

CENTRO DE TECNOLOGIA DA INDÚSTRIA QUÍMICA E TÊXTIL
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA SENAI: CENTRO DE TECNOLOGIA DA
INDÚSTRIA QUÍMICA E TÊXTIL

Lucas dos Santos Ferreira da Silva

Análise de Eventos em Acidentes da Indústria Óleo e Gás na Área *Offshore*

Rio de Janeiro
2024

Lucas dos Santos Ferreira da Silva

Análise de Eventos em Acidentes da Indústria Óleo e Gás na Área *Offshore*

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em engenharia química, da Faculdade de Engenharia Química SENAI CETIQT, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia química.

Orientador(a): Marta Cristina Picardo

Coorientador(a): Maximiano Correia Martins

Rio de Janeiro

2024

Silva, Lucas.

Análise de Eventos em Acidentes da Indústria Óleo e Gás na Área *Offshore*.
/Lucas dos Santos Ferreira da Silva – 2024. 57 folhas

·
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) -
SENAI CETIQT, Rio de Janeiro, 2024.

1. Árvore de eventos. 2.Gestão de riscos. 3.Medidas preventivas. 4. Sonda
Marítima Norbe VIII. 5.Plataforma P-48 . 6. FPSO Cidade de São Mateus. I.
Picardo, Marta (Orientadora). Martins, Maximiano (Coorientador).

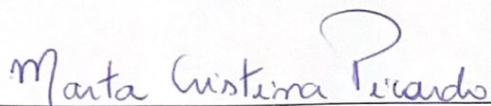
Lucas dos Santos Ferreira da Silva

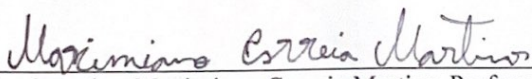
Análise de Eventos em acidentes da Indústria Óleo e Gás na área Offshore

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em engenharia química, da Faculdade de Engenharia Química SENAI CETIQT, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia química.

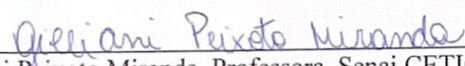
Aprovada em:

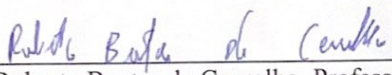
Aprovado por:

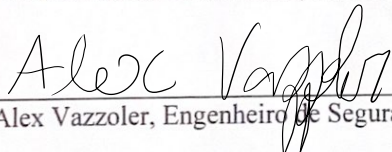

Orientador: Marta Cristina Picardo, Professora.


Coorientador: Maximiano Correia Martins, Professor.

Banca Examinadora:


Gilliani Peixoto Miranda, Professora, Senai CETIQT.


Roberto Bentes de Carvalho, Professor, Senai CETIQT


Alex Vazzoler, Engenheiro de Segurança de Processos, Safe Solutions Engenharia

Rio de Janeiro

2024

AGRADECIMENTOS

Inicialmente eu gostaria de dizer que sou muito grato aos meus colegas de turma Catarina, Paulo, Alexandre, Maria Eduarda, Yure e Beatriz que estiveram comigo e me apoiaram durante o período da faculdade.

Sou grato aos meus professores: Marta, Max, André, Leticia, Claudia, Alex, Héctor, Gilliani e Tanise, que me ensinaram não apenas os conhecimentos para me tornar um engenheiro, mas também o quão prazeroso essa profissão pode ser e como o esforço pode ser satisfatório.

E por fim sou grato a minha mãe, Lilian dos Santos Silva, e meu padrinho, Antonio Carlos Paulino, que me ensinaram a nunca desistir de alcançar minhas metas e sempre me incentivaram a alcançar meus sonhos. Eu amo vocês, obrigado por tudo.

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso teve como objetivo analisar acidentes ocorridos na última década na área *offshore* de exploração e produção de petróleo, utilizando a metodologia da árvore de eventos para análise da frequência de falhas. Foram selecionados três incidentes de diferentes gravidades, baseados na base de dados da Agência Nacional do Petróleo (ANP): a explosão na Sonda Marítima Norbe VIII, o incêndio na plataforma P-48 e o incidente de explosão ocorrido no FPSO Cidade de São Mateus. A aplicação da árvore de eventos permitiu uma análise detalhada dos fatores contribuintes e das falhas operacionais envolvidas em cada incidente. Através dessa análise, identificou-se padrões comuns e diferenças significativas entre os acidentes, destacando a importância de um gerenciamento de mudanças efetivo, conformidade com critérios de projeto e monitoramento constante de atividades críticas. Como base nos eventos de falha identificados, foram propostas ações corretivas e preventivas, como por exemplo para evitar a repetição desses eventos no futuro. Além disso, este estudo sugere a realização de trabalhos futuros que abordem a implementação de sistemas avançados de monitoramento do processo, a melhoria contínua dos procedimentos de segurança gerais e específicos, a capacitação para a manutenção e operação regular dos operadores para promover uma cultura de segurança robusta nas operações offshore.

Palavras-chave: Árvore de eventos, Gestão de riscos, Medidas preventivas, Sonda Marítima Norbe VIII, Plataforma P-48, FPSO Cidade de São Mateus.

ABSTRACT

This work is aimed to analyze accidents that occurred in the offshore oil exploration and production sector over the past decade, using the event tree methodology for failure frequency analysis. Three incidents of varying severity were selected based on the National Petroleum Agency (ANP) database: the explosion on the Norbe VIII drilling rig, the fire on platform P-48, and the explosion incident on the FPSO Cidade de São Mateus. The application of the event tree methodology allowed for a detailed analysis of the contributing factors and operational failures involved in each incident. Through this analysis, common patterns and significant differences between the accidents were identified, highlighting the importance of effective change management, compliance with design criteria, and continuous monitoring of critical activities. Based on the identified failure events, corrective and preventive actions were proposed to prevent the recurrence of these events in the future. Additionally, this study suggests future research addressing the implementation of advanced process monitoring systems, continuous improvement of general and specific safety procedures, and training for regular maintenance and operation to promote a robust safety culture in offshore operations.

Keywords: Event tree, Risk management, Preventive measures, Sonda Marítima Norbe VIII, Plataforma P-48, FPSO Cidade de São Mateus.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico representando a frequência dos eventos e suas consequências (Segurança do trabalho x processo, 2019).....	15
Figura 2 - Plataforma fixa.....	17
Figura 3 – Plataforma FPSO.....	18
Figura 4 – Plataforma de Torre de Perfuração Móvel	19
Figura 5 – Incêndio da Plataforma <i>Deepwater Horizon</i>	21
Figura 6 – Plataforma <i>Piper Alpha</i> em chamas em 1988	22
Figura 7 – Incêndio noturno na planta BP AMOCO em 2005	23
Figura 8 – Naufrágio da plataforma P-36.....	25
Figura 9 – Representação visual dos pilares da Segurança de Processos.....	26
Figura 10 – Modelo do Queijo Suíço	28
Figura 11 – Exemplo de Árvore de Eventos	31
Figura 12 – Árvore de eventos do acidente da Plataforma P-48	42
Figura 13 – Árvore de eventos do acidente da Sonda Norbe VIII.....	46
Figura14 – Árvore de eventos do acidente do FPSO Cidade de São Mateus.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
CETIQT	Centro de Tecnologia da Indústria Química e Têxtil
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

SUMÁRIO

1. CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	11
1.1. INTRODUÇÃO.....	11
1.2. OBJETIVOS.....	12
1.2.1. Objetivo Geral	12
1.2.2. Objetivos Específicos	12
1.3. JUSTIFICATIVA	12
1.4. DELIMITAÇÃO	13
2. CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1. ACIDENTES DE PROCESSO NA INDÚSTRIA DE ÓLEO E GÁS.....	14
2.1.1. A Indústria de Óleo e Gás	16
2.2. ACIDENTES DE PROCESSO HISTÓRICOS E SUAS CAUSAS RAÍZES	20
2.2.1. Desastre da Deepwater Horizon (2010).....	20
2.2.2. Explosão na plataforma Piper Alpha (1988)	22
2.2.3. Acidente na refinaria Texas City (2005)	23
2.2.4. Acidente da plataforma P-36 (2001)	24
2.3. OS PILARES DA SEGURANÇA DE PROCESSO	25
2.3.1. Barreiras Preventivas e Mitigadoras.....	27
2.3.2. Integridade e Confiabilidade do Equipamento	29
2.4. ANÁLISE DE RISCO	30
2.4.1. Árvore de eventos.....	31
3. CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA	32
3.1. ANÁLISE DOS ACIDENTES.....	32
3.2. ÁRVORE DE EVENTO DO ACIDENTES	33
4. CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1. ANÁLISE DE CAUSAS RAÍZES.....	35
4.1.1. Plataforma P-48.....	35

4.1.2. Sonda Marítima NORBE VIII (NS-32).....	36
4.1.3. Incidente de Explosão Ocorrido no FPSO Cidade de São Mateus.....	37
4.2. ANÁLISE COMPARATIVA DAS ÁRVORES DE EVENTOS	38
4.2.1. Análise do acidente da plataforma de P-48	38
4.2.1.1. Danos Ambientais	41
4.2.1.2. Danos Patrimoniais.....	41
4.2.1.3. Danos Pessoais	42
4.2.2. ANÁLISE DO ACIDENTE DA SONDA NORBE VIII	42
4.2.2.1. Danos Ambientais	44
4.2.2.2. Danos Patrimoniais.....	44
4.2.2.3. Danos Pessoais	45
4.2.3. ANÁLISE DO ACIDENTE DO FPSO CIDADE DE SÃO MATEUS	45
4.2.3.1. Danos Ambientais	47
4.2.3.2. Danos Patrimoniais.....	47
4.2.3.3. Danos Pessoais	48
5. CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES FUTURAS	49
5.1. CONCLUSÃO.....	49
5.2. SUGESTÕES FUTURAS	50
REFERÊNCIAS	51

1. CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

A indústria química desempenha um papel de extrema importância na sociedade moderna, fornecendo uma ampla variedade de produtos que nos auxiliam no dia a dia. Mesmo com os atuais avanços da tecnologia, tais atividades não estão isentas de incidentes que poderão prejudicar a integridade da instalação de processo, causar danos ao meio ambiente e até mesmo perda de vidas humanas na unidade industrial e em áreas próximas (Kletz e Gomes, 2001). Esses incidentes estão relacionados a perda de contenção primária, e podem culminar em explosões, incêndios e/ou vazamentos, seja de líquidos ou gases.

Incidentes de processo referem-se a eventos indesejados que ocorrem durante a operação de instalações industriais, como refinarias, plantas petroquímicas, fábricas químicas, entre outras. Esses acidentes podem resultar em danos materiais, lesões pessoais e impactos ambientais significativos (Crowl, 2014). Geralmente, são causados por uma combinação de falhas técnicas, erros humanos e deficiências nos sistemas de segurança. Na engenharia química, a segurança de processos visa: implementar soluções para aumentar a segurança, minimizar os riscos associados ao processo e estabelecer sistemas que irão evitar que os danos causados sejam catastróficos e irreversíveis.

A indústria de óleo e gás tem um histórico de acidentes significativos que impactaram tanto o meio ambiente quanto a segurança dos trabalhadores, nas últimas duas décadas a ANP, foi responsável por realizar a investigação de 12 incidentes que ocorreram na área *offshore*. Entre os exemplos mais notáveis estão: o incêndio ocorrido na Plataforma P-48 e o acidente do FPSO Cidade de São Mateus, que resultou em fatalidades durante e após o acidente. Por meio dos relatórios é possível verificar que esses acidentes tiveram uma série de eventos causados pela combinação de falhas humanas e equipamentos defeituosos que levaram ao acontecimento dessas catástrofes.

Diante do histórico de acidentes na área *offshore* o presente trabalho realiza um levantamento dos relatórios de acidentes obtidos no banco de dados disponibilizados pela ANP, onde são analisadas as causas raízes desses acidentes, os fatores que contribuíram para o acontecimento desses acidentes. Foi desenvolvida uma Árvore de Eventos que, segundo Flanagan (1999), é uma ferramenta amplamente utilizada na análise de acidentes industriais, especialmente na área de segurança de processos. Essa abordagem visa identificar e compreender as sequências de eventos que levam a um acidente, desde as condições iniciais até

as consequências finais. A construção de uma Árvore de Eventos envolve a representação gráfica dos eventos em uma estrutura hierárquica, onde cada nó representa um evento e as ramificações representam as possíveis causas e efeitos.

