

Pós-Graduação

Segurança de Processos



INTEGRAÇÃO DA METODOLOGIA PETRO-HRA AO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO E GESTÃO DE BARREIRAS HUMANAS COM BASE NAS TAREFAS CRÍTICAS DO FPSO CIDADE DE SÃO MATEUS

Fernanda M. Ribeiro, Rodrigo N. Marques, Cleiton F. Brito, Etyane A. Dantas e Samir B. Bressane

RESUMO

A operação em Plataformas offshore de produção de petróleo e gás acontece em um ambiente hostil, onde os trabalhadores convivem com situações de elevado potencial de dano e riscos envolvidos, as vezes gerando acidentes graves. A análise de acidentes anteriores costuma ser uma ferramenta relevante para a prevenção de novos e é muito utilizada para identificar pontos de melhoria na segurança de processos. A revisão de acidentes indica que o desempenho humano tem um papel crítico no risco de operações offshore. O acidente de FPSO Cidade de São Mateus (CDSM) ocorreu em 2015, quando um vazamento de condensado dentro da casa de bombas gerou uma explosão e causou a morte de 9 tripulantes e ferimentos em outros vinte e seis. Da experiência com a explosão do FPSO CDSM constatou-se a influência dos fatores humanos previamente ao acidente e nas tomadas de decisão durante as ações de resposta à emergência. Uma das ferramentas para compreender a atuação humana é a análise de confiabilidade humana (HRA), sendo uma abordagem que visa avaliar a probabilidade de erro humano a partir da identificação das tarefas e procedimentos críticos dentro do sistema. O desempenho humano está intrinsecamente relacionado aos contextos críticos de um processo, tendo em vista a sua capacidade de levar à perda de controle de um perigo e de permitir que esta condição insegura se desenvolva em uma série de consequências indesejáveis. A proposta deste estudo foi avaliar como os fatores humanos podem auxiliar na análise de barreiras e na prevenção de grandes acidentes, incorporando resultados da HRA ao diagrama de BowTie de tarefas críticas que tenha contribuíram para a ocorrência dos acidentes no FPSO CDSM. A HRA mostrou os principais fatores influenciadores de desempenho (PSFs) e que a probabilidade de erro humano é muito alta para ser reduzido apenas com intervenções nos PSFs. Ou seja, foram inseridas outras barreiras para prevenir o evento topo, como o Intertravamento e PSV (assim como seus respectivos controles de fator de degradação) e adicionalmente também a recomendação de substituição da bomba alternativa por uma centrífuga. Estudos adicionais com a metodologia em outros cenários e tarefas críticas se fazem necessários, entretanto a integração do Petro-HRA com o diagrama de Bowtie representou um ganho significativo na gestão de barreiras e de riscos humanos na prevenção de acidentes, como os ocorridos no FPSO Cidade de São Mateus.

Palavras-Chave: *Segurança de Processo, BowTie, Análise de Confiabilidade Humana, Fatores Humanos.*

ABSTRACT

Oil and gas offshore operations on production platforms occur in a hostile environment, where workers live in situations with a high potential for damage and associated risks, sometimes leading to serious accidents. The analysis of previous accidents is usually a relevant tool for preventing new ones and is widely used to identify points for improvement in process safety. The accident review indicates that human performance is critical in the risk of offshore operations. The FPSO Cidade de São Mateus (CDSM) accident occurred in 2015 when a condensate leak inside the pump room generated an explosion, causing the death of 9 crew members and injuries to twenty-six others. The experience with the explosion of the FPSO CDSM revealed human factors' influence before the accident and decision-making during emergency response actions. One of the tools for understanding human performance is human reliability analysis (HRA), which aims to assess the probability of human error by identifying critical tasks and procedures within the system. Human performance is intrinsically related to the critical contexts of a process, given its ability to lead to the loss of control of a hazard and allow this unsafe condition to develop into a series of undesirable consequences. This study aimed to evaluate how human factors can assist in the analysis of barriers and the prevention of major accidents, incorporating HRA results into the BowTie diagram of critical tasks that have contributed to the occurrence of accidents on the FPSO CDSM. HRA showed the main performance influencing factors (PSFs) and that the probability of human error is too high to be reduced with PSF interventions alone. In other words, other barriers were inserted to prevent the top event, such as Interlocking and PSV (as well as their respective degradation factor controls) and it was recommended that the alternative pump be replaced with a centrifugal one. Additional studies with the methodology in other scenarios and critical tasks are necessary, however the integration of Petro-HRA with the Bowtie diagram represented a significant gain in the management of barriers and human risks in preventing accidents, such as those occurring at the FPSO CDSM.

Keywords: Process Safety, BowTie, Human Reliability Analysis, Human Factors.

Sumário

LISTA DE ABREVIACÕES	4
1. INTRODUÇÃO.....	5
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	5
1.2 MOTIVAÇÃO PARA O TRABALHO.....	7
1.3 OBJETIVO GERAL.....	13
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2. DESENVOLVIMENTO	14
2.1. ASPECTOS CONTEXTUAIS PARA O DESENVOLVIMENTO DE ANÁLISE DE CONFIABILIDADE HUMANA PARA APLICAÇÕES OFFSHORE.....	14
2.2. METODOLOGIA PETRO-HRA.....	16
2.3. DIAGRAMA DE <i>BOW TIE</i>	21
2.3.1. <i>Fatores humanos em Bow Tie</i>	23
2.4. ESTUDO DE CASO.....	24
2.4.1 <i>FPSO Cidade de São Mateus</i>	24
2.4.2 <i>Motivação para a escolha do cenário acidental</i>	25
2.4.3 <i>Definição da tarefa</i>	26
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
3.2. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PETRO-HRA	29
3.2.1 <i>Definição do cenário</i>	29
3.2.2 <i>Coleta de dados qualitativos</i>	31
3.2.3 <i>Análise da Tarefa</i>	33
3.2.4 <i>Identificação dos erros humanos</i>	35
3.2.5 <i>Modelagem de erros humanos</i>	38
3.2.6 <i>Quantificação de erros humanos</i>	41
3.2.7 <i>Redução de erros humanos</i>	53
3.3. ANÁLISE DAS AÇÕES E MELHORIA DAS BARREIRAS HUMANAS NO DIAGRAMA BOW TIE.....	56
3.4. DIFICULDADES E OPORTUNIDADES	57
4. CONCLUSÕES	59
5. REFERÊNCIAS.....	60

LISTA DE ABREVIATÖES

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BSCAT - Técnica de Análise Sistemática de Causas Baseado em Barreiras (*Barrier-Based Systematic Cause Analysis Technique*)
CCPS - *Center for Chemical Process Safety*
CDSM - Cidade de São Mateus
ETA - Análise de Árvores de Eventos (*Event Tree Analysis*)
FPSO - Produção, Armazenamento e Descarregamento Flutuante (*Floating, Production, Storage and Offloading*)
FTA - Análise de Árvore de Falhas (*Fault Tree Analysis*)
HEI - Identificação do erro humano (*Human Error Identification*)
HEM - Modelagem de erros humanos (*Human error modes*)
HEP - Probabilidade de Erro Humano (*Human Error Probability*)
HF - Fatores Humanos (*Human Factors*)
HFE - Evento de Falha Humana (*Human Failure Event*)
HMI - Interface Homem-Máquina (*Human-Machine Interface*)
HRA - Análise de Confiabilidade Humana (*Human Reliability Analysis*)
HSE - Saúde, Meio Ambiente e Segurança (SMS) (*Health, Safety and Environment*)
HTA - Análise Hierárquica da Tarefa (*Hierarchical Task Analysis*)
ICI - *Imperial Chemical Industries*
OIM - Gerente da instalação (*Offshore Installation Manager*)
PT - Permissão de Trabalho
QRA - Avaliação Quantificada de Riscos (Quantified Risk Assessment)
SCAT - Técnica de Análise Sistemática de Causas (Systematic Cause Analysis Technique)
SHERPA - Abordagem Sistemática de Redução e Predição de Erros Humanos (A systematic human error reduction and prediction approach)
SPAR-H - Standardized Plant Analysis Risk-Human Reliability Analysis

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A operação em Plataformas offshore de produção de petróleo e gás acontece em um ambiente hostil, onde os trabalhadores convivem com situações de elevado potencial de dano e riscos envolvidos. Eles ficam afastados do seu convívio social, com a sua privacidade limitada e geralmente submetidos a longos períodos embarcados com a mesma equipe e a extensas jornadas de trabalho. Além disso, o suporte externo em caso de acidente não é imediato e o controle de uma emergência depende principalmente da capacidade da força de trabalho. Diversos fatores presentes na rotina diária dessas instalações podem impactar diretamente no desempenho humano nas operações offshore, o que exige uma atenção maior para o que isso pode representar na gestão de riscos. Em síntese, em um ambiente de alta complexidade operacional, como uma plataforma de petróleo, são várias as atividades que envolvem riscos de potenciais danos. Portanto, a segurança de processo é um requisito fundamental para esse segmento que diariamente produz grande quantidade de petróleo e gás natural.

A análise de acidentes anteriores costuma ser uma ferramenta relevante para a prevenção de acidentes e é muito utilizada para identificar pontos de melhoria na segurança de processos. No que tange a indústria de petróleo, a revisão de acidentes indica que o desempenho humano tem um papel crítico no risco de operações offshore. Como exemplo é possível citar que as falhas humanas são pertinentes para incidentes como Ekofisk Alpha (Noruega, 1975), Deepsea Driller (Noruega, 1976), Ocean Ranger (Canadá, 1982), Glomar Java Sea (China, 1983), Enchova (Brasil, 1984), Piper Alpha (Reino Unido, 1988), P-36 (Brasil, 2001), Usumacinta (México, 2007), Gullfaks B (Noruega, 2010), Deepwater Horizon (EUA), Heimdal (Noruega, 2012) e CDSM (Brasil, 2015).

