pequenas variabilidades em funções a montante podem gerar resultados amplificados e desproporcionais a jusante.

As funções relacionadas ao concessionário, gestão da plataforma e fabricantes de equipamentos mostram-se como impactantes para todas as etapas das atividades, ou seja, as variabilidades que se combinaram e permitiram a falha do BOP, por exemplo, poderiam permitir que qualquer componente falhasse, pois também estariam acopladas a outras funções. Caso fossem direcionados esforços somente ao nível físico de uma análise AAF, seria identificada a falha de componente e conseqüentemente a necessidade de um BOP mais robusto, todavia os acoplamentos mostram que caso a falha não ocorresse no BOP, outros componentes poderiam falhar da mesma forma. Sendo que, um BOP adequado para o cenário de hoje pode não ser adequado para acoplamentos e combinações de variabilidades futuras.

Uma deficiência comum dos métodos FRAM e STAMP é a falta de uma sistemática para priorização de ações, pois toda a análise é qualitativa, não permitindo assim que decisões possam ser tomadas com base em algum tipo de categorização ou classificação de riscos. Esta deficiência encontrada nos dois modelos não permite que as empresas possam direcionar seus recursos, que são limitados, para os aspectos mais críticos que garantam a segurança do sistema.

Outra diferença que é possível ressaltar dos métodos é a questão de que com o FRAM, a análise não obriga a avaliar níveis hierárquicos superiores, pois aspectos e acoplamentos guiam a análise independentemente do nível. No caso do STAMP, a obrigatoriedade da construção de uma estrutura de controle hierárquico acaba condicionando o analista a avaliar as questões sistêmicas de níveis superiores e geram resultados diferentes para cada nível analisado.

Os modelos baseados em teoria de sistemas receberam aplicações em diversos setores como aviação (DE CARVALHO, 2011), indústria aeroespacial

(LEVESON, 2002b), transporte ferroviário (BELMONTE et al., 2011) e forças armadas (PEREIRA; LEE; HOWARD, 2006), entretanto atualmente encontram maior resistência na sua adoção pela indústria e estudos como o de Underwood e Waterson (2013b) tem apontado este descompasso entre as pesquisas científicas e práticas da indústria. Um dos motivos para esta resistência pode estar nos resultados dos modelos de sistemas complexos, pois os mesmos não mostram um futuro previsível ou um número de risco que possa simplificar as chances de um acidente. Modelos como FRAM e STAMP consideram que o futuro é imprevisível e precisamos nos preparar para adaptação contínua, todavia, a imprevisibilidade acaba gerando insegurança sobre a capacidade de lidar com os desafios do futuro e geram a sensação de descontrole.

## 7 CONCLUSÕES

As análises do Deepwater Horizon Blowout utilizando os métodos FRAM e STAMP demonstram um resultado com aspectos diferentes do relatório oficial da operadora do poço e o comparativo entre os modelos apresentado na Tabela 22 permite identificar melhor as características e diferenças entre os modelos. A principal diferença dos métodos utilizados neste estudo e a AAF está no reconhecimento de que o sistema de exploração offshore é dinâmico e varia ao longo do tempo, possibilitando a combinação de variabilidades e exigindo rápidas adaptações.

A elaboração dos modelos baseados teoria de sistemas demonstram que o entendimento do processo como um todo permite identificar decisões que tomadas isoladamente parecem fazer sentido, mas também podem gerar resultados catastróficos quando combinadas. Um exemplo disso é a decisão tomada pela equipe da BP de realizar a cimentação com um número de centralizadores diferente do projeto inicial. Neste caso, uma eventual fragilidade da cimentação poderia ser corrigida posteriormente, pois outras atividades futuras permitiriam a identificação de eventuais fragilidades na cimentação, mas neste caso esta decisão foi combinada com as decisões de não realizar a avaliação da integridade da cimentação com a equipe da Schlumberger e a decisão de não elaborar procedimentos específicos para o aceite dos testes de pressão negativa. Nos modelos FRAM e STAMP, os acoplamentos e as realimentações permitem identificar combinações como esta, nas quais as variabilidades e retroalimentações influenciam decisões futuras.