No processo de análise, são identificados os eventos iniciais que desencadearam o acidente e, a partir deles, são investigadas as diversas possibilidades de causas que contribuíram para o evento indesejado. Essas causas são organizadas em árvore, mostrando a relação de causalidade entre os eventos. Dessa forma, é possível visualizar de forma sistemática as diferentes etapas e contribuições para o acidente, permitindo uma análise mais abrangente.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo desse trabalho foi analisar acidentes reais na indústria *offshore*: as causas raízes e a sequência de eventos que levaram aos acidentes e as recomendações propostas para aumentar a segurança dos sistemas investigados e disponibilizados oficialmente pela ANP e descritos em relatórios publicados, além de construir árvores de eventos.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Selecionar os acidentes em relatórios da ANP para serem analisados;
- Analisar os eventos que levaram ao acontecimento dos incidentes: da Plataforma P-48, da Sonda Norbe VIII e do FPSO Cidade de São Mateus;
- Elaborar uma árvore de eventos detalhada sobre os incidentes;
- Avaliar a eficácia das medidas preventivas e corretivas que foram adotadas antes e após o acidente.

1.3. JUSTIFICATIVA

O incidente da plataforma P-36 veio a ser o caso mais grave da indústria petroquímica brasileira que, segundo o relatório de incidente (ANP, 2001), resultou com a perda total da plataforma e os equipamentos. Estimasse que o patrimônio perdido tenha sido de bilhões de dólares. Além das perdas materiais, esse acidente acarretou 11 trabalhadores onde a explosão inicial e os subsequentes eventos de afundamento da plataforma causaram essas fatalidades.

com um severo impacto ambiental devido a quantidade de óleo que foi derramada no mar, e o derramamento de óleo causou poluição na área marinha circundante, afetando a fauna e a flora marinhas. A poluição por hidrocarbonetos pode ter efeitos devastadores em ecossistemas marinhos, incluindo a morte de peixes, aves marinhas e outros organismos.

A análise de acidentes na indústria *offshore* tornou-se uma área de interesse primordial devido à sua importância crítica para a segurança operacional, a preservação ambiental e a proteção dos trabalhadores. Ao criar uma árvore de eventos para cada incidente, busca-se fornecer uma visão detalhada das sequências de eventos e das interações entre os fatores que levaram aos acidentes, permitindo identificar padrões recorrentes e áreas de intervenção prioritárias.

1.4. DELIMITAÇÃO

Este trabalho teve como foco principal a análise de acidentes industriais, com ênfase nas ocorrências relacionadas à indústria de óleo e gás, especialmente em instalações *offshore*. A pesquisa se concentrou em estudar casos específicos de acidentes, com o objetivo de identificar as causas raízes e a sequência de eventos que levou ao acidente.

A formulação de uma Árvore de Eventos para cada acidente investigado, utilizando a metodologia descrita por Flanagan (1999). Foram analisados relatórios oficiais e documentação disponível para compreender as sequências de eventos que levaram aos acidentes, bem como as falhas mecânicas, erros humanos e deficiências nos sistemas de segurança que contribuíram para esses eventos indesejados.

2. CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. ACIDENTES DE PROCESSO NA INDÚSTRIA DE ÓLEO E GÁS

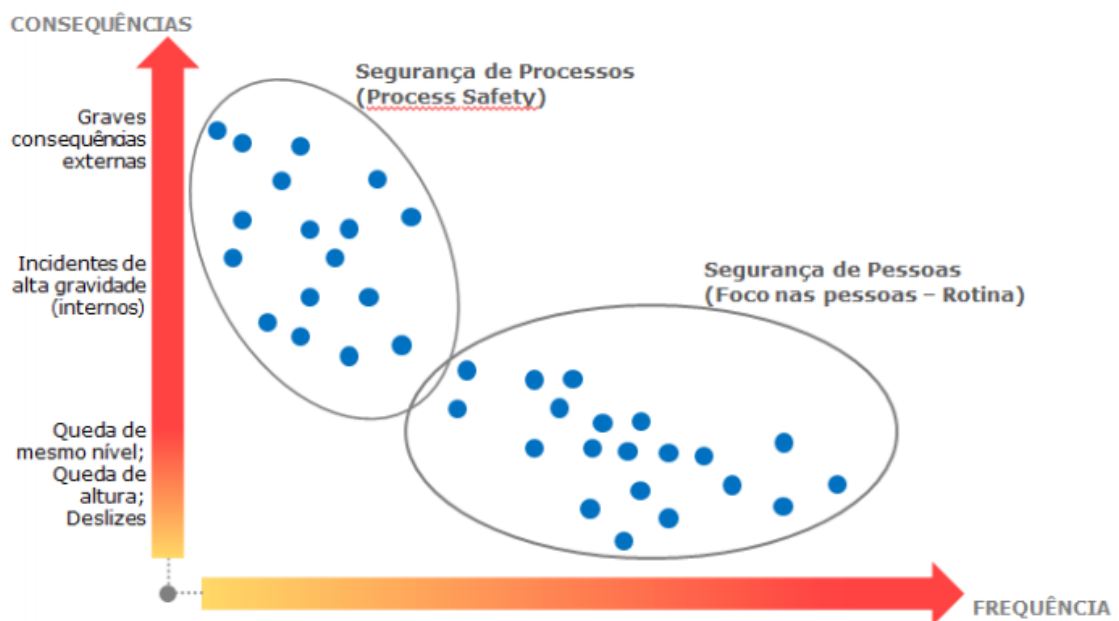
Acidentes de processo são eventos indesejados que ocorrem durante a operação de instalações industriais (Crowl, 2014). Enquanto alguns acidentes podem ser causados por falhas mecânicas em equipamentos, como vazamentos em tubulações ou rupturas de vasos de pressão, outros podem ser desencadeados por erros humanos, como falhas de comunicação ou procedimentos inadequados. Além disso, eventos externos, como condições climáticas extremas ou interferência de terceiros, também podem desempenhar um papel significativo na ocorrência de acidentes. Essa variedade de causas contribui para a frequência diferenciada de acidentes na indústria petroquímica, com alguns tipos de incidentes sendo mais comuns do que outros.

A implementação de medidas de segurança de processo na indústria petroquímica, conforme discutido por Daniel Crowl e Joseph Louvar em seu livro “Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications”(2014), tem sido fundamental para mitigar os riscos associados à operação de instalações industriais complexas. Ao longo das décadas, a conscientização sobre os perigos inerentes aos processos petroquímicos levou a um foco renovado na segurança operacional e na gestão de riscos.

A adoção de padrões rigorosos, impulsionou a implementação de sistemas de gestão de segurança robustos e a realização de análises de risco abrangentes. Além disso, avanços tecnológicos têm permitido o desenvolvimento de ferramentas de monitoramento e controle mais sofisticadas, como por exemplo: sistemas automáticos que podem regular a pressão interna de um reator durante um processo, ajudando as empresas a identificarem e responder rapidamente a potenciais ameaças à segurança.

Segundo Almeida (2019), não é possível definir a frequência que tais acidentes ocorrerão, pois os mesmos acontecem de forma rara. Tais ocorrências são raras por seus sistemas de mitigação e proteção desenvolvidos de forma complexa e modelados para o processo. Os acidentes de Deepwater Horizon (2010) e Piper Alpha (1988), estão juntos com outras grandes catástrofes que levaram anos para que determinado material ou equipamento se degradasse ao ponto de levar a acidentes de tal escala (Figura 1).

Figura 1 - Gráfico representando a frequência dos eventos e suas consequências (Segurança do trabalho x processo, 2019).



Fonte: Adaptado de Almeida (2019)

Diversos fatores podem levar ao acontecimento desses acidentes, segundo Crawl (2014) vários tópicos de causas raízes que podem levar a um acidente, incluindo:

1. Falhas de projeto: Problemas relacionados ao *design* inadequado de equipamentos, sistemas ou processos industriais.
2. Falhas de operação: Erros humanos durante a operação de equipamentos ou sistemas industriais.
3. Falhas de manutenção: Deficiências na manutenção preventiva ou corretiva de equipamentos.

4. Falhas de controle: Problemas com sistemas de controle de processos, como instrumentação inadequada ou mal operada.
5. Falhas de segurança: Deficiências nos sistemas de segurança, como alarmes, sistemas de extinção de incêndios e procedimentos de emergência.
6. Falhas de gerenciamento: Problemas relacionados à gestão inadequada de recursos humanos, treinamento, supervisão e cultura de segurança.
7. Falhas de comunicação: Problemas na transmissão eficaz de informações entre diferentes partes envolvidas nas operações industriais.

2.1.1. A Indústria de Óleo e Gás

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2024), a indústria de óleo e gás é um setor estratégico que desempenha um papel crucial na economia global, sendo responsável pela extração, produção e distribuição de recursos energéticos vitais para a sociedade moderna. Compreende uma ampla gama de atividades, desde a exploração e perfuração em reservatórios submarinos até o transporte e refino do petróleo e gás natural. Essa indústria opera em diversos ambientes, incluindo terrestre, costeiro e *offshore*, enfrentando desafios técnicos e logísticos únicos em cada cenário.

No contexto *offshore*, as operações de exploração e produção ocorrem em plataformas localizadas em alto-mar, muitas vezes em águas profundas ou ultraprofundas, onde os recursos petrolíferos são abundantes. Essas plataformas podem ser fixas, semissubmersíveis ou flutuantes, e segundo Camila Baroni (2023) são projetadas para resistir às condições adversas do ambiente marinho, incluindo ventos fortes, ondas altas e tempestades

A indústria *offshore* emprega uma vasta gama de profissionais, incluindo engenheiros químicos, mecânicos, elétricos, de petróleo e ambientais, além de técnicos especializados em operações de perfuração, produção e manutenção. Essa força de trabalho diversificada colabora para o desenvolvimento e operação segura das plataformas *offshore*, garantindo a eficiência e a integridade das instalações.

O setor *offshore* também conta com uma variedade de embarcações, que exercem diferentes funções na exploração da Bacia de Santos. Segundo as informações obtidas da Petróleo Brasileiro S. A. (PETROBRAS, 2023), a Bacia de Santos conta com os seguintes tipos de plataformas:

1. Plataformas Fixas: São embarcações instaladas diretamente no leito marinho, utilizando pilares ou jaquetas para fixação (Figura 2). São comumente utilizadas em águas rasas e em locais onde as condições do mar são mais calmas. Nas águas da Bacia de Santos, as plataformas fixas são menos comuns devido à profundidade do oceano.

Figura 2 - Plataforma fixa.



Fonte: (PETROBRÁS, 2023)

2. Plataformas *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO): Essas plataformas são navios adaptados para realizar as funções de produção, armazenamento e transferência de petróleo e gás (Figura 3). Elas flutuam na superfície do mar e são conectadas aos poços de petróleo por meio de dutos submarinos. As FPSOs são amplamente utilizadas na Bacia de Santos para produção em águas ultraprofundas e remotas.

Figura 3 – Plataforma FPSO



Fonte: (PETROBRAS, 2023)

3. Plataformas de Torre de Perfuração ou Navios-Sonda: Essas embarcações são utilizadas principalmente para atividades de perfuração de novos poços de petróleo e gás. Elas podem ser fixas ou móveis e são equipadas com sistemas de perfuração para acessar reservatórios submarinos (Figura 4). São comuns na fase inicial de exploração na Bacia de Santos para identificar e avaliar o potencial de novas descobertas.

Figura 4 – Plataforma de Torre de Perfuração Móvel



Fonte: (PETROBRÁS, 2023)

O processamento de petróleo em plataformas *offshore* é um processo complexo que envolve diversas etapas, adaptadas de acordo com o tipo de poço que a plataforma está sendo operando. Segundo Håvard Devold (2015) as plataformas de Torre de Perfuração ou Navios-Sonda, o processo inicia-se com a extração do petróleo do leito marinho por meio de perfuração submarina. Uma vez extraído, o petróleo é bombeado para a superfície e transferido para unidades de processamento a bordo da plataforma. Nessas unidades, ocorre a separação do petróleo bruto de outros componentes, como água e gás, através de processos de separação física e química. Posteriormente, o petróleo é estabilizado e tratado para atender aos padrões de qualidade necessários, sendo armazenado temporariamente na plataforma antes de seu transporte para refinarias em terra firme.

Por outro lado, nas plataformas *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO), o processo de processamento de petróleo é realizado de forma mais integrada. Nessas plataformas, o petróleo é extraído e processado a bordo, onde unidades de processamento são instaladas diretamente na própria plataforma flutuante (Reis, 2022). Após a extração, o petróleo

bruto passa por etapas de separação, estabilização e tratamento, porém de forma mais compacta e otimizada. Os subprodutos indesejados são separados e o petróleo processado é armazenado nos tanques de armazenamento da FPSO antes de ser transferido para navios-tanque para transporte.