A fim de exemplificar a relevância dos erros humanos para a ocorrência de acidentes operacionais na indústria petrolífera, é válido mencionar algumas falhas humanas identificadas em acidentes bastante conhecidos no setor offshore, como por exemplo o acidente da Piper Alpha. O desastre da plataforma de petróleo offshore de Piper Alpha foi um acidente que marcou a história offshore e tem sido objeto de estudo de vários trabalhos na literatura, desde sua ocorrência até os dias atuais. A catástrofe que destruiu completamente a plataforma Piper Alpha ocorreu no Mar do Norte em 1988, quando um vazamento de condensado acarretou uma série de explosões catastróficas e

incêndios que destruíram a plataforma e causaram a morte de 167 pessoas, no mar do Norte escocês. Alguns erros humanos foram apontados como determinantes para o acidente, como problemas persistentes com a comunicação entre os turnos de trabalho. Adicionalmente, houve erro na instalação do flange cego de forma provisória no lugar da válvula de alívio na descarga da bomba, que tinha sido removida para manutenção. Por fim, uma falha no Sistema de Permissão de Trabalho (PT), que muitas vezes já não funcionava de acordo com o procedimento, permitiu que a tragédia ocorresse.

Mesmo depois de várias lições obtidas da investigação do acidente da Piper Alpha, outros acidentes com recorrência de erros humanos ocorreram. Por exemplo, um acidente ocorreu na plataforma de Gullfaks B em 2010, instalada desde 1988 no mar do norte norueguês. Durante um teste funcional de uma válvula de shutdown de um poço de produção, duas outras válvulas de shutdown foram pressurizadas involuntariamente para a posição aberta, o que acarretou um vazamento que durou cerca de uma hora e somou 800 kg de gás liberado. Dentre as principais causas e circunstâncias que contribuíram para o incidente, algumas estão relacionadas com fatores humanos como: Falha na identificação dos requisitos de teste para barreiras no plano de isolamento; ausência de planejamento detalhado de todas as etapas da atividade de manutenção; identificação inadequada dos riscos da tarefa relacionados ao aumento da pressão; deficiências de manutenção relacionadas à válvula mestra manual; e a desativação involuntária do sistema de desligamento de emergência.

Nos casos ocorridos no Brasil, é notável que todas as vinte mortes causadas pelos grandes acidentes da P-36 e do FPSO Cidade de São Mateus (CDSM) estavam relacionadas a tripulantes realizando atividades de resposta a emergências. O acidente com a P-36 ocorrido em 2001 se configura como um dos grandes desastres internacionais da indústria do petróleo, já que se tratava da maior plataforma de produção semissubmersível do mundo na ocasião, que era operada pela Petrobras no campo de Roncador, Bacia de Campos. O acidente resultou em onze mortes e a perda total da unidade após diversas tentativas de recuperação da sua estabilidade. Diversas circunstâncias criaram as condições necessárias para o acidente da P-36 e foi possível concluir que os principais fatores causais estavam relacionados com fatores humanos, como: a mudança na utilização emergencial dos tanques de slop; a transferência de líquido diretamente dos tanques de slop de emergência para o coletor de produção em desacordo com o previsto no manual de operações; a alteração na configuração do compartimento flutuante da plataforma; e ações de resposta emergencial indevidas.

No que se refere ao acidente CDSM, a plataforma era originalmente um cargueiro fabricado em 1989, que em 2008 foi convertido em FPSO. A plataforma da CDSM produzia gás natural e petróleo para a Petrobras na Bacia do Espírito Santo, nos campos de Camarupim e Caparupim Norte, no Brasil. O acidente de CDSM ocorreu em 2015, quando um vazamento de condensado dentro da casa de bombas gerou uma explosão e causou a morte de 9 tripulantes e ferimentos em outros vinte e seis. Da experiência com a explosão do FPSO Cidade de São Mateus constatou-se a influência dos fatores humanos no processo decisório durante as ações de resposta à emergência. A investigação do acidente identificou que a autoridade da instalação offshore (OIM – offshore installation manager) ignorou alguns princípios de segurança durante a emergência, tomando a decisão de expor um grupo maior do que o necessário em ambiente não controlado, com presença de atmosfera explosiva (casa de bombas). Outros aspectos relacionados ao desempenho humano também foram identificados como relevantes para a evolução do cenário: má gestão da equipe de carga; operação da bomba de *stripping* com descarga fechada; decisão de desmobilização de pessoas dos pontos de encontro com a emergência ainda em andamento; e ignição de uma atmosfera inflamável causada por ações de resposta a emergências.

Assim como os eventos indesejáveis, os incidentes ocorrem quando não há controle dos riscos. A falta de controle geralmente ocorre devido à ausência de avaliação de riscos, bem como pela degeneração das salvaguardas em resposta à influência de um contexto dinâmico. Logo, as ocorrências de acidentes demonstram que as medidas utilizadas para avaliar e controlar os riscos relacionados à atuação humana em operações offshore ainda são deficientes. A disciplina que se preocupa com essa compreensão das interações entre humanos e outros elementos de um sistema é conhecida como Fatores humanos (HF) e tem o objetivo de otimizar o bem-estar humano e o desempenho geral do sistema por meio da aplicação de teoria, princípios, dados e métodos ao projeto (*Human Factors and Ergonomics Society*, 2014).

1.2 Motivação para o trabalho

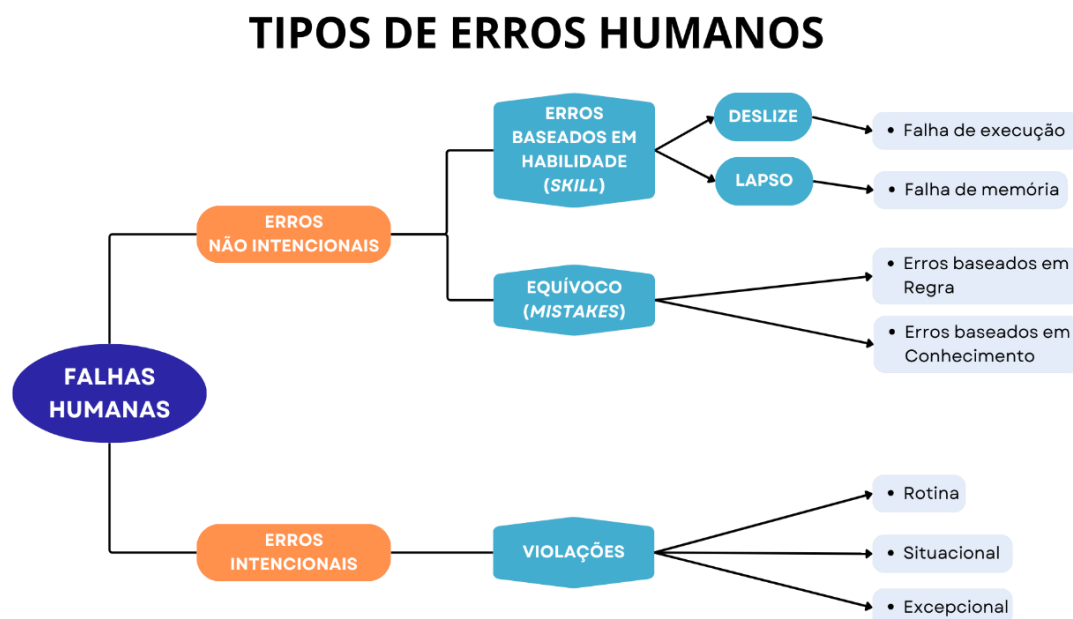
A análise de confiabilidade humana é uma abordagem que visa avaliar a probabilidade de erro humano a partir da identificação das tarefas e procedimentos críticos dentro do sistema. As metodologias de HRA (*Human Reliability Analysis*) apresentam abordagens sistemáticas e organizadas para avaliar eventos de falha humana

como deslizes, lapsos, erros e violações, e para estimar as probabilidades de erro humano (HEP) usando dados, modelos e julgamento de especialistas (ASME, 2013). Com efeito, as probabilidades de erro são frequentemente negligenciadas ou subestimadas na avaliação de risco offshore (Øie et al., 2014; Skogdalen e Vinnem, 2011).

Ainda que cenários acidentais apontem para uma alta contribuição da performance humana para o risco de acidentes em plataformas, a abordagem dos fatores influenciadores de desempenho em estudos de avaliação quantitativa de risco (QRA) offshore é bastante superficial na maior parte dos casos (Boring, 2015; Skogdalen e Vinnem, 2011). Mais especificamente, a análise de confiabilidade humana (HRA) ainda é incomum entre as práticas de gerenciamento de risco offshore e a falta de ferramentas adequadas que relacionam o ser humano com a gestão de riscos criam condições perfeitas para erros humanos e, portanto, para a ocorrência de acidentes graves.

James Reason é uma referência notável no campo da confiabilidade humana, segurança de sistemas complexos e prevenção de acidentes. Ele foi responsável por desenvolver várias teorias e modelos que contribuíram consideravelmente para a compreensão dos fatores humanos na segurança e na análise de confiabilidade humana. As suas teorias sobre o modelo do "queijo suíço" e "erro humano" ressaltam a natureza complexa e sistêmica dos acidentes. Além disso, ele enfatiza a notoriedade de sistemas organizacionais robustos, da cultura de segurança e da prevenção de erros diante do aprendizado organizacional. A Figura 1 apresenta um diagrama com os tipos de erros humanos proposto por James Reason.

Figura 1: Tipos de erros humanos proposto por James Reason



Fonte: Adaptado de HSE (1999)

Entende-se que há uma necessidade de incorporar os fatores humanos no processo de avaliação de riscos inerentes a segurança de processo em plataformas offshore. O desempenho humano está intrinsecamente relacionado aos contextos críticos de um processo, tendo em vista a sua capacidade de levar à perda de controle de um perigo e de permitir que esta condição insegura se desenvolva em uma série de consequências indesejáveis. Nesse sentido, a análise de confiabilidade humana (HRA) analisará os fatores humanos como fatores influenciadores de desempenho, ou seja, com base nos fatores que induzem as probabilidades de erro humano, como nível de treinamento, qualidade/disponibilidade de orientação processual, tempo disponível para executar uma tarefa, etc. (ASME, 2009b). Sendo assim, acredita-se que a HRA pode ser uma ferramenta eficaz para complementar outros métodos de análise de riscos à medida que as ações humanas se tornam potenciais cenários de riscos na operação offshore e aparecem com frequência em outros tipos de análises utilizadas para evitar e prevenir acidentes. O erro humano nunca será eliminado por completo, porém as técnicas de Análise de Confiabilidade Humana (HRA) podem complementar outras análises de risco a fim de garantir que as tarefas mais críticas e barreiras sejam resistentes a erros. Como resultado, a análise auxilia na conscientização e redução de riscos em operações de plataformas. Devido a importante contribuição humana para a segurança de processos, torna-se

primordial buscar potenciais abordagens de análise para melhorar o gerenciamento de riscos offshore.