Ao comparar os modelos FRAM e STAMP, nota-se que a forma de construção dos modelos é bastante distinta e os resultados também possuem muitas especificidades. Enquanto STAMP força o analista a identificar aspectos sistêmicos que possam fazer com que o controle do sistema seja perdido em cada nível, o

modelo FRAM não prescreve a necessidade de identificação de níveis de controle, mas inclui um aspecto específico de controle. FRAM conduz a análise nos acoplamentos e variabilidades das funções independentemente dos níveis. Como os métodos FRAM e STAMP reconhecem o dinamismo dos sistemas complexos e absorvem estas características nos modelos, tornam-se alternativas mais adequadas para sistemas complexos, nos quais ocorrem grandes variações e combinações de variabilidades. Todavia, o método de árvore de falhas utilizado pela operadora do poço macondo para investigação do acidente continua sendo uma ferramenta interessante para análise de sistemas predominantemente técnicos, nos quais não seria tão relevante a avaliação das variabilidades.

No caso da aplicação do método FRAM, é possível enxergar o processo com detalhes, considerando até mesmo as questões mais próximas das características técnicas dos componentes. Como o método baseia-se na variabilidade de desempenho normal, a observação bastante atenta do analista é imprescindível para não cair em um mapeamento desnecessário de variabilidades que não suportariam adequadamente a análise. Os recursos de simulação de dinâmica de sistemas poderiam simular os cenários e devolver ao modelador as opções de acoplamentos mais críticas, mas estes recursos não estão disponíveis no software FRAM Model Builder.

A abordagem diferenciada dos modelos FRAM e STAMP permitiu a identificação de resultados diferentes a partir de relatórios com informações já coletadas e organizadas nos relatórios oficiais, como pode ser visto nos resultados das modelagens do capítulo 5, todavia os dados coletados já foram influenciados pela metodologia de coleta aplicada pelo analista. Os resultados da análise com a aplicação do modelo STAMP e FRAM não fornecem causas raízes simples, mas identificam um conjunto de possibilidades que podem ter contribuído para o acidente ou podem influenciar decisões que levem a acidentes futuros.

Muito ainda precisa ser pesquisado e definido na construção de modelos que sejam adequados aos sistemas complexos que construímos hoje, todavia STAMP e FRAM já deram um grande passo ao incluir a variabilidade e retroalimentações nos

modelos, pois este dinamismo é certamente uma característica dos processos atuais. Caso seja necessário optar por STAMP ou FRAM, a Tabela 22 mostra em seu comparativo que o FRAM exige um pouco mais de investimento por requerer maior esforço para modelagem e necessita de um software de apoio. A escolha deve ser realizada então levando-se em conta a disponibilidade de recursos e afinidade da equipe com o método. Independentemente do modelo escolhido, quanto maior for a fidelidade do modelo aos processos, incluindo suas interações, variabilidades e retroalimentações, mais fiéis serão os resultados para chegar a soluções efetivas. Esta maior fidelidade pode ser conseguida com a participação dos atuantes no processo, especialistas, e melhoria contínua dos modelos à medida que o conhecimento dos processos se desenvolve.

### **7.1 Pesquisas Futuras**

Como esta pesquisa foi desenvolvida com as informações coletadas de relatórios de acidentes, um estudo futuro poderia incluir a análise prospectiva de segurança no processo de exploração offshore empregando FRAM e STAMP, utilizando como fonte de informações entrevistas para elicitación do conhecimento de profissionais especialistas em exploração offshore, gerando resultados mais assertivos na construção de modelos de análise de segurança para prevenção de *Blowouts*, incluindo indicadores de resiliência e o desenvolvimento de métodos para priorização das ações identificadas.

## REFERÊNCIAS

BARTLIT, FRED H.; SANKAR, S. N.; GRIMSLEY, S. **Macondo The Gulf Oil Disaster National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling**. Washington, DC: [s.n.].