Por fim, segundo Alonso (2010), nas plataformas fixas, o processo de processamento de petróleo ocorre em estruturas permanentemente ancoradas ao leito marinho. Nestas plataformas, o petróleo é extraído e enviado por dutos submarinos para unidades de processamento localizadas na própria plataforma. O petróleo bruto é tratado, separado e estabilizado, seguindo um processo semelhante ao das outras plataformas. No entanto, a capacidade de processamento pode ser limitada em comparação com as plataformas móveis, como as FPSOs, devido às restrições de espaço e infraestrutura.

2.2. ACIDENTES DE PROCESSO HISTÓRICOS E SUAS CAUSAS RAÍZES

Na história da segurança de processos, grandes acidentes se tornaram marcos onde foram instituídas novas normas, diretrizes e medidas de segurança para garantir que eles não se repitam. Dentre esses acidentes os mais notáveis na área de Óleo e Gás, estão: o Desastre de Deepwater Horizon (2010), o Incidente da plataforma Piper Alpha (1988), o Acidente na plataforma P-36 (2001) e o Acidente de Texas City (2005).

2.2.1. Desastre da *Deepwater Horizon* (2010)

Segundo o relatório disponível pelo U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB, 2016), o desastre da Deepwater Horizon foi um dos maiores desastres ambientais da história dos Estados Unidos e ocorreu em 20 de abril de 2010, no Golfo do México. A explosão e subsequente incêndio na plataforma de perfuração *offshore*, *Deepwater Horizon*, resultaram no derramamento de milhões de barris de petróleo no oceano. A explosão ocorreu durante a perfuração de um poço de petróleo, resultando na perda de 11 vidas humanas e ferindo várias outras pessoas. A plataforma, operada pela British Petroleum (BP), estava perfurando o poço Macondo, localizado a cerca de 66 quilômetros ao sul da costa da Louisiana (Figura 5).

Figura 5 – Incêndio da Plataforma Deepwater Horizon



Fonte: BBC News Brasil (2019)

O derramamento de petróleo da Deepwater Horizon causou danos ambientais devastadores ao ecossistema marinho do Golfo do México. O petróleo derramado contaminou milhares de quilômetros de praias, manguezais, estuários e áreas de pesca, causando mortes em massa de peixes, aves marinhas, mamíferos marinhos e outras formas de vida marinha (CSB, 2016). Além disso, o derramamento de óleo afetou negativamente as comunidades costeiras, prejudicando a pesca e o turismo e causando danos econômicos significativos à região.

As principais falhas que contribuíram para o acidente foram identificadas em vários aspectos do sistema de perfuração e produção (CSB, 2016). Primeiramente, houve uma falha na interpretação e resposta aos sinais de alerta de problemas no poço. Os engenheiros da plataforma ignoraram ou subestimaram os sinais de que a pressão no poço estava aumentando perigosamente. Além disso, deficiências na gestão de segurança e supervisão da BP, responsável pela operação do poço, foram apontadas como fatores contribuintes. Havia pressões para acelerar a produção e reduzir os custos, levando a cortes nas medidas de segurança e protocolos de emergência.

O sistema de perfuração e produção da Deepwater Horizon era altamente complexo e exigia uma coordenação precisa entre diversas equipes e tecnologias (CSB, 2016). A plataforma utilizava uma série de equipamentos de última geração, incluindo sondas de perfuração automatizadas, sistemas de controle remoto e técnicas avançadas de perfuração em águas

profundas. No entanto, apesar da sofisticação tecnológica, a falta de protocolos de segurança adequados e a falha na comunicação entre as equipes foram fatores-chave que contribuíram para o desastre.

2.2.2. Explosão na plataforma *Piper Alpha* (1988)

De acordo com o estudo de caso publicado pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA, 2013) explosão na plataforma Piper Alpha ocorreu em 6 de julho de 1988, no Mar do Norte, e é considerada uma das piores tragédias da indústria de petróleo e gás. A plataforma, operada pela empresa Occidental Petroleum, estava envolvida na produção de petróleo e gás natural no campo de Piper, a cerca de 193 quilômetros da costa da Escócia. A explosão foi causada por uma série de eventos, incluindo vazamento de gás condensado, falhas no sistema de segurança e erros humanos (Figura 6).

Figura 6 – Plataforma Piper Alpha em chamas em 1988



Fonte: Click Petróleo e Gás (2020)

Este acidente resultou na morte de 167 trabalhadores *offshore*, tornando-se o pior acidente em plataforma de petróleo da história. A explosão causou incêndios na plataforma, tornando impossível o resgate de muitos trabalhadores. As principais falhas identificadas que contribuíram para o acidente estavam relacionadas à ausência de procedimentos claros e protocolos de segurança para atividades de manutenção e reparo (NASA, 2013). A remoção da

válvula de alívio de pressão sem medidas adequadas de controle foi um exemplo claro dessa deficiência. Além disso, a comunicação entre as equipes operacionais e de manutenção foi falha, dificultando a coordenação eficaz durante a operação crítica.

O desastre da Piper Alpha levou a mudanças substanciais na regulamentação da indústria de petróleo e gás do Mar do Norte, com um foco renovado na segurança e na prevenção de futuros acidentes. Foram implementadas novas normas e práticas de segurança, incluindo aprimoramentos nos sistemas de prevenção e combate a incêndios, sistemas de controle de gás e procedimentos de evacuação (NASA, 2013). O incidente também destacou a importância da comunicação eficaz, treinamento adequado e cultura de segurança forte na prevenção de acidentes *offshore*.

2.2.3. Acidente na Refinaria *Texas City* (2005)

De acordo com o U.S. CHEMICAL SAFETY AND HAZARD INVESTIGATION BOARD (CSB, 2007), em 23 de março de 2005, a Refinaria de Texas City, localizada no Texas, Estados Unidos, experimentou uma das piores tragédias industriais da história americana (Figura 7). Uma explosão catastrófica ocorreu na unidade de isomerização da refinaria, causando 15 mortes e ferindo mais de 180 pessoas. A explosão foi desencadeada por uma série de eventos, incluindo um vazamento de hidrocarbonetos altamente inflamáveis que entraram em contato com uma fonte de ignição.

Figura 7 – Incêndio noturno na planta BP AMOCO em 2005



Fonte: Inspeção de Equipamento (2013)

A investigação subsequente revelou várias falhas sistêmicas e de segurança que contribuíram para o incidente. Ficou evidente que a administração da refinaria falhou em implementar medidas adequadas de segurança, incluindo treinamento insuficiente para os funcionários, manutenção inadequada dos equipamentos e falta de procedimentos de emergência eficazes (CSB, 2007). Além disso, a cultura de segurança na refinaria foi criticada por não priorizar a identificação e mitigação de riscos operacionais.

Após o incidente na Refinaria de Texas City, uma série de mudanças significativas foram implementadas na indústria de petróleo e gás dos Estados Unidos. As regulamentações foram reforçadas para exigir padrões mais rigorosos de segurança em todas as operações industriais, com foco especial nas refinarias. As empresas foram incentivadas a adotar uma abordagem proativa para identificar e mitigar riscos, e a promover uma cultura de segurança positiva entre os funcionários (CSB, 2007). Este trágico incidente serviu como um ponto de virada na conscientização sobre a importância da segurança industrial e da prevenção de acidentes na indústria de petróleo e gás.

2.2.4. Acidente da plataforma P-36 (2001)

O Acidente na plataforma P-36, em 2001, foi resultado de uma série de falhas estruturais e operacionais que levaram ao colapso da plataforma e resultaram em perdas humanas e materiais significativas (Figura 8). Segundo o relatório de investigação emitido pela Marinha do Brasil (Marinha do Brasil, 2001) O desastre teve início devido a uma falha no sistema de flutuação da plataforma, que levou à inclinação e subsequente afundamento da estrutura. Esta falha estrutural crítica foi resultado de deficiências na manutenção preventiva, pois não foram identificados e corrigidos problemas estruturais pré-existentes que poderiam ter evitado o colapso. Além disso, a falta de protocolos de segurança robustos e uma cultura organizacional que priorizava a produção sobre a segurança contribuíram para a gravidade do acidente.

Dotada de tecnologias avançadas para a época, a plataforma incorporava sistemas de controle automatizado, instrumentação de monitoramento de segurança e dispositivos de supressão de incêndio. Contudo, apesar da sofisticação tecnológica, a falta de procedimentos de segurança robustos e supervisão adequada evidenciaram uma vulnerabilidade significativa do sistema. Esse acidente destacou a necessidade urgente de priorizar a segurança operacional e implementar medidas eficazes de gestão de riscos para evitar incidentes semelhantes no futuro (ANP, 2001).

Figura 8 – Naufrágio da plataforma P-36



Fonte: Agência de notícias líder em petróleo, gás e energia no Brasil (2023)

As principais falhas que contribuíram para o acidente na plataforma P-36 estavam relacionadas à falta de manutenção adequada, supervisão deficiente e deficiências no projeto estrutural da plataforma (ANP, 2001). A ausência de procedimentos claros para identificação e correção de problemas estruturais pré-existentes foi uma das principais deficiências no sistema de segurança. Ademais, uma cultura organizacional que privilegiava a produção em detrimento da segurança perpetuou pressões para redução de custos e atalhos, comprometendo a integridade estrutural e operacional da plataforma.

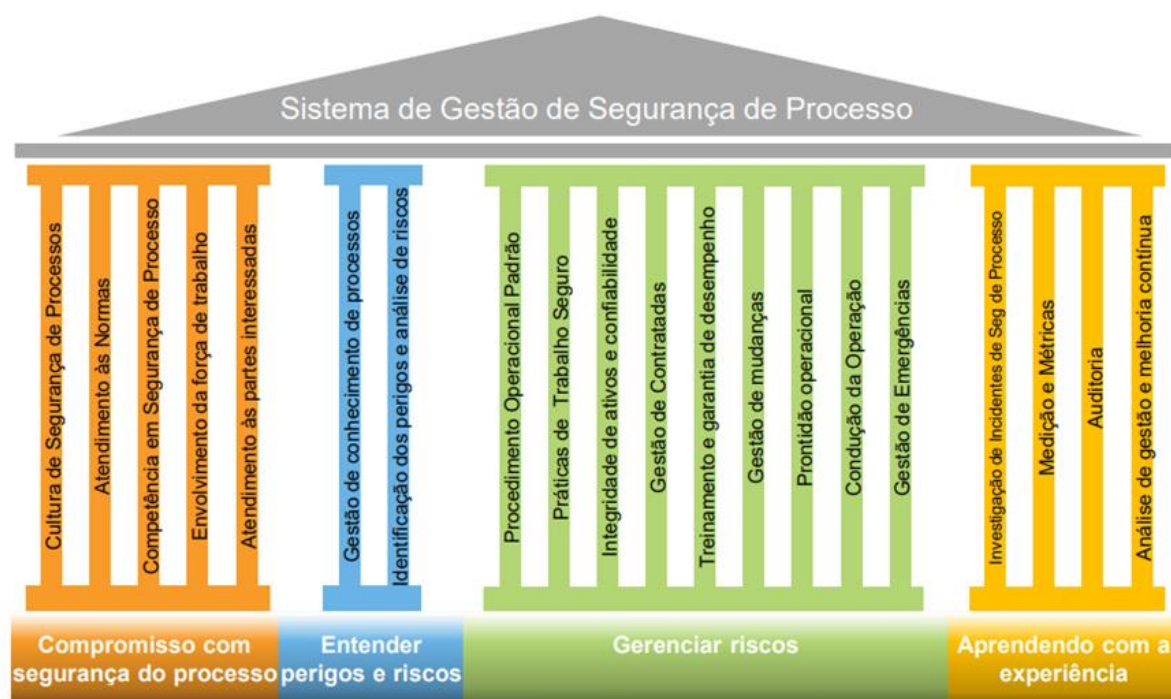
O colapso da plataforma P-36 resultou em perdas humanas e materiais significativas, evidenciando a importância crítica da segurança operacional na indústria petrolífera (ANP, 2001). Este acidente serve como um alerta para os perigos inerentes à operação de instalações *offshore* e ressalta a necessidade premente de implementar medidas robustas de segurança e protocolos eficazes de gestão de riscos para proteger vidas humanas, o meio ambiente e os ativos das empresas.