Diversos métodos de Análise de Confiabilidade Humana foram desenvolvidos ao longo das décadas e a maioria das técnicas existentes foi projetada para aplicações nucleares. Embora mais de 70 métodos de Análise de Confiabilidade humana estejam disponíveis, apenas 17 foram considerados como de uso potencial para avaliação de grandes acidentes pelo HSE (*Health, Safety and Environment*). A Tabela 1 representa uma lista das 17 ferramentas de HRA revisadas e validadas pelo HSE com um breve resumo de cada uma delas. Um método de análise de confiabilidade humana (HRA) bastante utilizado na indústria petrolífera onshore e offshore é o Petro-HRA, que constitui uma análise completa das ações humanas em situações de risco, avaliando a performance humana através dos *Performance Shaping Factors (PSFs)*. A metodologia Petro-HRA é usada para estimar a probabilidade de falhas humanas em cenários de Eventos de Falha Humana (HFEs). Petro-HRA é uma metodologia SPAR-H adaptada para área de óleo e gás e, por ser considerada uma análise mais recente, não foi mencionada na publicação de 2009 do HSE que trata sobre as metodologias consolidadas para avaliação de grandes acidentes.

Tabela 1: Lista dos 17 métodos considerados de uso potencial para avaliação de grandes riscos pelo HSE

Disponibilizada	1 a G r a n d e s	Ferramenta	Comentário	Domínio
		THERP	Uma abordagem abrangente de HRA desenvolvida para o USNRC.	Nuclear com aplicação mais ampla
		ASEP	Uma versão abreviada do THERP desenvolvida para o USNRC.	Nuclear
		HEART	Relativamente rápido de aplicar e compreendido por engenheiros e especialistas em fatores humanos. O método está disponível por meio de artigos de pesquisas publicadas. (Um manual está disponível via British Energy).	Genérico
		SPAR-H	Abordagem útil para situações em que uma avaliação detalhada não é necessária. Desenvolvido para o USNRC. Baseado no HEART.	Nuclear com aplicação mais ampla

m e n t e				
-----------------------	--	--	--	--

D is p o n í v e l p u b l i c a m e n t e	2	Ferramenta	Comentário	Domínio
	a			
	G	ATHEANA	Intensivo em recursos e beneficiaria de um maior desenvolvimento. Desenvolvido pela USNRC.	Nuclear com aplicação mais ampla
	r			
	a	CREAM	Requer mais desenvolvimento. Disponível em várias referências publicadas.	Nuclear com aplicação mais ampla
	ç			
	ã			
	o			
	J	APJ	Requer controles rígidos para minimizar o viés, caso contrário, a validade pode ser questionável. Visto por alguns como mais válido que PC e SLIM.	Genérico
	u			
	l			
	g	PC	Requer controles rígidos para minimizar o viés, caso contrário, a validade pode ser questionável.	Genérico
	a			
	m	SLIM-MAUD	Requer controles rígidos para minimizar o viés do elemento SLIM, caso contrário, a validade pode ser questionável. O elemento SLIM está disponível publicamente.	Nuclear com aplicação mais ampla
	e			
	n			
	t			
	o			
	p			
	e			
N ã o d is p o	1	HRMS	Ferramenta informatizada abrangente. Um método próprio.	Nuclear
	a			
	G	JHEDI	Técnica de triagem mais rápida do que o HRMS, sua ferramenta antecessora. Um método próprio.	Nuclear
	e			
	r	INTENT	Foco restrito nos erros de intenção. Pouca evidência de uso, mas potencialmente útil. Disponível entrando em contato com os autores.	Nuclear
	a			
	ç			

n í v e l p u b l i c a m e n t e	ã o			
	2 a G	CAHR	Um método de banco de dados que é potencialmente útil. Disponível por meio de contato com os autores (site da CAHR).	Genérico
	e r	CESA	Potencialmente útil. Disponível entrando em contato com os autores.	Nuclear
	a ç ã o	CODA	Requer mais desenvolvimento e CAHR ou CESA podem ser mais úteis. Disponível entrando em contato com os autores.	Nuclear
		MERMOS	Desenvolvido e utilizado pela EdF, seu desenvolvimento está em andamento. Uma ferramenta própria.	Nuclear
	3 a G e r a ç ã o	NARA	Uma versão nuclear específica do HEART (autor diferente do original). Uma ferramenta própria.	Nuclear

Fonte: HSE (2009)

Entre outras ferramentas de gerenciamento de barreiras na indústria de petróleo e gás, o BowTie tem sido utilizado há mais de 20 anos e possui um foco em acidentes de maior severidade. O BowTie é uma representação das barreiras de segurança, utilizada para identificar possíveis ameaças que podem levar à perda de controle dos riscos e auxiliar no processo de avaliação de riscos e, inclusive, pode ser uma ferramenta útil para apontar quais fatores humanos podem ser necessários analisar para garantir a eficácia das suas barreiras de segurança.

Visto que ainda não existe uma metodologia consolidada que demonstre como os fatores humanos podem auxiliar na análise de barreiras e na prevenção de grandes acidentes, o estudo proposto pretende combinar técnicas que já são utilizadas na indústria de óleo e gás para correlacionar o impacto do desempenho humano na atividade offshore com as barreiras e controles de degradação implementados no processo. Por fim, entende-se como necessário elaborar um estudo de avaliação de fatores humanos e análise de

barreiras baseado em grandes acidentes ocorridos na indústria petrolífera, como a explosão que aconteceu no FPSO Cidade de São Mateus (CDSM) em 2015 no Brasil. Assim, os resultados do estudo poderão demonstrar se a sua utilização seria eficaz na prevenção do acidente em questão.

1.3 Objetivo geral

A proposta deste estudo é avaliar como os fatores humanos podem auxiliar na análise de barreiras e na prevenção de grandes acidentes, incorporando resultados da metodologia de análise de confiabilidade humana ao diagrama de BowTie para uma tarefa ou procedimento crítico que tenha contribuído para a ocorrência da explosão na plataforma marítima FPSO Cidade de São Mateus (CDSM) em 2015 no Brasil. Além das necessidades metodológicas, pretende-se colocar em perspectiva o desafio de desenvolver ou aplicar métodos HRA em atividades offshore.

1.4 Objetivos específicos

- Identificar as Tarefas e Procedimentos Críticos relacionadas à atuação dos trabalhadores;
- Mensurar o impacto de fatores humanos no comportamento das instalações;
- Implementar a metodologia de Análise de Confiabilidade Humana, Petro-HRA, para identificar os Fatores influenciadores de desempenho (PSFs) presentes nesse cenário e entender como eles afetam a efetividade das barreiras e seus respectivos controles;
- Correlacionar o impacto do desempenho humano nas barreiras e controles de degradação implementados no processo por meio do diagrama *Bow Tie*;
- Avaliar se a aplicação da HRA juntamente com o *Bow Tie* é eficiente para reduzir os riscos na operação offshore e evitar eventos acidentais como o ocorrido no FPSO CDSM.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Aspectos contextuais para o desenvolvimento de análise de confiabilidade humana para aplicações offshore

Grande parte dos acidentes relacionados à área industrial tem como fator contribuinte a falha humana (RASMUSSEN, 1989; HOLLNAGEL, 1993). Exemplos de desastres amplamente conhecidos como os de Chernobyl, Three Mile Island e Piper Alpha identificaram os fatores humanos como causa raiz e de certo foram cuidadosamente estudados por profissionais que se preocupam com a contribuição humana para as causas de acidentes, como engenheiros de confiabilidade, psicólogos e especialistas em fatores humanos (GORDON, 1997). As falhas humanas são influenciadas pelos fatores individuais, tecnológicos e organizacionais. O fator individual corresponde às características cognitivas humana, o tecnológico está relacionado aos diferentes modos de falhas do sistema, subsistemas e componentes, enquanto o contexto organizacional é aquele que insere o indivíduo nos objetivos da empresa, com comunicação e políticas efetivas (REASON, 1991). Certamente, o contexto influencia regulamentações, organizações, força de trabalho, projetos, atividades e práticas de gestão de riscos para atender a necessidades específicas, portanto, para reduzir eventos indesejáveis e prover a segurança da instalação e dos seus trabalhadores faz-se necessário compreender melhor a importância da percepção e interpretação dos fatores que afetam o desempenho no trabalho.

A indústria do petróleo e gás compreende atividades inerentemente perigosas associadas à exploração e produção (E&P) de petróleo, pois envolve o armazenamento e manipulação de produtos com altos níveis de toxicidade e inflamabilidade. Enfim, pode-se dizer que a execução de atividades a bordo de plataformas petrolíferas offshore apresenta uma série de riscos abrangendo duas substâncias naturalmente insalubres e perigosas, o petróleo bruto e o gás natural (FRANÇA; HOLLNAGEL, 2023). Algumas embarcações empregam tecnologias modernas e complexas, que exigem muito da capacidade cognitiva dos seus trabalhadores, o que reforça a necessidade de incorporar Fatores Humanos na gestão de riscos (FRANCA; HADDAD; SANTOS, 2019). Some-se a isso, outros aspectos relevantes do trabalho no mar, pois as atividades regulares relacionadas ao offshore enfrentam desafios como o regime de embarque, o isolamento

no mar com afastamento dos amigos e família, o espaço limitado a bordo, os trabalhos em turnos, o sobreaviso permanente e a logística complexa da operação. A resposta a emergências, por exemplo, é um cenário muito particular nas operações offshore e geralmente apresenta muitos eventos de falha humana atrelados ao procedimento para lidar com a situação emergencial. Caso ocorra um acidente, os trabalhadores têm que realizar procedimentos de emergência, sendo o mar a única saída em caso de agravamento do cenário, o que gera outros riscos e preocupações.