BEA, R. **Final Report on the Investigation of the Macondo Well Blowout Deepwater Horizon Study Group**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[http://ccrm.berkeley.edu/pdfs\\_papers/bea\\_pdfs/DHSGFinalReport-March2011-tag.pdf](http://ccrm.berkeley.edu/pdfs_papers/bea_pdfs/DHSGFinalReport-March2011-tag.pdf)>.

BELMONTE, F. et al. Interdisciplinary safety analysis of complex socio-technological systems based on the functional resonance accident model: An application to railway trafficsupervision. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 96, n. 2, p. 237–249, fev. 2011.

BERTALANFFY, L. VON. **General System Theory: Foundations, Development, Applications**. 1. ed. New York: George Braziller Inc, 1969.

BLYTHE, B. J. et al. **SUBSEA DRILLING , WELL OPERATIONS AND COMPLETIONS**, 2011. Disponível em: <[http://www.npc.org/prudent\\_development-topic\\_papers/2-11\\_subsea\\_drilling-well\\_ops-completions\\_paper.pdf](http://www.npc.org/prudent_development-topic_papers/2-11_subsea_drilling-well_ops-completions_paper.pdf)>

BOEM, B. OF O. E. M. R. AND E. **Report regarding the causes of the April 20, 2010 Macondo well blowout**Houston, 2011.

BOESCH, D. Deep-water drilling remains a risky business. **Nature**, v. 484, n. 7394, p. 289, 19 abr. 2012.

BP, B. P. **Deepwater Horizon Accident Investigation Report**HoustonBritish Petroleum, , 2010.

CCPS. **Guideline for Process Safety Metrics**. 1. ed. New York: Wiley, 2008.

CCPS. **GUIDELINES FOR DEVELOPING QUANTITATIVE SAFETY**. 1. ed. New York: Center for Chemical Process Safety, 2009.

CCPS, C. FOR C. P. S. **Guidelines for risk based process safety**. 1. ed. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2007.

CORBETTA, M.; SHULMAN, G. L. Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. **Nature reviews. Neuroscience**, v. 3, n. 3, p. 201–215, 2002.

CRANDALL, B.; KLEIN, G.; HOFFMAN, R. **Working minds : a practitioner's guide to cognitive task analysis**. First ed. London: MIT Press, 2006.

DE CARVALHO, P. V. R. The use of Functional Resonance Analysis Method (FRAM) in a mid-air collision to understand some characteristics of the air traffic management system resilience. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 96, n. 11, p. 1482–1498, nov. 2011.