2.3. Os Pilares da Segurança de Processos

Os pilares da segurança de processos, conforme descritos no livro “Diretrizes para Elaborar Procedimentos para a Avaliação de Perigos” do *Center for Chemical Process*

Safety (CCPS, 2014), representam os princípios fundamentais que devem ser adotados para garantir a integridade e a segurança das operações industriais. Esses pilares (Figura 9) são essenciais para promover uma cultura de segurança robusta e eficaz dentro das organizações, especialmente naquelas que lidam com substâncias perigosas e processos complexos.

Figura 9 – Representação visual dos pilares da Segurança de Processos.



Fonte: ENGENHARIA DE PROCESSOS (2024)

O primeiro pilar da segurança de processos é o comprometimento com a segurança do processo, que envolve o compromisso da alta administração da empresa com a segurança como uma prioridade absoluta. Isso inclui a alocação de recursos adequados, a definição de metas claras de segurança e a comunicação eficaz dos objetivos e expectativas de segurança para todos os níveis da organização. O comprometimento da liderança é fundamental para promover uma cultura de segurança em que todos os funcionários se sintam responsáveis pela segurança no local de trabalho.

O segundo pilar é o envolvimento dos funcionários ao entender os perigos e riscos, que reconhece a importância de envolver os trabalhadores no processo de segurança. Isso inclui o incentivo à participação ativa dos funcionários na identificação e correção de problemas de segurança, a promoção de treinamentos e capacitações regulares em segurança e a criação de canais de comunicação abertos e transparentes para relatar preocupações e sugestões.

relacionadas à segurança. O envolvimento dos funcionários é essencial para criar um ambiente de trabalho onde todos se sintam valorizados e capacitados para contribuir para a segurança.

O terceiro pilar é a identificação e gerenciamento de riscos, que envolve a avaliação e mitigação de todos os riscos associados às operações industriais. Isso inclui a realização de análises de risco detalhadas, como a análise de perigos e operabilidade (HAZOP), a análise de árvore de falhas (FTA) e a árvore de eventos (ETA), para identificar possíveis cenários de acidentes e implementar medidas preventivas adequadas. O gerenciamento de riscos é fundamental para garantir que os processos sejam projetados, operados e mantidos de maneira segura.

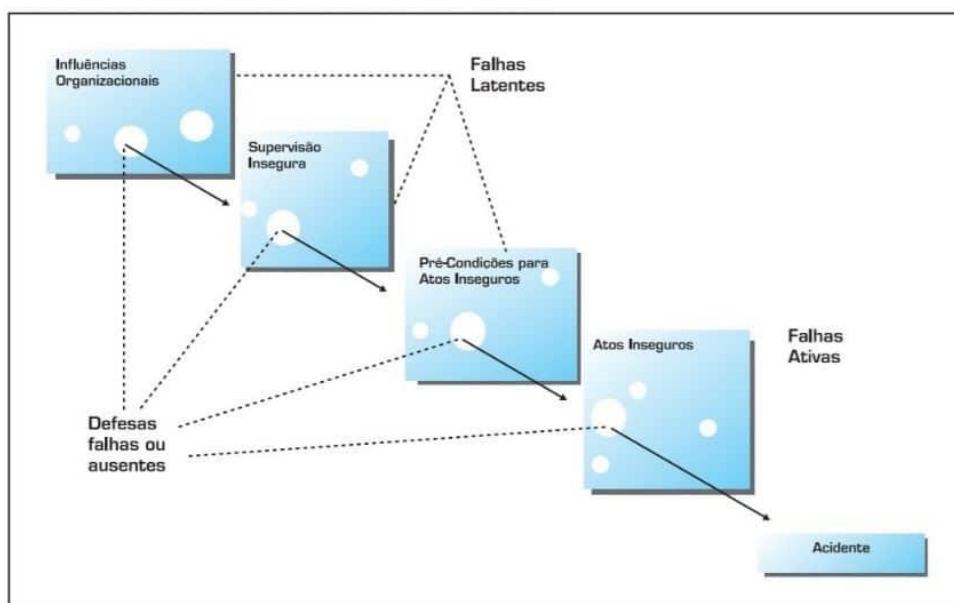
O quarto pilar é o aprendizado contínuo e a melhoria contínua, que reconhece a importância de aprender com os incidentes e erros passados para evitar sua repetição no futuro. Isso inclui a realização de investigações detalhadas de incidentes, a identificação de causas raízes e a implementação de medidas corretivas para prevenir a ocorrência de acidentes semelhantes. Além disso, envolve a promoção de uma cultura de aprendizado e inovação, onde os funcionários são encorajados a buscar constantemente maneiras de melhorar os processos e práticas de segurança.

Em resumo, os pilares da segurança de processos, conforme delineados pelo CCPS, representam os princípios fundamentais que devem ser adotados para garantir a integridade e a segurança das operações industriais. Esses pilares são essenciais para promover uma cultura de segurança robusta e eficaz dentro das organizações, protegendo os trabalhadores, o meio ambiente e os ativos da empresa. Ao seguir esses princípios e promover uma cultura de segurança sólida, as organizações podem prevenir acidentes graves e garantir a continuidade das operações de maneira segura e sustentável.

2.3.1. Barreiras Preventivas e Mitigadoras

De acordo com Crowl (2014), as barreiras preventivas e mitigadoras desempenham papéis cruciais na prevenção e no controle de acidentes industriais. Inspirado pelo modelo do "queijo suíço" proposto por James Reason (1990), Crowl (2014) destaca que, assim como os blocos de queijo com furos, os sistemas de segurança também têm falhas, representadas pelos buracos. As barreiras preventivas e mitigadoras são como as fatias de queijo (Figura 10), que buscam cobrir esses buracos e evitar que falhas e erros resultem em incidentes graves.

Figura 10 – Modelo do Queijo Suíço



Fonte: Adaptado de James Reason (1990)

As barreiras preventivas são implementadas proativamente para evitar que falhas no sistema se manifestem e causem acidentes na indústria química. Estas medidas incluem procedimentos operacionais seguros, treinamento adequado dos funcionários, manutenção preventiva dos equipamentos e sistemas de monitoramento contínuo para detectar precocemente potenciais problemas (Crowl, 2014). Por exemplo, um procedimento operacional seguro pode exigir a verificação regular de válvulas para garantir que estejam funcionando corretamente e evitem vazamentos. Além disso, os Sistemas Instrumentados de Segurança (SIS) são empregados para detectar desvios perigosos nas condições de processo e tomar ações corretivas automáticas para evitar a ocorrência de acidentes. As Pressure Safety Valve (PSV) são instaladas para aliviar a pressão excessiva em um equipamento ou sistema, protegendo contrarrupturas catastróficas. Por fim, os Sistemas de Controle são responsáveis por regular e monitorar as variáveis de processo para garantir que operem dentro de limites seguros, contribuindo assim para a prevenção de incidentes.

Por outro lado, as barreiras mitigadoras são aquelas que entram em ação após uma falha no sistema ter sido identificada, com o objetivo de minimizar suas consequências. Isso pode incluir a instalação de sistemas de controle de incêndio para conter e extinguir um incêndio em andamento, o uso de equipamentos de proteção individual para proteger os trabalhadores em situações de risco e a implementação de planos de emergência para evacuação rápida e segura. Em um cenário de vazamento de produtos químicos, por exemplo, as barreiras mitigadoras

podem incluir o uso de sistemas de contenção e neutralização para evitar a propagação do produto e minimizar danos ao meio ambiente (Crowl, 2014).

Portanto, tanto as barreiras preventivas quanto as mitigadoras são essenciais para garantir a segurança em ambientes industriais (Crowl, 2014). Elas trabalham em conjunto para cobrir as lacunas no sistema de segurança e proteger os trabalhadores, o meio ambiente e os ativos da empresa. Ao adotar uma abordagem baseada no modelo do queijo suíço, as empresas podem identificar onde as falhas podem ocorrer e implementar as medidas adequadas para evitar acidentes ou minimizar seus impactos quando ocorrem.

2.3.2. Integridade e Confiabilidade dos Equipamentos

A integridade e confiabilidade dos equipamentos são aspectos fundamentais na indústria, visando garantir a segurança operacional, a eficiência dos processos e a proteção dos ativos. A integridade do equipamento refere-se à sua capacidade de desempenhar suas funções conforme projetado, mantendo-se livre de falhas ou degradação ao longo do tempo (Teles, 2019). Isso envolve a prevenção de danos, falhas e mau funcionamento por meio de práticas de manutenção adequadas, inspeções regulares e gestão eficaz dos riscos associados ao equipamento.

A confiabilidade do equipamento está relacionada à sua capacidade de operar de maneira consistente e previsível, atendendo às necessidades operacionais da planta de forma confiável e eficiente. Isso inclui a minimização de paradas não programadas, a maximização do tempo de atividade e a redução do risco de falhas inesperadas que possam impactar a produção e a segurança (Teles, 2019). A confiabilidade é alcançada por meio de estratégias de manutenção preventiva, monitoramento da condição do equipamento e análise de falhas para identificar e mitigar potenciais pontos fracos.

Para garantir a integridade e confiabilidade dos equipamentos, é essencial adotar uma abordagem sistemática e proativa, como a Metodologia de *Reliability-centered Maintenance* (Teles, 2019). A RCM enfatiza a identificação dos modos de falha potenciais, a avaliação dos impactos dessas falhas na segurança e na operação, e o desenvolvimento de estratégias de manutenção adequadas para mitigar esses riscos. Ao implementar princípios RCM, as empresas podem otimizar suas atividades de manutenção, melhorar a confiabilidade dos equipamentos e garantir a segurança e eficiência das operações industriais.

2.4. ANÁLISE DE RISCO

A análise de riscos, conforme apresentada por Crawl (2014), é um processo sistemático utilizado para identificar, avaliar e controlar os riscos associados a processos químicos. Essa análise é essencial para garantir a segurança operacional, proteger os trabalhadores e o meio ambiente, e minimizar as consequências de potenciais acidentes.

A análise de riscos pode ser dividida em duas categorias principais: qualitativa e quantitativa. A análise qualitativa de riscos é utilizada para identificar e descrever os perigos e avaliar os riscos de forma descritiva, sem o uso de dados numéricos extensivos. Métodos como a Análise Preliminar de Perigos (PHA), a Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA) e a Análise de Perigos e Operabilidade (HAZOP) são exemplos comuns de abordagens qualitativas. Por exemplo, em uma análise HAZOP, uma equipe multidisciplinar revisa sistematicamente os processos para identificar possíveis desvios operacionais e suas consequências, propondo medidas mitigadoras para reduzir os riscos identificados.

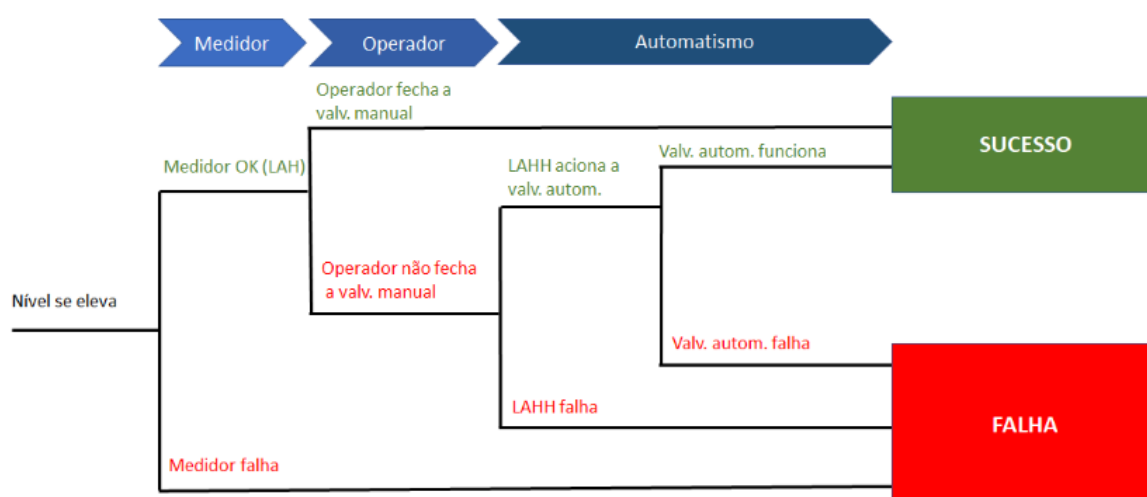
Por outro lado, a análise quantitativa de riscos utiliza dados numéricos e modelos matemáticos para estimar a probabilidade e a severidade dos eventos perigosos. Essa abordagem é mais detalhada e permite uma avaliação precisa dos riscos. Métodos como a Análise de Árvores de Falhas (FTA) e a Análise de Consequências são exemplos de técnicas quantitativas. Um exemplo de análise quantitativa é a FTA, onde se constrói uma árvore lógica que representa as combinações de falhas que podem levar a um evento indesejado. A probabilidade de cada falha é então quantificada para calcular a probabilidade total do evento final, permitindo uma avaliação detalhada do risco e a identificação de pontos críticos que requerem atenção.