A diversidade de projetos e modos de operação em indústrias petrolíferas pode ser considerado um fator bastante relevante para os eventos acidentais, pois eles podem variar conforme a localização, a empresa, a antiguidade e as suas demandas específicas. Quando se fala em plataformas fixas no fundo do mar, a estabilidade ou o armazenamento da produção podem não ser uma questão importante, enquanto existem unidades flutuantes em campos de águas profundas com armazenamento de petróleo e descargas recorrentes. Além disso, algumas plataformas podem perfurar poços enquanto produzem petróleo e gás, algumas produzem apenas petróleo e gás e outras produzem apenas gás ou petróleo. Também existem vários exemplos de instalações não tripuladas ou operadas remotamente, bem como plataformas offshore com um número alto de pessoas a bordo para realizar atividades. Em relação a antiguidade, existem algumas plataformas que estão em funcionamento há mais de quatro décadas, bem como instalações totalmente novas, representando uma diversidade considerável em sistemas de segurança e abordagens de gestão de risco, sem necessariamente levar em conta os conceitos de segurança inerentes (ALMEIDA, 2018; MORAIS ET AL., 2014; JE VINNEM, 2014). Consequentemente, considerar as diferentes fases de uma variedade de projetos offshore e modos operacionais fornecerá insumos mais eficientes para as atuais práticas de análise de risco.

Uma vez que o contexto offshore é levado em consideração para a compreensão das falhas humanas, espera-se que seja possível estabelecer os requisitos mínimos para uma abordagem de HRA eficiente. Ao considerar alguns fatores contextuais (denominados fatores influenciadores de desempenho) para analisar cada potencial erro humano, as análises de riscos passam a obter instrumentos adequados para analisar os sistemas e propor melhorias, o que fortalece as premissas do Reason de que “não podemos mudar a condição humana, mas podemos mudar as condições sob as quais as pessoas trabalham”. Nesse sentido, os sistemas de defesa se tornam o foco principal, ou seja, toda tecnologia perigosa possui barreiras e salvaguardas e quando um evento adverso ocorre o importante não é quem cometeu o erro, mas sim os motivos e as circunstâncias que

levaram as falhas das defesas (Reason, 2000). Assim, é de suma importância verificar se os equipamentos, operações e ambiente de trabalho estão compatíveis com as capacidades físicas e cognitivas do homem, bem como suas limitações. A Tabela 2 adaptada do Energy Institute apresenta uma relação de medidas de segurança que podem ser melhoradas para cada tipo de falha humana. Além disso, ressalta-se que entender os métodos utilizados para avaliar e gerenciar os riscos relacionados a ação humana pode aumentar a performance na realização do trabalho. Assim, o desenvolvimento de uma abordagem HRA para aplicações em indústrias offshore de petróleo e gás deve centrar-se tanto na eficiência da avaliação do desempenho humano, quanto no fornecimento de uma ferramenta que acomode amplamente características específicas do setor offshore.

Tabela 2: Mapeamento de medidas de segurança eficazes contra classificação de falha humanas

RELAÇÃO ENTRE MEDIDAS DE SEGURANÇA E TIPOS DE FALHAS HUMANAS				
MEDIDAS DE SEGURANÇA MELHORIAS EM:	DESLIZES	LAPSOS	EQUÍVOCOS	VIOLAÇÕES
DESIGN DE CONTROLE/EXIBIÇÃO	✓	✓	✓	✓
PROJETO DE EQUIPAMENTOS/FERRAMENTAS	✓			✓
AUXILIARES DE MEMÓRIA		✓		
TREINAMENTO			✓	✓
PROJETO DE TRABALHO	✓	✓		✓
PROCEDIMENTOS	*	✓	✓	✓
SUPERVISÃO	*	*	✓	✓
REDUÇÃO DE DISTRAÇÕES	✓	✓	✓	
AMBIENTE	✓	✓	✓	✓
COMUNICAÇÕES	*	*	✓	✓
AUXÍLIOS À DECISÃO			✓	
SEGURANÇA COMPORTAMENTAL			✓	✓

✓ Representa um forte potencial de melhoria

* Representa um possível potencial de melhoria

Fonte: Energy Institute (2020)

2.2. Metodologia Petro-HRA

A metodologia do Petro-HRA aplica avaliações qualitativas e quantitativas para identificar, modelar e realizar uma avaliação sistemática de tarefas que estão diretamente

relacionadas com o risco de acidentes graves. Embora a sua utilização seja destinada principalmente dentro de uma estrutura de modelo de risco como a Avaliação Quantitativa de Risco (QRA), a metodologia tem uma aplicabilidade muito ampla. O Petro-HRA também pode ser usado de maneira independente para apoiar e complementar uma análise de Engenharia de Fatores Humanos para escolhas iniciais de projeto ou como parte de outras análises de risco (The Petro-HRA Guideline Revision, 2022).

A criação da técnica do Petro-HRA tem por finalidade testar, avaliar e ajustar a HRA para eventos na indústria do óleo e gás. Este projeto escolheu o SPAR-H (*Standardized Plant Analysis Risk-Human Reliability Analysis*) como o principal método de adaptação à indústria petrolífera. A escolha foi baseada em uma avaliação de diferentes métodos de Gould, Ringstad e Van de Merwe em 2012, que concluíram que o SPAR-H era o mais promissor método para analisar a confiabilidade humana em eventos em aplicações petrolíferas (Bye et. al, 2016).

O erro humano é tratado através da análise de um Evento de Falha Humana (HFE), evento básico que representa a falha de um componente, sistema ou função em que as ações humanas estão envolvidas. O HFE é frequentemente definido no QRA, mas também pode ser modificado pela HRA. Um dos principais objetivos da HRA é fornecer dados quantitativos para a QRA na forma de Probabilidade de Erro Humano (HEP) dos HFEs. Um erro humano pode ser uma causa ou parte de uma causa num cenário de acidente ou pode ocorrer durante uma resposta após o início de um acidente grave. Petro-HRA foi desenvolvido para analisar erros humanos em eventos pós-inicialização, especialmente tarefas executadas da sala de controle, por exemplo, em controle de processo ou perfurações. No entanto, o método também pode ser utilizado para analisar um amplo conjunto de tarefas, desde que os PSF (*Performance Shaping Factors*) do Petro-HRA sejam os fatores de influência mais importantes.

O Petro-HRA consiste em oito etapas, as etapas são numeradas e descritas em uma sequência, mas o HRA não é um processo linear e muitas vezes há iteração entre as etapas durante todo o processo:

1) Definição do cenário;

O principal objetivo desta etapa é definir o cenário que será analisado. A definição do cenário é uma das mais importantes etapas da HRA, pois define o escopo e os limites da análise e molda a análise qualitativa e análises quantitativas. A definição do cenário

pode ser difícil, dependendo de quão bem os Eventos de Falha Humana (HFEs) foram definidos no QRA.

2) Coleta de dados qualitativos;

Esta etapa da HRA envolve uma coleta de dados específica e focada para permitir uma descrição detalhada da tarefa, que inclui informações sobre fatores que podem afetar (positiva ou negativamente) o desempenho humano e o resultado do cenário. Essa etapa formal de coleta de dados qualitativos é geralmente realizada por meio de um cenário “*walk-and-talk-through*”, observação dos operadores no local de trabalho, entrevistas e discussões com operadores e especialistas. Estas atividades geralmente ocorrem durante uma visita ao local da planta, ou um workshop com operadores, ou ambos.

3) Análise de tarefas;

É uma descrição das etapas executadas como parte de uma atividade e fornece um meio sistemático de organizar as informações coletadas em torno das tarefas. O nível de detalhe de uma análise de tarefa pode variar consideravelmente, embora a orientação geral seja adaptar o nível da análise aos requisitos em questão. O objetivo da análise da tarefa é compreender as atividades que estão sendo analisadas e traduzir esses detalhes no nível de detalhe adequado para a HRA e QRA. Para a análise de tarefas apoiar a HRA, deve ser fortemente fundamentada na identificação de fontes de erro humano, e também ajudar a definir o HFE. A análise da tarefa é também a base para a compreensão do impacto dos PSF na atividade humana e, portanto, a base para a quantificação. A análise de tarefas é representada visualmente através de uma Análise Hierárquica de Tarefas (HTA) e é descrita mais detalhadamente através de uma Análise Tabular de Tarefas (TTA).

4) Identificação do erro humano (HEI);

A HEI no Petro-HRA é realizado seguindo as seguintes etapas, considerando cada tarefa e etapa da tarefa por vez em termos de oportunidade de erro:

- a) Identifique erros “óbvios”. Passe por cada etapa da tarefa e documente os erros facilmente identificáveis;

- b) Identifique erros usando as palavras-guia do SHERPA (Abordagem Sistemática de Redução e Predição de Erros Humanos);
- c) Revisite as etapas/subetapas da tarefa e, usando as palavras-guia do SHERPA como instruções, considere outros tipos menos óbvios de erros que poderiam ocorrer;
- d) Identifique e descreva as prováveis consequências do erro. A consequência de um erro tem implicações na sua criticidade;
- e) Avalie oportunidades de recuperação. Se possível, determine o potencial de recuperação do erro identificado;
- f) Identifique PSFs. Para cada tarefa e erro, identifique os PSFs que podem influenciar o desempenho.

5) Modelagem de erros humanos (HEM);

Um objetivo da HEM é modelar as tarefas ou eventos de tal forma que, quando escolhidas são quantificados, a lógica do modelo pode ser usada para calcular o HEP para o HFE que é usado no QRA. Outro objetivo é esclarecer a relação entre os erros identificados na etapa 4 (HEI), os PSFs que contribuem para esses erros, e a tarefa ou evento que é escolhido para quantificação na etapa 6. Essas relações são então usadas qualitativamente quando cada tarefa individual é avaliada e quantificado conforme descrito na etapa 6. Existem duas abordagens que são relativamente padronizadas em modelagem: Análise de Árvore de Eventos (ETA) e Análise de Árvore de Falhas (FTA).