- DNV. **Forensic Examination of Deepwater Horizon Blowout Preventer**. Washington, DC: [s.n.].
- ECKLE, P.; BURGHER, P.; MICHAUX, E. Risk of Large Oil Spills: A Statistical Analysis in the Aftermath of Deepwater Horizon. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 23, p. 13002–13008, 5 nov. 2012a.
- ECKLE, P.; BURGHER, P.; MICHAUX, E. Risk of Large Oil Spills: A Statistical Analysis in the Aftermath of Deepwater Horizon. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 23, p. 13002–13008, 5 nov. 2012b.
- ENERGY/DOE, U. S. D. OF. **Accident and Operational Safety Analysis**. [s.l: s.n.].
- FORRESTER, J. W. **Industrial Dynamics**. 1. ed. Cambridge: The M.I.T. Press, 1961.
- FORRESTER, J. W. Nonlinearity in high-order models of social systems. v. 30, p. 104–109, 1987.
- GA, M. et al. Int . J . Production Economics Impact of lean manufacturing and environmental management on business performance: An empirical study of manufacturing firms. **Intern. Journal of Production Economics**, v. 129, n. 2, p. 251–261, 2011.
- GORDON, J. E. The Epidemiology of Accidents. **American Journal of Public Health and the Nations Health**, v. 39, n. 4, p. 504–515, abr. 1949.
- GRAHAM, B. et al. **Deepwater - The Gulf Oil Disaster and the Future of Offshore Drilling**library of congress. Washington, DC: [s.n.]. Disponível em: <<http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>>. Acesso em: 25 fev. 2014.
- HARMS-RINGDAHL, L. **Guide to safety analysis for accident prevention**. [s.l: s.n.].
- HOLLNAGEL, E. **Barriers and Accident Prevention**. 1. ed. Aldershot: Ashgate Publishing Limited, 2004.
- HOLLNAGEL, E. **The ETTO Principle : Efficiency - Thoroughness Trade-off**. 1. ed. Farnham: Ashgate Publishing Limited, 2009.
- HOLLNAGEL, E. **On How ( Not ) To Learn from Accidents**MINES ParisTech. Paris: [s.n.]. Disponível em: <[http://www.uis.no/getfile.php/Konferanser/Presentasjoner/Ulykkesgransking2010/EH\\_AcciLearn\\_short.pdf](http://www.uis.no/getfile.php/Konferanser/Presentasjoner/Ulykkesgransking2010/EH_AcciLearn_short.pdf)>. Acesso em: 23 jun. 2015.
- HOLLNAGEL, E. Coping with complexity: past, present and future. **Cognition, Technology & Work**, v. 14, n. 3, p. 199–205, 29 dez. 2011.
- HOLLNAGEL, E. **FRAM: The Functional Resonance Analysis Method**. 1. ed. Farnham: Ashgate Publishing Limited, 2012.
- HOLLNAGEL, E. An Application of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) to Risk Assessment of Organisational Ch. 2013.
- HOLLNAGEL, E.; HOUNSGAARD, J.; COLLIGAN, L. **FRAM – the Functional Resonance Analysis Method - A handbook for the practical use of the method**. 1. ed. Middelfart: [s.n.].
- HOLLNAGEL, E.; WOODS, D. D.; WREATHALL, J. **Resilience Engineering in Practice**. 1. ed. farnham: Ashgate Publishing Limited, 2010.



- HOVDEN, J.; ALBRECHTSEN, E.; HERRERA, I. A. Is there a need for new theories, models and approaches to occupational accident prevention? **Safety Science**, v. 48, n. 8, p. 950–956, out. 2010.
- HSE, H. AND S. E. **HG254 Developing Process Safety Indicator**. 1. ed. [s.l.] HSE proced publications, 2006a. v. 2
- HSE, S. E. **Developing process safety indicators - HSG 254**. 1. ed. [s.l.] HSE books, 2006b.
- KATSAKIORI, P.; SAKELLAROPOULOS, G.; MANATAKIS, E. Towards an evaluation of accident investigation methods in terms of their alignment with accident causation models. **Safety Science**, v. 47, n. 7, p. 1007–1015, ago. 2009.
- KHAN, S. et al. No Fault Found events in maintenance engineering Part 1: Current trends, implications and organizational practices. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 123, p. 183–195, 2014.
- LEVESON, N. A new approach to system safety engineering. **Manuscript in preparation, draft can be viewed at ...**, n. June, 2002a.
- LEVESON, N. **A new accident model for engineering safer systems**. Cambridge: Pergamon, 2004. v. 42
- LEVESON, N. Controversies in Science and Technology. In: KLEINMAN, D. L. et al. (Eds.). . 1. ed. [s.l.] Mary Ann Liebert Press, 2008. v. 2p. 533.
- LEVESON, N. G. **Safeware: System Safety and Computers**. 1. ed. New York: Addison-Wesley, 1995. v. 1
- LEVESON, N. G. **System Safety Engineering : Back To The Future**. [s.l: s.n.].
- LEVESON, N. G. **Engineering a Safer World**. 1. ed. Cambridge: Library of Congress, 2011.
- LEVESON, N. G. **An STPA Primer (Versioin 1)**massachusetts, 2013. Disponível em: <<http://sunnyday.mit.edu/STPA-Primer-v0.pdf>>
- LUNDBERG, J.; ROLLENHAGEN, C.; HOLLNAGEL, E. What-You-Look-For-Is-What-You-Find – The consequences of underlying accident models in eight accident investigation manuals. **Safety Science**, v. 47, n. 10, p. 1297–1311, dez. 2009.
- MILLER, J. H.; PAGE, S. E. **Complex Adaptive Systems: An Introduction to Computational Models of Social Life**. [s.l: s.n.]. v. 27
- MITCHELL, M. **Complexity: A Guided Tour**. 1. ed. New York: Oxford University Press, Inc, 2009. v. 1
- NAE, N. A. OF E. **Macondo Well-Deepwater Horizon Blowout: Lessons for Offshore Drilling Safety**. [s.l: s.n.].
- NAE, N. A. OF E. **Macondo Well-Deepwater Horizon Blowout: Lessons for Offshore Drilling Safety**. 1. ed. Washington, DC: [s.n.].
- O'CONNOR, P. D. T.; KLEYNER, A. **Practical Reliability Engineering**. 5. ed. [s.l: s.n.]. v. 1
- OECD. **Guidance on Developing Safety Performance Indicator**. Second Edi ed. Paris: [s.n.].
- OFFSHORE CENTER DANMARK. **Offshore Book**. First ed. Esbjerg: [s.n.].
- OGP, I. A. OF O. & G. P. **Process Safety – Recommended Practice on Key**