Tanto a análise qualitativa quanto a quantitativa têm suas próprias vantagens e são frequentemente usadas de forma complementar. A análise qualitativa é valiosa para uma compreensão inicial e ampla dos riscos, enquanto a análise quantitativa fornece uma avaliação mais precisa e detalhada. A combinação dessas abordagens permite uma gestão de riscos mais robusta e eficaz, garantindo que os perigos sejam identificados e controlados de maneira adequada, conforme destacado por Crawl (2014). A aplicação dessas técnicas é essencial para a segurança dos processos químicos, proporcionando uma base sólida para a tomada de decisões e a implementação de medidas preventivas e corretivas.

2.4.1. Árvore de eventos.

A metodologia da Árvore de Eventos (ETA), segundo Howard Lambert (2019), é uma técnica indutiva utilizada para analisar eventos iniciadores e seus possíveis desdobramentos. Esta abordagem parte de um evento inicial e explora os resultados decorrentes desse evento, representando cada possível desfecho em um ramo da árvore, que se divide entre falha e não falha. Em cada passo da análise, é feita a pergunta "o que ocorre se?", permitindo identificar as diferentes possibilidades de desfecho de um evento como no exemplo fornecido na Figura 11.

Figura 11 – Exemplo de Árvore de Eventos



Fonte: Guia para Análise de Causa Básica: Árvore de Eventos (2021)

A ETA pode ser aplicada tanto para análises qualitativas quanto quantitativas. Ao conhecer a probabilidade de ocorrência de cada estado assumido em cada etapa da árvore é possível calcular a probabilidade de ocorrência de um resultado. Essa flexibilidade permite uma avaliação abrangente dos cenários possíveis, contribuindo para uma melhor compreensão dos riscos e dos potenciais consequências de um evento.

Para ilustrar a aplicação dessa técnica, considere-se um tanque de armazenamento com um único medidor de nível associado a alarmes de nível alto (LAH) e muito alto (LAHH). A árvore de eventos simplificada revela os caminhos que levam ao sucesso ou à falha, como o transbordamento do tanque. A simplicidade da ETA permite identificar facilmente que a falha do medidor de nível é suficiente para causar o transbordamento, mesmo com outras

salvaguardas no sistema. Essa característica permite uma análise clara e direta dos potenciais causas de um evento (Figura 11).

Apesar de sua simplicidade e capacidade de incluir a cronologia na análise, a ETA apresenta limitações e não é adequada para representar falhas em sistemas mais complexos. Essa abordagem pode não capturar adequadamente a interação de múltiplos eventos ou a ocorrência de falhas simultâneas em diferentes partes do sistema. Portanto, é importante complementar a análise com outras técnicas para uma avaliação mais abrangente da integridade e confiabilidade do sistema.

Esta metodologia também é amplamente empregada na investigação de acidentes de processo devido à sua capacidade de representar de forma sistemática e detalhada as sequências de eventos que levaram ao incidente. Inicialmente, os eventos são identificados e organizados em uma hierarquia lógica, começando pelo evento iniciador, por exemplo a perda de contenção de um composto tóxico, e retrocedendo até as causas raízes. Cada barreira mitigadora que impedira o evento acidente de acontecer é representado como um nó na árvore, conectado por relações de causa e efeito. Durante a investigação, são exploradas diferentes possibilidades de encadeamento de eventos, examinando-se as falhas nos sistemas, procedimentos, equipamentos ou comportamentos humanos que contribuíram para o acidente. Essa abordagem facilita a identificação de falhas de projeto, lacunas nos processos de segurança e áreas de melhoria que podem ser implementadas para prevenir futuros incidentes. Além disso, a análise da árvore de eventos permite uma compreensão abrangente das interações complexas entre os elementos do sistema, fornecendo insights valiosos para aprimorar a segurança operacional.

3. CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

3.1. ANÁLISE DOS ACIDENTES

Os acidentes selecionados para serem analisados foram escolhidos com base na disponibilidade dos relatórios fornecidos pela ANP. O primeiro acidente ocorreu na FPSO Cidade de São Mateus e envolveu uma explosão que resultou em várias vítimas, algumas com ferimentos graves, e causou danos significativos à instalação. A investigação apontou falhas na elaboração de procedimentos operacionais e na definição de cenários acidentais, além de uma baixa disciplina operacional. O segundo acidente, ocorrido na plataforma P-48 em 2016, foi caracterizado por um incêndio significativo, resultado de diversas falhas operacionais, de

projeto e de gerenciamento. As causas incluíram a falta de gerenciamento de mudanças e falhas no monitoramento de trabalho a quente. Por fim, o terceiro acidente, na Sonda Marítima Norbe VIII, envolveu a explosão da caldeira auxiliar nº 1 durante o processo de aquecimento, resultando em danos significativos e riscos à segurança da tripulação. Esses eventos foram escolhidos pela sua severidade e impacto humano, econômico e ambiental, permitindo uma análise abrangente e a identificação de padrões e falhas comuns nas operações *offshore*.

Com os acidentes selecionados, será feita uma análise das causas raízes identificadas em cada um dos relatórios selecionados. Após ter sido realizada a análise de cada uma das causas as principais causas serão apontadas que auxiliou na próxima etapa, que foi a identificação da sequência de eventos que levou a cada um desses incidentes. Por fim, com a sequência de cada um desses incidentes identificada, foi elaborada uma árvore de eventos para cada um desses acidentes.

O método da árvore de eventos foi aplicado em cada um desses acidentes para analisar e compreender suas causas subjacentes. Cada ramificação da árvore representa uma possibilidade, seja de falha ou de sucesso na prevenção do acidente. É bom ressaltar que mesmo que a metodologia da árvore de eventos seja utilizada para analisar a probabilidade de sucesso e de falha de

3.2. ÁRVORES DE EVENTOS

Para aplicar o método da árvore de eventos, serão analisados os eventos que levaram à explosão, incêndio ou vazamento de óleo, identificando os diferentes estágios que levaram a esses incidentes. Por exemplo, na análise do acidente de explosão, podemos considerar os sistemas de segurança que falharam, os procedimentos operacionais que foram violados e os fatores humanos envolvidos. Da mesma forma, no caso do incêndio, são examinadas as medidas de prevenção de incêndio implementadas, a eficácia dos sistemas de detecção e supressão de incêndio, e qualquer falha nos protocolos de resposta a emergências. Essa abordagem sistemática nos permite entender melhor as causas subjacentes de cada acidente e desenvolver medidas preventivas para evitar recorrências no futuro.

As árvores de eventos foram montadas utilizando o Excel, onde eventos iniciadores foram ocorrências que impactaram a integridade, a segurança e a operação durante o funcionamento da planta de processo. Esses eventos podem ser definidos em três categorias:

- Quase acidentes (Near Misses): São eventos que poderiam ter resultado em um acidente, mas que, por alguma razão, não causaram danos. Esses eventos são importantes porque fornecem oportunidades para identificar e corrigir falhas antes que ocorram acidentes graves.
- Incidentes: São eventos que resultam em danos menores ou interrupções na operação, mas não causam ferimentos graves ou fatalidades. Incidentes podem incluir vazamentos de substâncias químicas, pequenas explosões ou falhas de equipamentos que não resultam em consequências catastróficas.
- Acidentes: São eventos que resultam em danos significativos, incluindo ferimentos graves, fatalidades, danos materiais extensos e interrupções consideráveis na operação. Acidentes graves em segurança de processos podem incluir explosões, grandes incêndios, vazamentos tóxicos e colapsos estruturais.

Em seguida, forma definidos eventos de barreira, que se referem a situações ou ocorrências que testam a eficácia das barreiras de segurança implementadas para prevenir acidentes ou mitigar suas consequências. Onde na árvore de eventos eles serão divididos em duas categorias:

- Sucesso na ativação da barreira: Quando uma barreira de segurança funciona conforme o esperado, evitando que um evento perigoso progrida para um incidente ou mitigando seus efeitos. Por exemplo, um sistema de alarme de gás que detecta um vazamento e aciona uma resposta de emergência a tempo de evitar um incêndio.
- Falha de Barreiras: Quando uma barreira de segurança falha em prevenir ou mitigar um evento perigoso. Isso pode ocorrer devido a problemas de manutenção, erros humanos, falhas de design ou outros fatores. Por exemplo, uma válvula de alívio de pressão que não se abre conforme projetado, resultando em uma explosão.

Por fim é bom ressaltar que as arvores de eventos elaboradas neste trabalho estão voltadas para os danos causados com o sucesso ou a falha desses eventos barreiras, diferentemente da metodologia padrão onde é avaliado as possíveis consequências de um evento iniciador e a eficácia das barreiras de segurança em cada etapa subsequente. Segundo o CCPS (2014), essa metodologia ajuda a identificar e quantificar diferentes cenários de acidentes que podem ocorrer a partir de um evento iniciador, considerando as respostas das barreiras de segurança ao longo do processo.

4. CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ANÁLISE DE CAUSAS RAÍZES

4.1.1. Incidente da Plataforma P-48

Segundo o relatório emitido pela Superintendência de Segurança Operacional e Meio Ambiente (Relatório da ANP, 2018) O acidente na plataforma P-48 foi um incêndio que ocorreu em 17 de março de 2016. O evento foi desencadeado por uma série de falhas e desvios em relação às práticas de segurança operacional preconizadas. A investigação do acidente identificou diversas causas raiz que contribuíram para a ocorrência do incêndio.

Uma das principais causas identificadas foi a perda de contenção de um fluido inflamável, que resultou em um vazamento significativo. Essa perda de contenção foi atribuída a fatores como a indisponibilidade do vaso de slop B, que comprometeu a capacidade de contenção de líquidos inflamáveis na plataforma. Além disso, a menor capacidade de bombeio devido à operação com apenas um vaso de slop em funcionamento contribuiu para a propagação do incêndio.

Outro fator crucial foi a presença de uma fonte de ignição, que desencadeou o incêndio. A falha de monitoramento em atividades envolvendo trabalho a quente foi apontada como uma das causas, indicando uma lacuna na supervisão de práticas operacionais críticas. Além disso, a investigação destacou a inexistência de um efetivo gerenciamento de mudanças na plataforma, o que permitiu a introdução de modificações operacionais sem a devida análise de riscos e impactos. Isso evidenciou a importância de seguir os critérios de projeto estabelecidos para garantir a segurança das operações.

Principais fatores contribuintes identificados:

1. Gerenciamento de mudanças inexistente: A ausência de um efetivo sistema de gerenciamento de mudanças resultou em falhas na avaliação e controle de modificações operacionais, permitindo a introdução de alterações sem a devida análise de riscos e impactos, o que contribuiu para a ocorrência do acidente.
2. Não atendimento a critérios de projeto: A não conformidade com os critérios de projeto estabelecidos para a plataforma P-48 resultou em operações inadequadas e em desacordo com padrões de segurança, evidenciando a importância de seguir as diretrizes de projeto para garantir a integridade operacional e a segurança das instalações.

3. Procedimento operacional não utilizado: A não execução de procedimentos operacionais adequados, como a manobra não usual de direcionamento de fluxo de líquidos, demonstrou uma falha na adesão a protocolos de segurança estabelecidos, ressaltando a importância da conformidade com os procedimentos operacionais para prevenir incidentes.
4. Falha de monitoramento em trabalho a quente: A falta de monitoramento eficaz em atividades envolvendo trabalho a quente resultou em riscos de ignição e propagação do incêndio, indicando uma lacuna na supervisão de práticas operacionais críticas, o que destaca a necessidade de vigilância constante em atividades potencialmente perigosas.
5. Indisponibilidade do vaso de Slop B: A indisponibilidade do segundo vaso de Slop comprometeu a capacidade de contenção de líquidos inflamáveis, evidenciando a importância da operacionalidade de todos os equipamentos de segurança para prevenir acidentes, ressaltando a importância da manutenção preventiva e da disponibilidade de redundâncias em sistemas críticos.
6. Menor capacidade de bombeio: A capacidade reduzida de bombeio devido à operação com apenas um vaso de slop em funcionamento contribuiu para a propagação do incêndio, destacando a importância de manter a capacidade operacional total dos sistemas de contenção para lidar eficazmente com emergências.