6) Quantificação de erros humanos;

O HFE é quantificado com base num valor nominal e num conjunto PSFs. A HTA/TTA, as fases de identificação de erros humanos e modelagem de erros humanos contém os recursos necessários para poder fazer a quantificação. Após a quantificação, além de obter a Probabilidade do Erro Humano (HEP) como um número de 0 a 1 da tarefa/evento em análise, deve-se também obter uma compreensão detalhada dos PSFs que são relevantes para o evento em análise.

São nove PSFs no Petro-HRA: Tempo, Estresse da Ameaça, Complexidade da Tarefa, Experiência/Treinamento, Procedimentos, Interface Homem-Máquina (HMI), Organização, Trabalho em Equipe e Ambiente Físico de Trabalho. Cada PSF possui

vários níveis e um multiplicador correspondente, a partir dos valores nominais, dos níveis escolhidos e multiplicadores correspondentes, uma HEP é calculada. A equação utilizada para o cálculo do HEP é apresentada a seguir:

$$\text{HEP} = 0,01 (\text{PEH nominal}) \times \text{multiplicador (Tempo)} \times \text{multiplicador (Estresse por ameaça)} \times \text{multiplicador (Complexidade da tarefa)} \times \text{multiplicador (Experiência/Treinamento)} \times \text{multiplicador (Procedimentos)} \times \text{multiplicador (IHM)} \times \text{multiplicador (Atitudes em relação à segurança, trabalho e suporte à gestão)} \times \text{multiplicador (Trabalho em equipe)} \times \text{multiplicador (Ambiente físico de trabalho)}.$$

7) Redução de erros humanos;

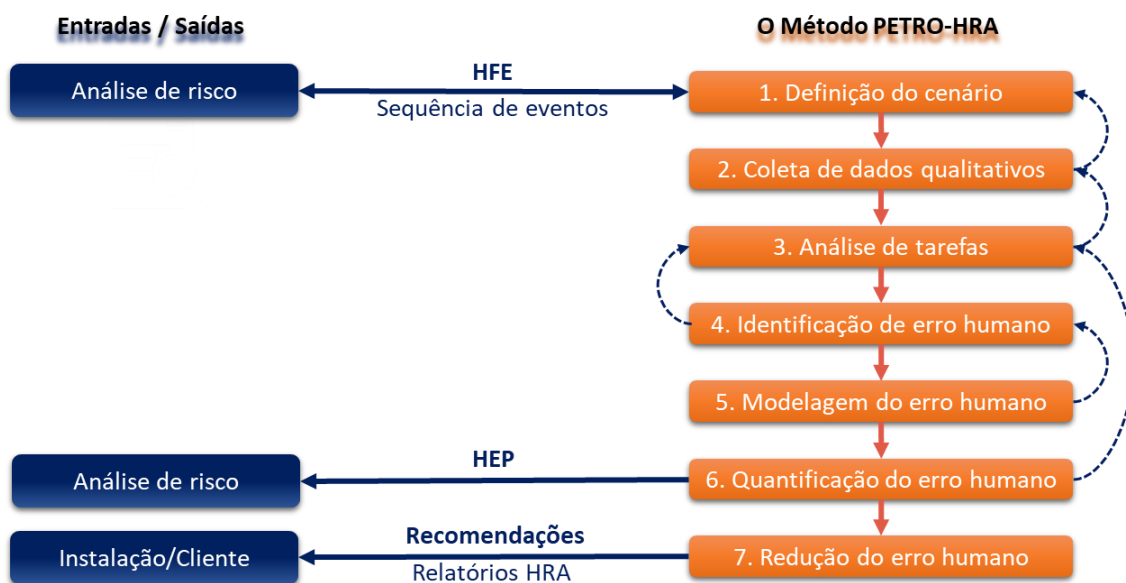
O processo de redução do risco de erro humano é composto por dois processos estreitamente interligados, a avaliação de impacto e análise de redução de erros. O objetivo de uma avaliação de impacto é demonstrar a contribuição relativa do erro humano para a QRA. Tal análise visa desenvolver medidas de redução de erros que visem erros humanos específicos e/ou estratégias de redução de erros que visem o desempenho humano a um nível mais geral, por exemplo, em diversas tarefas e cenários de acidentes. O objetivo da redução do erro humano é desenvolver medidas e estratégias de forma sistemática, utilizando o conhecimento e a visão obtidos a partir de técnicas de análise comumente executadas como parte de uma HRA.

8) Documentação.

Para o Petro-HRA, um relatório final deve ser escrito detalhando os resultados da análise. Os resultados quantitativos do Petro-HRA (ou seja, os HEPs calculados) normalmente serão inseridos em uma QRA, como ETA ou FTA. Contudo, os resultados qualitativos também são importantes e devem estar à disposição para leitura e utilização em análises posteriores.

O estudo seguiu as etapas descritas anteriormente para a análise de confiabilidade humana aplicada ao FPSO CDSM. A Figura 2 a seguir mostra de forma resumida as principais etapas para a aplicação do método Petro-HRA segundo o *The Petro-HRA Guideline*.

Figura 2: Etapas do método Petro-HRA



Fonte: *The Petro-HRA Guideline*, HFE (2022)

2.3. Diagrama de Bow Tie

A primeira menção à metodologia do *Bow Tie* apareceu em uma palestra do ICI (*Imperial Chemical Industries*) sobre análise de riscos, dada na Universidade de Queensland, Austrália, em 1979, mas, como e quando o método encontrou sua origem exata não está completamente claro. A Shell é reconhecida como a primeira grande empresa a integrar totalmente a metodologia do *Bow Tie* e, no final dos anos 1990, a abordagem tornou-se um método comum em muitas outras empresas. Normas e Padrões regulatórios estão cada vez mais abraçando o conceito de barreira como auxílio no gerenciamento de riscos e na comunicação eficaz (CCPS, 2018).

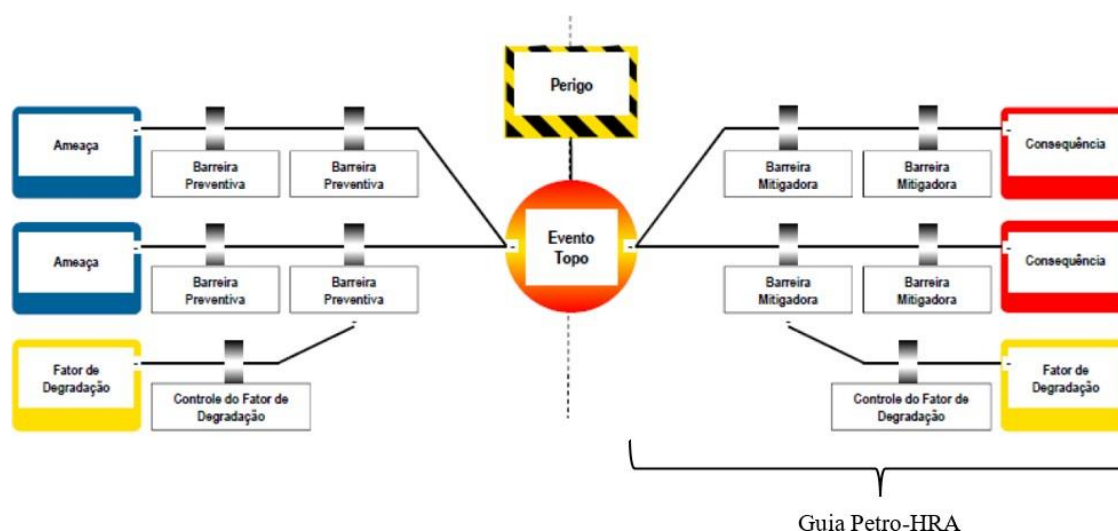
O *Bow Tie* é uma ferramenta útil para auxiliar na análise de riscos da indústria de processos. O foco geral da técnica na indústria é para Eventos Catastróficos (MAE - *Major Accident Events*), de forma que a equipe compreenda como esses eventos podem ocorrer, quais as barreiras e degradação de controles implantados, para evitá-los. Embora se trate de eventos de grande escala com consequências graves, algumas empresas optam por desenvolver *Bow Tie* também para eventos menos graves, como eventos de segurança ocupacional, como “queda de altura”.

O *Bow Tie* é uma representação simplificada e combinada de uma Análise de Árvore de Falhas (FTA) e de uma Análise de Árvore de Eventos (ETA), que são

consideradas análises minuciosas e exaustivas. Embora complexas, a FTA e a ETA garantem a qualidade da avaliação de riscos e são bastante razoáveis quando utilizadas no *Bow Tie*, por esta técnica se limitar apenas a situações de risco. A partir dessas ferramentas de análise estruturadas e com grande quantidade de resultados possíveis, é viável identificar as barreiras de segurança para impedir a ameaça que leva ao evento topo ou para evitar que o evento principal conduza a catástrofes. Geralmente a ocorrência desses eventos pode ser identificada no lado direito de um Diagrama de *Bow Tie*, aquele onde se encontram as barreiras que impedem, reduzem ou mitigam as consequências indesejadas.

O *Bow Tie* é utilizado com frequência na indústria de Petróleo e Gás e pode ser visualizado na Figura 3 com os seus elementos chave.

Figura 3: Um típico diagrama Bow Tie usado na avaliação de riscos petrolíferos



Fonte: CCPS (2018)

Perigo: O *Bow Tie* começa com o perigo;

Evento Topo: a perda de controle do perigo;

Ameaças: representadas à esquerda, parte da prevenção do diagrama;

Consequências: Perda de controle do risco estão representadas à direita, parte da mitigação do diagrama;

Barreiras Preventivas: As barreiras à esquerda do diagrama representam as preventivas, que impedem que ameaças resultem no evento topo;

Barreiras Mitigadoras: As barreiras à direita do evento topo representam mitigadores, que mitigam o evento topo, ou seja, reduzem a escala do evento e possivelmente impedir consequências indesejadas;

Fatores de Degradação: podem ser aplicados tanto para barreiras preventivas quanto mitigadoras e podem levar ao comprometimento ou falha da barreira à qual eles estão relacionados;

Controles de Degradação: atuam para mitigar os fatores de Degradação, auxiliando na manutenção da barreira da via principal na função pretendida.