**Performance Indicators Table of Contents** (OGP, Ed.). London: 1, 2011. Disponível em: <[www.ogp.org.uk](http://www.ogp.org.uk)>.

PEREIRA, R. F. et al. **Safety Analysis of the Deepwater Horizon Blowout Based on the Functional Resonance Analysis Model ( FRAM )** 5th International Conference on Applied Human Factor and Ergonomics. **Anais...**Krakow: AHFE, 2014

PEREIRA, S. J.; LEE, G.; HOWARD, J. A System-Theoretic Hazard Analysis Methodology for a Non-advocate Safety Assessment of the Ballistic Missile Defense System. **2006 AIAA Missile Sciences Conference**, v. 1606, p. 10, 2006.

PERROW, C. **Normal accident at three Mile Island** Society, jul. 1981. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF02701322>>. Acesso em: 25 fev. 2014

QURESHI, Z. H. A Review of Accident Modelling Approaches for Complex Critical Sociotechnical Systems. v. 86, p. 72, 2008.

RASMUSSEN, J. Risk management in a dynamic society: a modelling problem. **Safety Science**, v. 27, n. 2-3, p. 183–213, nov. 1997.

RAY, S. Prevention of industrial accidents using Six Sigma approach. n. 2002, 2005.

REASON, J. The contribution of latent human failures to the breakdown of complex systems. **Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences**, v. 327, n. 1241, p. 475–484, 1990.

REASON, J.; HOLLNAGEL, E.; PARIES, J. **Revisiting the Swiss Cheese Model**. Brussels: [s.n.].

RICKLES, D.; HAWES, P.; SHIELL, A. A simple guide to chaos and complexity. **Journal of epidemiology and community health**, v. 61, n. 11, p. 933–7, nov. 2007.

SENGE, P. M. **The Fifth Discipline**. 1. ed. New York: Library of Congress, 1990.

SKALLE, P. **Pressure control during oil well drilling**. 4. ed. [s.l.] bookboon, 2012.

UNDERWOOD, P.; WATERSON, P. **Accident Analysis Models and Methods : Guidance for Safety Professionals**. [s.l.: s.n.].

UNDERWOOD, P.; WATERSON, P. Systemic accident analysis: examining the gap between research and practice. **Accident; analysis and prevention**, v. 55, p. 154–64, jun. 2013b.

WASSEL, R. Lessons from the Macondo Well Blowout in the Gulf of Mexico. **The Bridge on Social Sciences and Engineering Practice**, v. 1, p. 46–53, 2012.

ZIMMERMANN, K. et al. Is the Aviation Industry Ready for Resilience? Mapping Human Factors Assumptions across the Aviation Sector. In: **Resilience Engineering in Practice**. 1. ed. farnham: [s.n.]. p. 363.

APENDICE