4.1.2. Incidente da Sonda Marítima NORBE VIII (NS-32)

De acordo com o Relatório de Investigação da Sonda Marítima Norbe VIII (Relatório da ANP, 2018) envolveu a explosão da caldeira auxiliar nº 1 durante o processo de aquecimento. A explosão ocorreu às 07h38 do dia 09/06/2017. A caldeira auxiliar nº 1 estava em processo de aquecimento quando ocorreu a explosão, resultando em danos significativos e colocando em risco a segurança da tripulação e a integridade da embarcação.

A cronologia dos eventos relacionados à explosão da caldeira auxiliar nº 1 foi detalhada na Tabela 3 do relatório, fornecendo uma visão geral dos acontecimentos que levaram ao acidente. A investigação identificou que a explosão foi causada por uma série de fatores, incluindo possíveis falhas nos sistemas de controle e proteção da caldeira, bem como desvios nas práticas de gestão do operador. Após a explosão, a equipe de investigação realizou uma análise detalhada dos sistemas de controle e proteção das caldeiras para identificar possíveis falhas e áreas de melhoria. Recomendações foram feitas para fortalecer o sistema de gestão do

operador e garantir que práticas robustas fossem implementadas para prevenir acidentes semelhantes no futuro.

Principais fatores contribuintes identificados:

1. Falha do sistema de controle de pressão: O relatório identificou que houve uma falha no sistema de controle de pressão da caldeira auxiliar nº 1. Essa falha resultou em uma pressão excessiva no interior da caldeira durante o processo de aquecimento, levando à explosão.
2. Falha das Válvulas de Segurança de Pressão (PSVs): Além da falha no sistema de controle de pressão, as PSVs também falharam em aliviar a pressão excessiva dentro da caldeira. Essas válvulas são projetadas para abrir e liberar pressão em emergências, mas sua falha contribuiu para o acúmulo de pressão e, conseqüentemente, para a explosão.
3. Falha na identificação de cenário de explosão nas caldeiras na Análise de Risco: O relatório apontou que houve uma falha na identificação do cenário de explosão durante a Análise de Risco realizada. Essa falha na avaliação de riscos pode ter contribuído para a falta de medidas preventivas adequadas para evitar a explosão da caldeira.

4.1.3. Incidente de Explosão Ocorrido no FPSO Cidade de São Mateus

O acidente descrito no relatório (Relatório da ANP, 2016), envolveu uma explosão na unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência de petróleo (FPSO) Cidade de São Mateus, especificamente na casa de bombas localizada no convés principal. A sequência de eventos que levou ao acidente começou com um vazamento de gás na casa de bombas, detectado por sensores fixos instalados no local, criando uma atmosfera explosiva.

Em resposta ao vazamento, uma equipe técnica foi formada para dar suporte à equipe de resposta à emergência, porém, essa equipe não estava prevista no Plano de Respostas à Emergência e não possuía atribuições claras. A falta de instruções claras e definição de cenários acidentais no plano resultou na exposição das pessoas a bordo a situações de perigo, sem a capacidade de adotar soluções adequadas para mitigar a situação de atmosfera explosiva.

A explosão ocorreu devido à presença da atmosfera explosiva na casa de bombas, confirmada pela medição do detector portátil que indicou 100% do Limite Inferior de Explosividade (LIE). Como resultado, várias pessoas próximas à casa de bombas ficaram feridas, algumas gravemente, e duas pessoas da equipe da enfermaria foram gravemente feridas

quando o elevador em que estavam foi lançado ao último piso superior do casario devido à explosão, onde um deles veio a falecer.

Principais fatores contribuintes identificados:

1. Falha na Avaliação do Cenário de Risco e Resposta à Emergência: Houve uma falha na avaliação do cenário de risco e na definição de cenários acidentais no Plano de Respostas a Emergência da unidade. Isso resultou na ausência de instruções claras e na falta de identificação prévia dos recursos necessários para lidar com o cenário de atmosfera explosiva que ocorreu. Como consequência, a tripulação a bordo não pôde adotar soluções adequadas para mitigar a situação, levando à exposição das pessoas a bordo a situações de perigo.
2. Procedimentos de emergência ineficientes: A exposição das pessoas a bordo, incluindo equipes de brigada e outras funções de resposta à emergência, resultou em grande parte das vítimas do acidente. Isso ocorreu devido à falta de procedimentos operacionais claros e específicos para a execução segura das atividades durante a resposta à emergência. A ausência de documentação e controle adequados dos procedimentos operacionais contrariou as diretrizes estabelecidas no Sistema de Gestão de Segurança Operacional (SGSO), contribuindo para a exposição das pessoas a riscos.
3. Cenários Acidentais não Contemplados no Plano de Respostas à Emergência: Os cenários acidentais identificados nos Estudos de Risco da unidade não foram contemplados no Plano de Respostas à Emergência da operadora da instalação. Isso configurou uma falha na identificação de cenários acidentais e na preparação para lidar com essas situações. A falta de cobertura adequada no plano de emergência, incluindo o vazamento de hidrocarboneto resultando em fogo/explosão, contribuiu para a falta de preparo da equipe diante do cenário de atmosfera explosiva que levou à ocorrência do acidente.

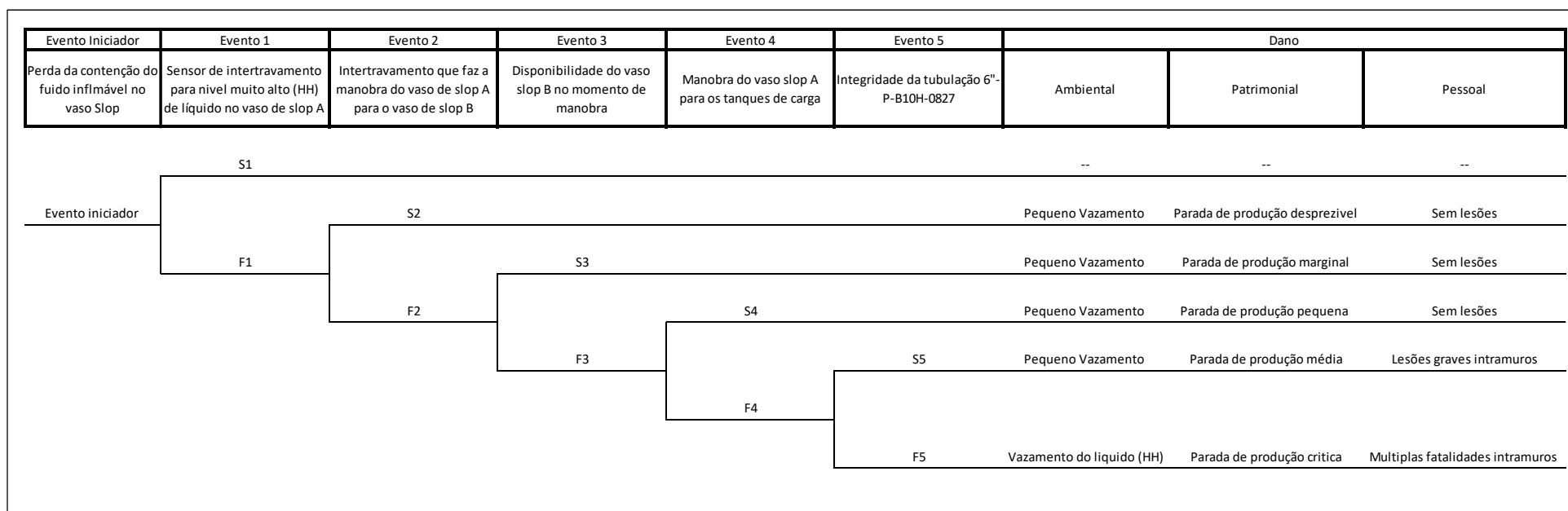
4.2. ANÁLISE DAS ÁRVORES DE EVENTOS

4.2.1. Análise do acidente da plataforma de P-48

O evento inicial que desencadeia toda a análise é a perda da contenção do fluido inflamável no vaso Slop A. Este evento representa uma falha grave no sistema de contenção primário da plataforma, onde o fluido inflamável, normalmente confinado de maneira segura, escapa do vaso. Esta situação crítica pode ocorrer devido a uma variedade de razões, como uma ruptura física no vaso, falhas na vedação ou erros operacionais que resultam em uma alta pressão interna.

A árvore de eventos (ETA) para o acidente da plataforma P-48 está apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Árvore de eventos do acidente da Plataforma P-48



A perda de contenção é um evento de alta criticidade porque coloca imediatamente o fluido inflamável em contato com o ambiente da plataforma, criando um risco significativo de incêndio ou explosão. Este risco é exacerbado pela natureza do fluido inflamável, que pode se vaporizar rapidamente e formar misturas explosivas com o ar. Além disso, a presença de outros equipamentos e operações na plataforma pode fornecer fontes de ignição potenciais, como motores, equipamentos elétricos ou mesmo faíscas resultantes de atividades de manutenção.

- Evento 1: O sensor de intertravamento para nível muito alto (HH) de líquido no vaso de Slop A deve detectar níveis perigosos de fluido e acionar medidas de contenção. Se este sensor falhar (S1), não haverá ativação do intertravamento, deixando o sistema vulnerável a transbordamentos sem resposta imediata. Esta falha inicial é crucial pois afeta diretamente a capacidade de resposta automatizada do sistema.
- Evento 2: O intertravamento que transfere fluido do vaso Slop A para o vaso Slop B é a próxima linha de defesa. Se funcionar corretamente (S2), mesmo que haja um pequeno vazamento, o impacto será mínimo, resultando em uma parada de produção desprezível e sem lesões. Este dano foi escolhido pois o funcionamento do intertravamento atenua significativamente os riscos.
- Evento 3: A disponibilidade do vaso Slop B para receber o fluido durante a manobra é fundamental. Se o vaso B não estiver disponível (S5), a falta de um local seguro para o fluido pode levar a um pequeno vazamento que, embora cause uma parada de produção média, pode resultar em lesões graves intramuros devido à exposição ao fluido inflamável. A gravidade das lesões intramuros se deve ao contato direto com o fluido perigoso.
- Evento 4: A manobra do vaso Slop A para os tanques de carga deve ser executada corretamente. Se houver falha nesta manobra (F4), um grande vazamento do líquido (HH) ocorrerá, levando a uma parada de produção crítica e múltiplas fatalidades intramuros. Este cenário reflete o pior caso, onde a falha completa do sistema de manobra expõe trabalhadores a riscos fatais.
- Evento 5: A integridade da tubulação 6"-P-B10H-0827 é essencial para evitar vazamentos durante a transferência de fluido. Uma falha na integridade da tubulação (F5) causaria um grande vazamento do líquido, resultando em uma parada de produção crítica e múltiplas fatalidades intramuros. A tubulação é uma última linha de defesa; sua falha implica uma liberação incontrolável de fluido perigoso.

4.2.1.1. Danos Ambientais

Os danos ambientais são considerados em várias ramificações da árvore de eventos. Nos eventos S2, S3, S4 e S5, pequenos vazamentos são identificados. Esses vazamentos são classificados como de impacto ambiental relativamente baixo devido ao volume limitado de fluido liberado e à possibilidade de contenção rápida. O pequeno volume de vazamento não tem potencial para causar grande contaminação ambiental, especialmente se contido rapidamente por medidas de emergência da plataforma, como barreiras de contenção e sistemas de recuperação.

4.2.1.2. Danos Patrimoniais

As paradas de produção variam em gravidade, refletindo os diferentes níveis de impacto financeiro e operacional. Esses danos foram escolhidos com base na extensão e duração da interrupção das operações:

- Parada de produção desprezível (S2): Um pequeno vazamento que não afeta significativamente as operações, permitindo que a produção continue com mínima interrupção. Este cenário representa um custo financeiro menor e facilmente absorvível pela operação normal.
- Parada de produção marginal (S3): Um vazamento que causa uma interrupção leve, exigindo reparos simples e curtos. O impacto financeiro é moderado, pois a produção pode ser retomada rapidamente após a contenção do vazamento.
- Parada de produção pequena (S4): Aqui, o vazamento exige uma parada mais prolongada, mas ainda não crítica. O tempo de reparo é maior, resultando em uma perda financeira mais significativa, mas ainda manejável.
- Parada de produção média (S5): Um vazamento maior que necessita de um tempo de reparo substancial, afetando consideravelmente a produção e resultando em perdas financeiras mais altas. Este cenário representa um impacto financeiro e operacional considerável, requerendo uma resposta mais robusta.
- Parada de produção crítica (F5): Um grande vazamento que interrompe completamente as operações por um período prolongado. Este cenário resulta em uma perda financeira significativa devido à paralisação total das operações e aos custos elevados de reparo e recuperação. A escolha desse dano reflete o impacto severo que tal evento pode ter na viabilidade financeira da operação da plataforma.