Um dos benefícios do uso do *Bow Tie* é fornecer uma análise e monitoramento sistemático das barreiras, a partir de ameaças e possíveis consequências, que podem prevenir ou mitigar um Evento Catastrófico. Isso pode apoiar tanto na fase de projeto, como também nas atividades operacionais ou de manutenção para aumentar a conscientização e a compreensão das barreiras existentes e do papel dos indivíduos na operação ou manutenção de barreiras. O diagrama pode apoiar na identificação e priorização de ações para fortalecer as barreiras degradadas e os controles de degradação e fornecer um processo estruturado onde os perigos, ameaças e consequências podem ser relacionadas aos cenários de causa e efeito, ajudando na compreensão de como eventos indesejados podem ocorrer.

2.3.1. Fatores humanos em *Bow Tie*

No que tange aos Fatores Humanos em análise *Bow Tie*, eles podem aparecer com mais frequência como parte(s) de uma barreira de prevenção ativa ou barreira de mitigação, como um fator de degradação ou como parte(s) de um controle do fator de degradação. Portanto, humanos podem formar uma barreira ou um elemento de barreira, desde que a barreira cumpra todos os critérios de aceitação, ou seja, eficaz, independente e auditável. Fatores ou sistemas organizacionais normalmente residem nas vias dos fatores de degradação. Nesse sentido, é relevante mencionar que aspectos típicos dos fatores humanos como a liderança, formação, a competência ou a cultura de segurança não podem aparecer por si só como barreiras na principal linha de ameaça do Diagrama de *Bow Tie*. Tal fato ocorrer porque as barreiras ativas necessitam de elementos independentes para detectar a ameaça, decidir qual a ação será tomada e executar a tarefa para conter o cenário. Por outro lado, os fatores humanos são essenciais para garantir o

funcionamento adequado das barreiras, ou seja, surgem como salvaguardas sobre os fatores de degradação que afetam uma barreira (CCPS, 2018).

2.4. Estudo de caso

2.4.1 FPSO Cidade de São Mateus

O FPSO Cidade de São Mateus era uma unidade flutuante de produção, processamento, armazenagem e transferência de petróleo, que operava nos campos de Camarupim e Camarupim Norte, no Espírito Santo, a 120 quilômetros da costa. Originalmente era um navio petroleiro, tendo sido convertido para FPSO em um estaleiro em Cingapura no ano de 2008. A unidade operava em uma lâmina d'água de 792 metros e tinha o gás natural não associado a óleo como produção principal. A embarcação pertencia a empresa norueguesa *BW Offshore do Brasil Ltda. (BW)*, em campo sob concessão da Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras), também responsável pela segurança operacional da Unidade (ANP, 2015). Os principais dados da instalação encontram-se listados na Tabela 3.

Tabela 3: Dados da instalação

FPSO Cidade de São Mateus	
Lotação de pessoas (POB)	85
Capacidade de produção de óleo	4.000 m ³ /d
Capacidade de produção de gás	10.000.000 m ³ /d
Produção de óleo em 2014	0 m ³ /d
Produção de Condensado (oriundo da produção de gás, em 2014)	373,2 m ³ /d
Produção de Gás em 2014	2.242,07M m ³ /d
Capacidade de processamento de óleo	4.000m ³ /d
Capacidade de processamento de Gás Natural	10.000.000 Nm ³ /d
Capacidade de processamento de Gás Combustível	10.000.000 Nm ³ /d
Capacidade de armazenamento de Petróleo	160.396,20 m ³ /d

Fonte: ANP, 2015

2.4.2 Motivação para a escolha do cenário acidental

A ocorrência de grandes acidentes de processo gerou mudanças e avanços significativos na regulamentação, legislação e produção científica sobre segurança de processo a nível mundial. Porém, apesar do considerável histórico de acidentes envolvendo segurança de processos no decorrer da história, não houve muitos acidentes graves representativos a bordo de instalações offshore. Além disso, nota-se que poucos acidentes ocorridos em plataformas de petróleo foram investigados exaustivamente para permitir que a indústria petrolífera offshore internacional pudesse aprender lições que podem ser postas em prática noutras instalações. Dessa forma, é importante salientar que, nos últimos anos, apenas o acidente de Macondo e o do FPSO CDSM envolveram explosões ou incêndios, dos quais foram tirados importantes lições de prevenção de acidentes.

O acidente de explosão do FPSO CDSM ocorrido no setor offshore brasileiro em fevereiro de 2015 foi o acidente petrolífero offshore mais grave desde a explosão de Macondo nos EUA em 2010. Em outras palavras, não houve nenhum acidente comparável à explosão do CDSM, portanto, é crucial analisá-lo para obter o máximo de conhecimento possível sobre a prevenção de acidentes. (Vinnem, 2018). Outro aspecto considerado bastante significativo para a escolha do acidente do FPSO CDSM como base do estudo aqui proposto é o seu elevado número de erros relacionados com humanos, tanto em condições normais como de emergência (ANP, 2015). Por fim, o acidente grave que culminou na explosão do FPSO CDSM é representativo tanto por mostrar claramente exemplos de HFE como por evidenciar as particularidades presentes no contexto offshore. A Figura 4 apresenta o cronograma dos principais eventos do acidente de explosão do FPSO CDSM, porém o estudo de caso foca apenas nos eventos anteriores a ativação do alarme de detecção de gás dentro da sala de bombas.

Figura 4: Cronograma dos principais eventos do acidente de explosão do FPSO CDSM

11:26	11:27	11h27 – 11h29	11h30
Operador marítimo reduz a abertura da válvula de fornecimento de vapor da bomba de stripping de 32% para 10%, acreditando que a bomba de stripping iria parar.	O operador marítimo fecha a descarga da bomba de drenagem enquanto ela ainda estava funcionando	Aumento de pressão até o LOPC sem que a tripulação perceba	O operador de carga para a bomba de extração e abre as válvulas descarga.
11:31	11h40 – 11h42	11h49 – 11h54	11:56
A detecção de gás dentro da sala de bombas ativa o alarme de gás, fechamento automático de dampers e parada de ventilação. A nuvem de gás está encerrada dentro da sala de bombas.	O comando do incidente avalia a situação. Opta-se por enviar pessoas para dentro da sala de bombas para identificar a causa da detecção de gás.	O primeiro ERT entra na sala de bombas apesar da presença de gás e identifica o ponto de vazamento.	O líder da ERT reporta ao comando de emergência as características do ponto de vazamento. É decidido enviar pessoas para limpar o vazamento e consertar o flange com vazamento.
12:07	12h20 – 12h27	12:27	12:38
O segundo ERT entra na sala de bombas apesar da presença de gás para avaliar a limpeza e a manutenção a ser realizada.	Reunir desmobilização parcial. A situação é considerada controlada pelo comando de emergência.	O terceiro ERT entra na sala de bombas apesar da presença de gás para realizar as tarefas de limpeza e manutenção.	A explosão ocorre enquanto o terceiro ERT tentava limpar o vazamento com água de mangueiras de incêndio.

Fonte: ANP (2015)

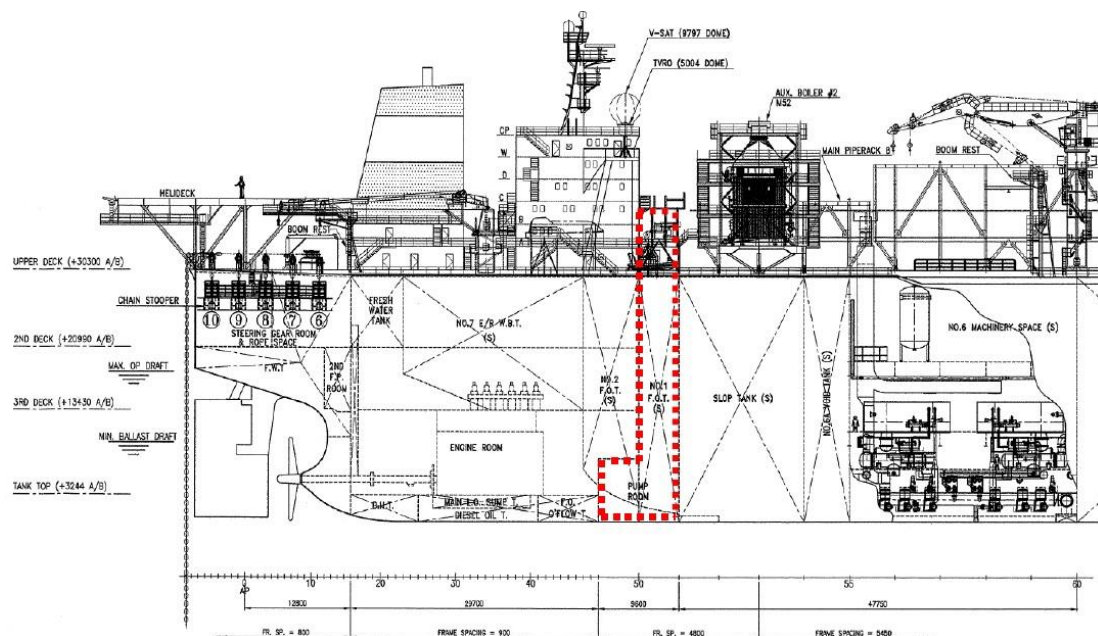
Diante do exposto, o acidente do CDSM é utilizado no estudo de caso proposto, a partir do qual é aplicado o método Petro-HRA relacionado às particularidades offshore como uma forma de auxiliar na melhoria das barreiras presentes no diagrama de *Bow Tie*, tornando-o mais eficiente para a segurança de processos. Em suma, espera-se que por meio das barreiras humanas do *Bow Tie* devidamente identificadas e analisadas seja possível obter resultados capazes de ter evitado a ocorrência da explosão no FPSO CDSM ou de ter mitigado as suas consequências.

2.4.3 Definição da tarefa

A tarefa crítica selecionada para o estudo pretendido é a operação da bomba de *stripping* com a descarga fechada, considerada como um fator determinante para a explosão ocorrida no FPSO CDSM (ANP, 2015). A fim de entender melhor as características da tarefa e sua relação com o cenário acidental, foram utilizados os dados disponíveis no Relatório de Investigação de Incidente da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) para auxiliar no desenvolvimento da análise da tarefa. A Figura 5 mostra a localização da casa de bombas, que ficava entre os tanques de carga e a praça de máquinas. Enquanto a Figura 6 apresenta um modelo 3D do interior da

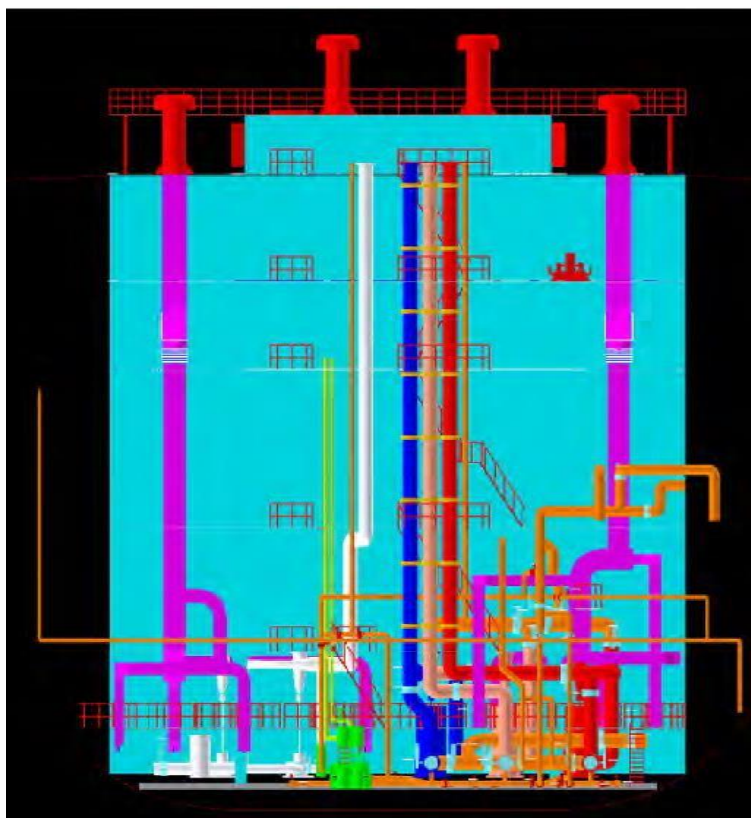
casa de bombas da plataforma CDSM, pelo qual é possível identificar a localização da bomba de stripping.

Figura 5: Posição da casa de bombas do FPSO Cidade de São Mateus



Fonte: ANP (2015)

Figura 6: Localização da Bomba de stripping (verde) no fundo da casa de bombas



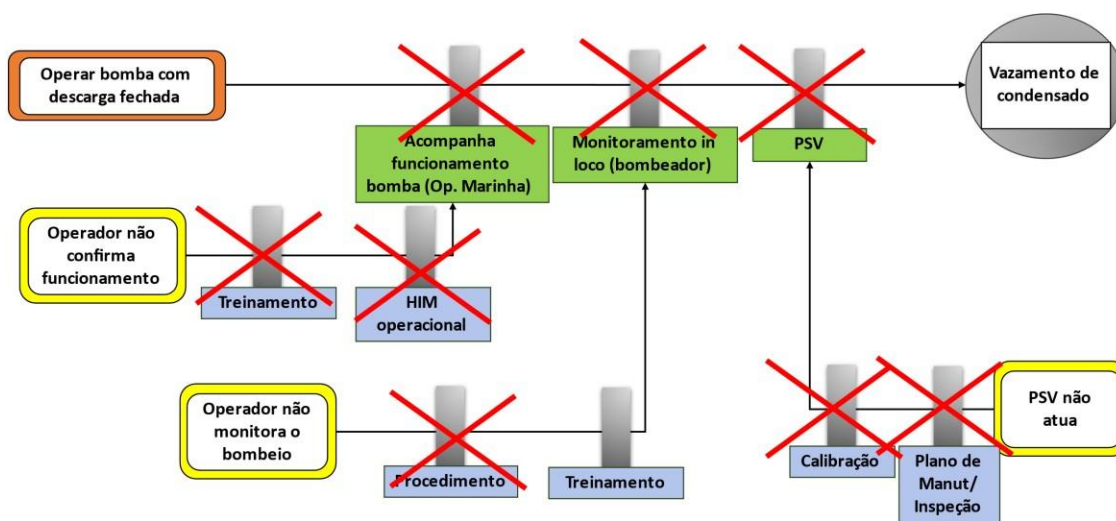
Fonte: ANP (2015)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Identificação das barreiras humanas no Diagrama de BowTie

Na Figura 7 são identificadas as barreiras preventivas existentes no FPSO CDSM para evitar o evento topo “Vazamento do condensado”. Com um X em vermelho foram marcados aqueles que após a investigação pelo órgão fiscalizador, pode-se afirmar que não estavam funcionais. O superintendente de marinha não possuía treinamento adequado para a função e o HIM não informava os dados necessários para que ele confirmasse o funcionamento da bomba. O monitoramento no local pelo bombeador não era procedimentado (o treinamento foi inconclusivo). E a PSV presente não possuía nenhum tipo de controle, não se podendo afirmar se ela não atuou por falha ou se seu *setpoint* não foi atingido para atuação.

Figura 7: Diagrama de BowTie com Barreiras Humanas e Fatores de degradação



PÚBLICA

Fonte: Elaborado pelos autores.

3.2. Aplicação da metodologia Petro-HRA

3.2.1 Definição do cenário

O desenvolvimento da descrição do cenário a ser analisado foi realizado de modo detalhado para que pudesse precisamente retratar como o cenário evoluiu. Assim, o estudo utilizou-se do Relatório de investigação de incidente do FPSO Cidade de São Mateus (ANP, 2015) para a captura de informações sobre a explosão na plataforma e do modelo recomendado pelo The Petro-HRA Guideline (IFE, 2022) para a descrição do cenário. De acordo com o relatório da ANP, a operação da bomba de stripping era realizada por meio de uma combinação de ações controladas via console e de ações solicitadas e reportadas pelo operador de campo. Tal fato acontecia porque a atualização do sistema não havia sido concluída conforme planejado no projeto de conversão, ou seja, os sistemas operacionais de transferência de carga permaneciam os mesmos de quando a unidade ainda era um navio petroleiro. No dia do acidente, o fechamento de todas as válvulas a jusante da bomba durante o seu funcionamento gerou uma sobrepressão no sistema que não foi percebida pela tripulação até a falha de um dispositivo de bordo. Com efeito, ocorreu um vazamento de condensado dentro da casa de bombas, resultando numa

explosão que causou nove mortes, vinte e seis ferimentos e danos gerais nas áreas contíguas da sala de bombas. A maioria das pessoas afetadas pela explosão estava dentro da nuvem de gás ou perto da entrada da sala de bombas. No entanto, uma pessoa morreu em seu ponto de encontro na sala de controle de máquinas e várias pessoas ficaram feridas pelos efeitos da explosão dentro do bloco de acomodações.

A Tabela 4 a seguir, apresenta a descrição do cenário de operação da bomba de stripping com a sua descarga fechada conforme o modelo presente no The Petro-HRA Guideline (IFE, 2022).

Tabela 4: Descrição do cenário

Operação da bomba de <i>stripping</i> com a descarga fechada			
Tópico	Descrição	Comentários	Ações
Sequência de eventos			
Iniciando evento	As válvulas a jusante da bomba de <i>stripping</i> são fechadas enquanto a bomba ainda está em funcionamento, causando uma sobrepressão na linha e por consequência um vazamento de gás com formação de atmosfera explosiva em ambiente fechado (casa de bombas).	As operações utilizando a bomba de <i>stripping</i> eram realizadas pelo operador de marinha através da Interface Homem-Máquina (IHM) relativa ao sistema de transferência de carga e através de ajuste do percentual de abertura da válvula de vapor e de monitoramento da pressão de descarga.	A operação da bomba de <i>stripping</i> com válvula da descarga fechada era recorrente. O manual de operação da bomba recomendava que o operador deveria acompanhar a partida do equipamento a fim de executar procedimentos de drenagem.
Eventos intermediários	Operador marítimo opera remotamente a bomba de <i>stripping</i> e abre as válvulas de descarga da bomba de <i>stripping</i> ; os alarmes de gás dispararam. Como três detectores localizados na parte inferior da sala de bombas detectaram gás, os sistemas automáticos fecham os <i>dampers</i> e desligaram o sistema de ventilação da sala de bombas, mas não interromperam a produção da plataforma. Exposição de pessoas durante as ações de resposta à emergência.	Existe um lapso de aproximadamente 1 minuto entre a abertura da válvula de sucção da bomba de <i>stripping</i> , que operava a 10% com as válvulas da descarga fechadas, e a parada da bomba. Somente após a parada da bomba a válvula da descarga foi aberta. Depois de 1 minuto, alarmou gás confirmado na casa de bombas.	Sequência: 11:26-Diminuição de 32 para 10% na alimentação de vapor da bomba. 11:27-fechamento da sucção 11:27- fechamento da descarga 11:29-abertura da sucção 11:30- válvula de alimentação de vapor da bomba é colocada em 0% (parada) 11:30-abertura da descarga 11:32-Detecção de gás confirmado

	Uso de mangueiras de incêndio não condutoras com jato d'água dentro de atmosfera explosiva		
Fim da sequência de eventos	Explosão na casa de bombas. Parada de Produção. Evacuação da unidade.		
Localização e ambiente externo			
Local do evento	Bacia do Espírito Santo	Operava nos campos de Camurim e Camurim Norte	
Condições ambientais externas	Lâmina d'água de 792 m	A Plataforma ficava a 42Km da costa	
Contexto do sistema e da tarefa			
Modo operacional	Operar a bomba de <i>stripping</i> com a descarga fechada	A operação da bomba de <i>stripping</i> com válvula da descarga fechada era recorrente.	
Sistema/barreiras de segurança	Controle através de IHM. Operador de área. Sistema de F&G.	O manual do fabricante da bomba e o HAZOP recomendavam que a partida da bomba fosse monitorada continuamente.	
Funções e responsabilidades	O operador de marinha era responsável por controlar a bomba	O operador de área deveria acompanhar a bomba em funcionamento no local.	O operador de área exercia outras atividades no momento do vazamento (mudança do alinhamento para os tanques)
Escala de tempo			
Duração do cenário	O bombeio se iniciou às 09h (11/02/15). Às 11h31, o sistema de F&G detectou gás confirmado.	Houve um lapso de aproximadamente 1 minuto entre a abertura da válvula de sucção da bomba de <i>stripping</i> , que operava a 10% com as válvulas da descarga fechadas, e a parada da bomba.	