4.2.1.3. Danos Pessoais

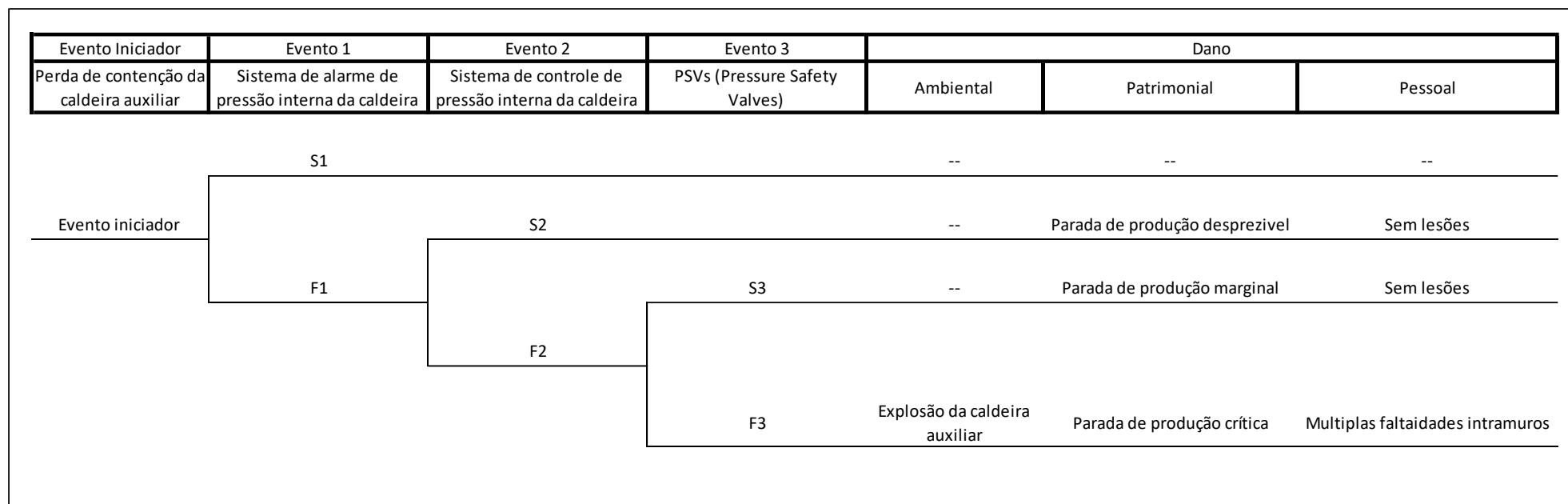
Os danos pessoais são categorizados com base na gravidade das lesões que poderiam resultar do incidente. Estes danos são escolhidos para refletir a gravidade crescente dos riscos à medida que a resposta ao evento falha em várias etapas:

- Sem lesões (S2, S3, S4): Pequenos vazamentos não resultam em lesões devido à rápida contenção e à pequena quantidade de fluido envolvido. Este cenário assume que o pessoal está protegido e que as medidas de emergência são eficazes na mitigação imediata do risco.
- Lesões graves intramuros (S5): A indisponibilidade do vaso B resulta em uma exposição mais significativa ao fluido inflamável, levando a um risco aumentado de lesões graves para o pessoal da plataforma. Este dano é selecionado para ilustrar as consequências de uma resposta inadequada onde o pessoal está diretamente exposto ao fluido perigoso.
- Múltiplas fatalidades intramuros (F5): A falha completa da manobra do vaso A para os tanques de carga, resultando em um grande vazamento, representa o pior cenário. Este cenário foi escolhido para destacar a gravidade máxima de um incidente onde o fluido inflamável, em grande quantidade, causa múltiplas fatalidades devido à explosão ou incêndio, resultando em um impacto humano crítico.

4.2.2. Análise do acidente da Sonda Norbe VIII

A perda de contenção da caldeira auxiliar na sonda Norbe VIII representa uma falha crítica no sistema de contenção da caldeira, onde a pressão interna e os fluidos quentes escapam de maneira descontrolada. Este evento pode ser causado por diversos fatores, incluindo desgaste material, corrosão, falhas nos sistemas de vedação ou mesmo erros operacionais que resultam em pressão excessiva. A caldeira auxiliar, sendo um componente vital para a operação da sonda, contém fluidos em alta pressão e temperatura, necessários para diversas funções operacionais. Quando esta contenção é perdida, os fluidos podem liberar energia de forma rápida e descontrolada, criando um ambiente altamente perigoso para os trabalhadores e a estrutura da sonda. A árvore de eventos da Sonda Norbe VIII esta apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Árvore de eventos do acidente da Sonda Norbe VIII



A importância deste evento se dá pela sua capacidade de desencadear uma série de falhas subsequentes, que podem resultar em danos catastróficos se não forem prontamente mitigados. A liberação descontrolada de pressão e fluidos quentes pode comprometer a integridade estrutural da caldeira e de outros equipamentos próximos, além de representar um risco imediato de explosão ou incêndio. A pressão elevada e a temperatura dos fluidos aumentam significativamente o perigo, tornando a rápida resposta dos sistemas de alarme e controle de pressão essenciais para evitar a escalada do incidente. A falta de contenção adequada leva a consequências graves, incluindo paradas de produção, danos patrimoniais significativos e, no pior cenário, múltiplas fatalidades entre os trabalhadores a bordo da sonda.

4.2.2.1. Danos Ambientais

Os danos ambientais não foram considerados diretamente nos ramos da árvore de eventos apresenta, refletindo uma suposição de que a perda de contenção da caldeira auxiliar, embora crítica, não resulta em um impacto ambiental imediato. Isso pode ser devido à natureza confinada da caldeira e ao fato de que os fluidos envolvidos são mantidos dentro de sistemas fechados. Assim, mesmo em casos de falha, como nas situações S1, S2, S3 e F2, não há vazamento de substâncias que causem contaminação ambiental significativa.

4.2.2.2. Danos Patrimoniais

As paradas de produção variam em gravidade, refletindo os diferentes níveis de impacto financeiro e operacional. Esses danos foram escolhidos com base na extensão e duração da interrupção das operações:

- Parada de produção desprezível (S2): Neste cenário, o sistema de controle de pressão interna da caldeira funciona adequadamente, evitando maiores problemas. O impacto financeiro é mínimo, pois a produção pode continuar com pouca interrupção. Este cenário foi escolhido porque, apesar do incidente inicial, as medidas de contenção são eficazes.
- Parada de produção marginal (S3): Aqui, o sistema de alarme de pressão interna da caldeira falha, mas o controle de pressão ainda evita um desastre maior. O vazamento é leve e causa uma interrupção leve, exigindo reparos rápidos. Este cenário representa um impacto financeiro moderado devido à necessidade de reparos imediatos.

- Parada de produção crítica (F3): A explosão da caldeira auxiliar resulta em uma interrupção total das operações. Este cenário foi escolhido para refletir o pior caso, onde a falha completa dos sistemas de segurança leva a uma perda financeira significativa devido à necessidade de reparos extensivos e recuperação operacional.

4.2.2.3. Danos Pessoais

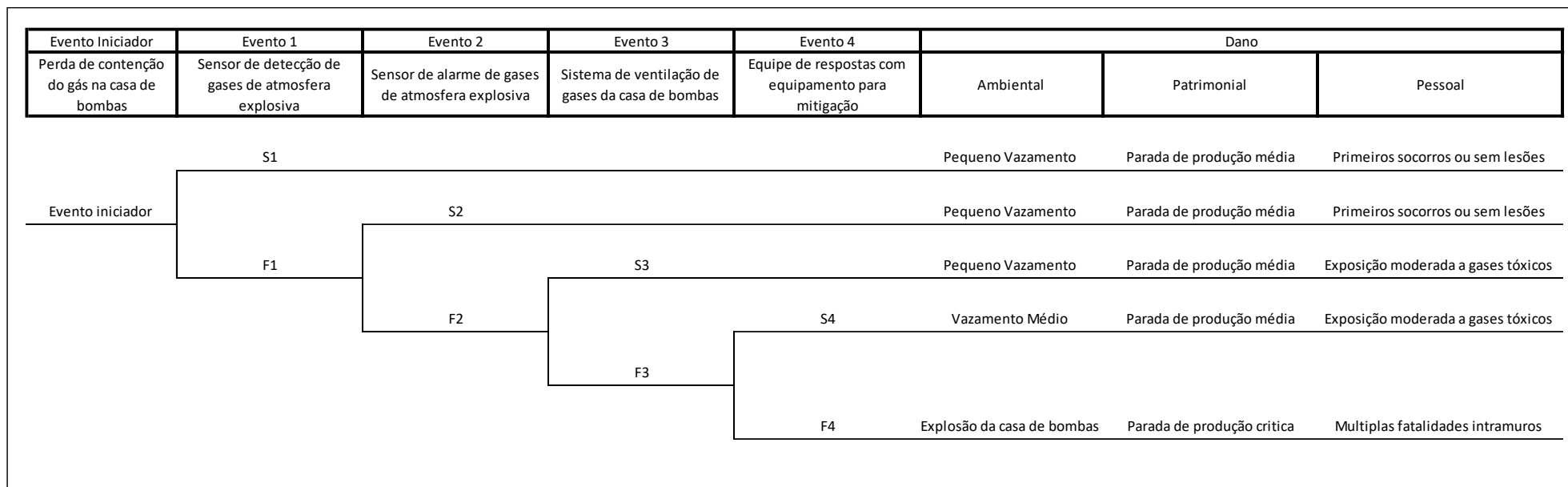
Os danos pessoais são categorizados com base na gravidade das lesões que poderiam resultar do incidente. Estes danos são escolhidos para refletir a gravidade crescente dos riscos à medida que a resposta ao evento falha em várias etapas:

- Sem lesões (S2, S3): Pequenos vazamentos, que ocorrem quando os sistemas de alarme e controle falham parcialmente, não resultam em lesões devido à rápida contenção e à pequena quantidade de fluido envolvido. Este cenário assume que o pessoal está protegido e que as medidas de emergência são eficazes na mitigação imediata do risco.
- Múltiplas fatalidades intramuros (F3): A explosão da caldeira auxiliar representa o pior cenário possível, com falha total dos sistemas de segurança. A explosão causa múltiplas fatalidades devido à liberação massiva de energia e fluido quente, levando a um impacto humano crítico. Este cenário foi escolhido para destacar a gravidade máxima de um incidente onde a falha completa do sistema de contenção resulta em um evento catastrófico para os trabalhadores a bordo da sonda.

4.2.3. Análise do acidente do FPSO Cidade de São Mateus

O evento iniciador do acidente no FPSO Cidade São Mateus foi uma explosão resultante da liberação de gás em uma área confinada da unidade flutuante de produção, armazenamento e descarregamento (FPSO). Este evento teve origem na falha de um dos sistemas de gás, que deveria estar contido de maneira segura dentro das instalações. A liberação de gás ocorreu devido a uma combinação de falhas técnicas e operacionais, incluindo possíveis problemas de vedação, manutenção inadequada, ou erros humanos durante operações críticas. Quando o gás inflamável escapou para uma área confinada, como a sala de bombas, foi detectada um aumento na concentração do gás, pronto para ser ignitado por qualquer fonte de faísca ou calor. A árvore de eventos do FPSO Cidade de São Mateus esta apresentada na Figura 14.

Figura 14 – Árvore de eventos do acidente do FPSO Cidade de São Mateus



A presença de gás inflamável em uma área confinada do FPSO, onde há diversos equipamentos elétricos e mecânicos, aumentou significativamente o risco de ignição. A explosão subsequente causou danos catastróficos à estrutura da unidade e resultou em múltiplas fatalidades e ferimentos graves entre a tripulação. A falha em detectar e conter rapidamente o vazamento de gás antes que ele alcançasse uma concentração perigosa destaca a importância crítica dos sistemas de monitoramento de gás e das práticas de manutenção rigorosas em operações offshore.

4.2.3.1. Danos Ambientais

Os danos ambientais não são diretamente considerados nas ramificações específicas desta árvore de eventos. No entanto, qualquer vazamento de gás ou explosão em um FPSO pode potencialmente causar danos ambientais significativos devido à liberação de hidrocarbonetos no mar. A ausência de danos ambientais explícitos nesta análise pode ser devido ao foco nos impactos diretos à produção e à segurança pessoal.

4.2.3.2. Danos Patrimoniais

Os danos patrimoniais são analisados com base na extensão e na gravidade das interrupções operacionais e financeiras que podem resultar do incidente. Cada nível de falha nos sistemas de detecção e controle contribui para diferentes graus de impacto econômico e operacional na plataforma. A avaliação considera desde pequenos vazamentos que causam interrupções moderadas, até explosões que resultam em paradas de produção catastróficas. Estes danos foram escolhidos para ilustrar a escala crescente dos custos e esforços de recuperação necessários, destacando a importância de sistemas de detecção e controle eficazes para mitigar impactos financeiros severos.

- Pequeno Vazamento (S1 e S2): Nos eventos de pequenos vazamentos, onde há falhas no sensor de detecção de gases de atmosfera explosiva (S1) e no sensor de alarme de gases de atmosfera explosiva (S2), a produção é interrompida de maneira moderada. Esses vazamentos requerem reparos e inspeções para garantir a segurança, resultando em uma parada de produção média. O custo financeiro aqui é devido ao tempo de inatividade e à necessidade de reparar os sistemas afetados.
- Vazamento Médio (S3 e S4): Quando há falha no sistema de ventilação de gases da casa de bombas (S3) e na equipe de respostas com equipamento para mitigação (S4), ocorrem

vazamentos médios. Estes vazamentos exigem uma resposta mais robusta, levando a uma parada de produção média. Esse cenário implica em custos operacionais significativos devido ao tempo de inatividade necessário para corrigir a falha e mitigar os riscos associados à maior quantidade de gás liberado.

- Explosão da Casa de Bombas (F4): No pior cenário, onde múltiplas falhas resultam na explosão da casa de bombas, a parada de produção é crítica. Este evento catastrófico causa danos extensivos à infraestrutura, interrompendo completamente as operações e exigindo uma reconstrução significativa. As perdas financeiras são enormes devido à paralisação prolongada e aos custos elevados de recuperação e reparo.

4.2.3.3. Danos Pessoais

Os danos pessoais são categorizados com base na gravidade das lesões que podem resultar do incidente, considerando a resposta em cada etapa do evento. Estes danos foram escolhidos para refletir a gravidade crescente dos riscos à medida que as falhas nos sistemas de detecção e resposta se acumulam.

- Pequeno Vazamento (S1 e S2): Nos cenários de pequenos vazamentos, onde ocorrem falhas nos sensores de detecção e alarme de gases de atmosfera explosiva, o risco para a saúde pessoal é relativamente baixo. Devido à rápida contenção, a exposição ao gás seria mínima, resultando apenas em possíveis primeiros socorros ou ausência de lesões.
- Pequeno Vazamento com Exposição Moderada (S3): Com a falha no sistema de ventilação de gases da casa de bombas, o pequeno vazamento leva a uma exposição moderada a gases tóxicos. A ventilação inadequada pode aumentar a exposição, necessitando de intervenção médica moderada e representando um risco maior para a saúde dos trabalhadores.
- Vazamento Médio com Exposição Moderada (S4): Quando a equipe de respostas com equipamento para mitigação falha, um vazamento médio ocorre, aumentando significativamente o risco de exposição a níveis perigosos de gás. Este cenário requer cuidados médicos mais intensivos e pode causar efeitos adversos à saúde dos trabalhadores devido à maior quantidade de gás liberado.
- Explosão da Casa de Bombas (F4): O cenário mais devastador é a explosão da casa de bombas, resultando em múltiplas fatalidades intramuros. A intensidade da explosão e a liberação subsequente de energia e fragmentos dentro de uma área confinada causam lesões fatais múltiplas. Este dano ilustra o impacto humano extremo de falhas críticas nos sistemas de segurança e contenção, representando um evento catastrófico com consequências trágicas para os trabalhadores.

5. CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES FUTURAS

5.1. Conclusão

A análise dos acidentes na plataforma P-48, na sonda Norbe VIII e no FPSO Cidade São Mateus revela a complexidade e os desafios enfrentados pela indústria offshore. Cada incidente desencadeou uma sequência de eventos que resultaram em danos ambientais, patrimoniais e pessoais significativos. Esses eventos destacam a importância crítica de sistemas de monitoramento, controle e resposta eficazes para prevenir acidentes e mitigar suas consequências em instalações offshore.

No caso da plataforma P-48, a perda de contenção do fluido inflamável evidencia a necessidade de sistemas de detecção precoce de vazamentos e intervenção rápida para evitar consequências graves. A análise dos eventos subsequentes ressalta a importância de medidas preventivas e procedimentos operacionais rigorosos para proteger a segurança dos trabalhadores e o meio ambiente. A compreensão desses eventos pode informar melhorias nos sistemas de segurança e nas práticas operacionais para reduzir o risco de acidentes similares no futuro.

Da mesma forma, o acidente na sonda Norbe VIII destaca os perigos associados à falha na contenção de pressão e fluidos em ambientes confinados. A análise dos danos potenciais sublinha a necessidade de sistemas de segurança robustos e protocolos operacionais eficazes para prevenir incidentes e proteger vidas e patrimônio. A investigação desses eventos pode fornecer insights valiosos para o aprimoramento dos padrões de segurança e práticas de operação em plataformas offshore.

Já o acidente no FPSO Cidade São Mateus ressalta os riscos relacionados à presença de substâncias inflamáveis em ambientes confinados e a importância crítica de medidas de prevenção, detecção e resposta a vazamentos de gás. A análise dos eventos sequenciais destaca a necessidade urgente de aprimoramentos nos sistemas de segurança e nas práticas operacionais para evitar incidentes catastróficos e proteger o meio ambiente e os trabalhadores offshore. Essas descobertas podem orientar esforços futuros para desenvolver e implementar tecnologias e políticas mais avançadas de segurança na indústria offshore.

5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Para futuros trabalhos baseados nos resultados obtidos, sugere-se uma investigação mais aprofundada sobre os sistemas de monitoramento, controle e resposta a emergências em instalações offshore. Isso poderia incluir estudos de caso adicionais, análises de dados históricos e simulações computacionais para avaliar a eficácia desses sistemas em diferentes cenários de acidentes.

Além disso, seria benéfico realizar pesquisas sobre novas tecnologias e práticas de segurança que possam ser implementadas na indústria offshore. Isso poderia envolver o desenvolvimento e teste de sensores avançados, sistemas de automação e métodos de mitigação de riscos para melhorar a prevenção e resposta a acidentes. Outra área de estudo potencial seria a análise dos fatores humanos e organizacionais envolvidos em acidentes offshore. Investigar como a comunicação, o treinamento e a cultura de segurança influenciam o desempenho e a segurança dos trabalhadores.

Por fim, realizar pesquisas sobre políticas regulatórias e melhores práticas da indústria para promover a segurança offshore. Isso poderia incluir análises comparativas de regulamentações em diferentes regiões do mundo, bem como estudos sobre o impacto das políticas de conformidade e certificação na redução de acidentes e na promoção de uma cultura de segurança na indústria.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Análise Do Acidente Com a Plataforma P-36SouGov**. [s.l.] ANP, jul. 2001. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional/incidentes/relatorios-de-investigacao-de-incidentes-1/arquivos-relatorios-de-investigacao-de-incidentes/relatorio-do-acidente-com-a-p-36/relatorio_p-36.pdf>. Acesso em: 20 maio. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **RELATÓRIO DE INVESTIGAÇÃO DE INCIDENTE PLATAFORMA P-48 gov.br**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional/incidentes/relatorios-de-investigacao-de-incidentes-1>>. Acesso em: 1 abr. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **RELATÓRIO DE INVESTIGAÇÃO DE INCIDENTE SONDA MARÍTIMA NORBE VIII (NS-32) gov.br**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional/incidentes/relatorios-de-investigacao-de-incidentes-1>>. Acesso em: 1 abr. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **RELATÓRIO DE INVESTIGAÇÃO DE INCIDENTE FPU P-53 (VAZAMENTO DE ÓLEO COM TOQUE NA COSTA)gov.br**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional/incidentes/relatorios-de-investigacao-de-incidentes-1>>. Acesso em: 1 abr. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **RELATÓRIO DE INVESTIGAÇÃO DO INCIDENTE DE EXPLOÇÃO OCORRIDO EM 11/02/2015 NO FPSO CIDADE DE SÃO MATEUSgov.br**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional/incidentes/relatorios-de-investigacao-de-incidentes-1>>. Acesso em: 1 abr. 2024.

BARBOSA , E. **Segurança do Trabalho x Processo (Concorrentes ou complementares?) – Parte II**. Disponível em: <<https://ubq.org.br/seguranca-do-trabalho-x-processo-concorrentes-ou-complementares-parte-ii/>>. Acesso em: 20 abr. 2024.

BARONI, C. **Tipos de Plataforma Offshore e desafios na construção dessas estruturas**. Disponível em: <<https://ctcinfra.com.br/plataforma-offshore/>>. Acesso em: 20 abr. 2024.

CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY. **Diretrizes para Segurança de Processo Baseada em Risco**. Tradução: Petrobrás. 1º edição ed. [s.l.] INTERCIÊNCIA, 2014.

CROWL, D. A.; LOUVAR, J. F. **Segurança de Processos Químicos - Fundamentos e Aplicações**. 3º Edição ed. [s.l.] Editora LTC, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **O Papel do Setor de Petróleo e Gás Natural na Transição Energética**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/o-papel-do-setor-de-petroleo-e-gas-natural-na-transicao-energetica>>. Acesso em: 5 maio. 2024.

ENGENHARIA DE PROCESSOS. **Segurança de Processos Industriais - Process Engineer**. Disponível em: <<https://processesengineerbr.com/2024/03/23/seguranca-de-processos-industriais/>>. Acesso em: 14 maio. 2024.

FM CONTABILIDADE HUMANA. **Árvore de Eventos**. Disponível em: <<https://fmconfiabilidadehumana.wordpress.com/tag/arvore-de-eventos/>>. Acesso em: 9 maio. 2024.

HAVARD DEVOLD. **OIL AND GAS PRODUCTION HANDBOOK : an introduction to oil and gas production, transport, refining ... and petrochemical industry (color edition)**. 1º Edição ed. [s.l.] Lulu.com, 2015.

K. LUND DO BRASIL. **Tipos de plataformas de petróleo offshore | O que você precisa saber**. Disponível em: <<https://kl-offshore.com.br/tipos-de-plataformas-de-petroleo-offshore/>>. Acesso em: 20 abr. 2024.

KLETZ, T. A.; GOMES, A. **O que houve de errado? : casos de desastres em indústrias químicas, petroquímicas e refinarias**. 1º Edição ed. São Paulo: Editora Interciência, 2013.

LAMBERT, H. **Introduction to Event Tree --Fault Tree Analysis** FTA ASSOCIATES. [s.l.] FTA ASSOCIATES, 14 fev. 2019. Disponível em: <<https://ftaassociates.com/wp-content/uploads/2019/04/h.-lambert-introduction-to-event-tree-fault-tree-analysis-lawrence-livermore-national-laboratory-llnl-pres-770135-im-960326-1-february-14-2019-2.pdf>>.

Acesso em: 25 abr. 2024.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **The Case for Safety The North Sea Piper Alpha Disaster**NASA. [s.l.] NASA, maio 2013. Disponível em: <<https://www.nasa.gov>>. Acesso em: 20 maio. 2024.

PETRÓLEO BRASILEIRO. **N-2782 - CRITÉRIOS PARA APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DE RISCOS**. [s.l: s.n.]. Acesso em: 18 maio. 2024.

REASON, J. **Human Error**. 1º Edição ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

REIS, D. **FPSO: O que é e como funciona**. Disponível em: <<https://www.servicoemdestaque.com.br/fps0/#:~:text=Os%20FPSO%20s>>. Acesso em: 5 maio. 2024.

TELES, J. **Bíblia do RCM – O Guia Completo e Definitivo da Manutenção Centrada na Confiabilidade da Era da Indústria 4.0**. Brasília: ENGETELES, 2019.

U.S. CHEMICAL SAFETY AND HAZARD INVESTIGATION BOARD. **INVESTIGATION REPORT REFINERY EXPLOSION AND FIRE**CSB. [s.l.] CSB, 23 mar. 2007. Disponível em: <<https://www.csb.gov>>. Acesso em: 20 maio. 2024.

U.S. CHEMICAL SAFETY AND HAZARD INVESTIGATION BOARD. **DRILLING RIG EXPLOSION AND FIRE AT THE MACONDO WELL**CSB. [s.l.] CSB, 17 abr. 2016. Disponível em: <<https://www.csb.gov>>. Acesso em: 20 maio. 2024.