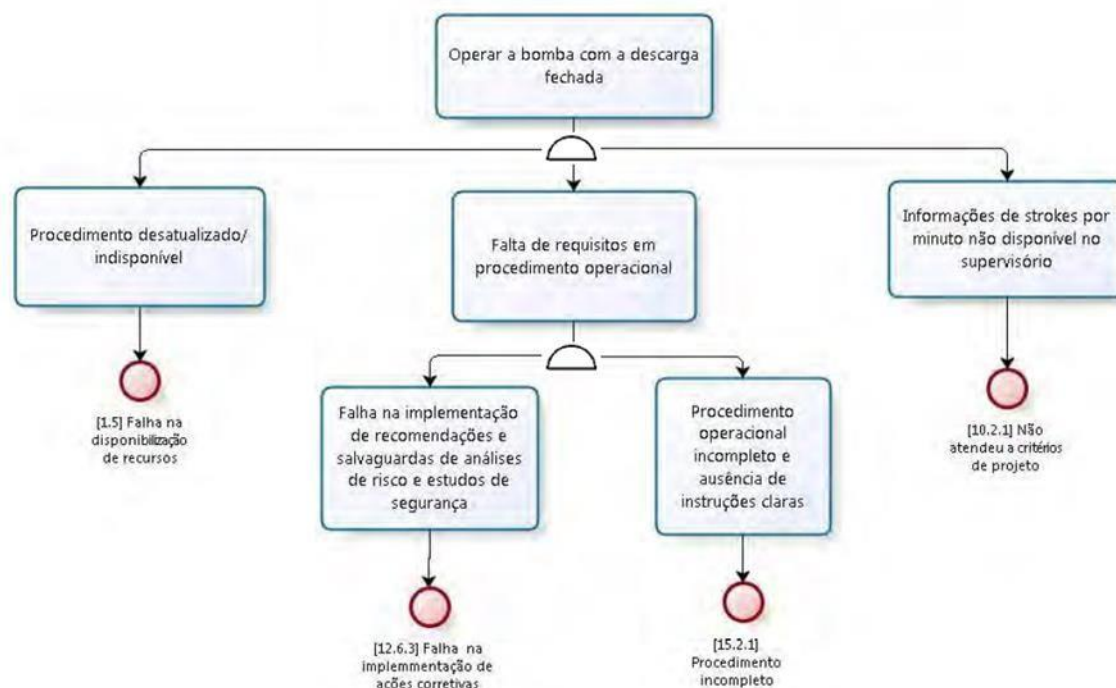
Fonte: *The Petro-HRA Guideline*, HFE (2022)

3.2.2 Coleta de dados qualitativos

Durante a coleta de dados qualitativos, o grupo buscou analisar o cenário do estudo de risco com base nas informações contidas no relatório de investigação da ANP e da Marinha do Brasil para entender melhor as características da tarefa e sua relação com o cenário de explosão. A Figura 8 é uma árvore de falhas do evento escolhido como foco do estudo, a operação da bomba de *stripping* com a descarga fechada. Na árvore

de falhas conseguimos coletar as informações das principais causas que levaram à situação em que se permitiu operar a bomba de *stripping* com suas linhas de descarga fechadas.

Figura 8: Fator causal operar a bomba de *stripping* com sua descarga fechada



Fonte: ANP (2015)

A investigação do acidente (ANP, 2015) verificou que tanto o manual da bomba de *stripping*, quanto o HAZOP de marinha, recomendavam que sua operação deveria ser acompanhada no local, a fim de procedimentos de drenagem ser realizados se necessário. Essa necessidade não estava prevista em nenhum procedimento, mas na prática ocorria com frequência.

O controle da vazão da bomba era realizado na IHM da sala de controle, através da porcentagem de abertura de válvula de admissão de vapor e monitoramento da pressão de descarga, que era visualizada em janela pop up na IHM. Portanto, o funcionamento da bomba era monitorado de forma indireta. O correto seria receber a informação do número de *Strokes* da bomba, que era previsto, mas não foi

implementado. Além do mais, outras condições fora o percentual de abertura da válvula de vapor influenciam na vazão da bomba, tais como a pressão e temperatura do vapor.

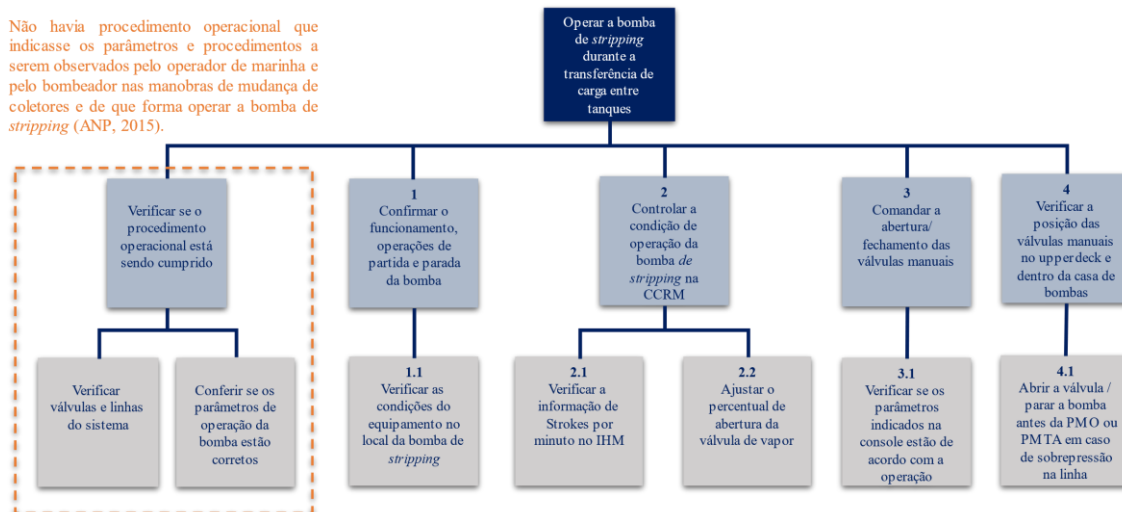
3.2.3 Análise da Tarefa

As tarefas críticas de segurança precisam ser representadas de forma que possam ser sistematicamente analisadas. Portanto, foi realizada uma Análise hierárquica de tarefa crítica (HTA) com base na execução da tarefa descrita no relatório de investigação elaborado pela ANP. A Tabela 5 indica as subtarefas relevantes para o cenário analisado e selecionadas para a etapa de quantificação do estudo de caso, enquanto a Figura 9 apresenta a Análise hierárquica de tarefa crítica (HTA).

Tabela 5: Descrição das tarefas críticas e das subtarefas selecionadas para o estudo de caso

Objetivo da tarefa 1:	Operar a bomba de <i>stripping</i> para a transferência de cargas entre os tanques
Subtarefa crítica 1.1:	Controlar o funcionamento da bomba de stripping remotamente (responsável: operador de marinha)
Subtarefa crítica 1.2:	Monitorar continuamente a bomba de stripping <i>in loco</i> (responsável: bombeador)
Objetivo da tarefa 2:	Controlar a sobrepressão na linha da descarga da bomba de <i>stripping</i>
Subtarefa crítica 2.1:	Abrir a válvula da descarga antes da PMO ou PMTA
Subtarefa crítica 2.2:	Desligar a bomba antes da PMO ou PMTA

Figura 9: Análise Hierárquica da Tarefa (HTA)



Fonte: Elaborado pelos autores

Premissas adotadas para seleção das subtarefas do procedimento crítico e desenvolvimento da análise hierárquica da tarefa (HTA):

- O grupo selecionou as subtarefas previstas no cenário acidental e nas quais os erros humanos foram determinantes para permitir a operação de uma bomba alternativa com a descarga fechada, provocando uma sobrepressão na linha e um vazamento de gás na casa de bombas, que levaram a explosão do FPSO e múltiplas fatalidades.
- O grupo achou relevante considerar a falha humana referente ao monitoramento da operação da bomba de *stripping* por um operador *in loco*, pois essa atividade fazia parte de uma salvaguarda prevista na análise de riscos do FPSO CDSM. Atualmente, sabemos que existem métodos mais seguros de realizar essa tarefa por meio de sistemas automatizados e essa função de monitoramento contínuo da operação da bomba não poderia ser exclusiva do operador.
- Apesar do aumento de pressão durante a operação de uma bomba de *stripping* com sua descarga fechada ser muito rápido e bastante difícil de ser controlado manualmente pelo operador, consideramos a possibilidade de interferência humana nessa etapa do processo com base no cenário do FPSO CDSM, que envolvia o operador em muitas funções e decisões importantes.

- Embora o relatório mencione que não havia procedimento disponível ou atualizado, o grupo considerou a existência de um procedimento operacional que indicasse os parâmetros e procedimentos a serem observados pelo operador de marinha e pelo bombeador nas manobras de mudança de coletores e de que forma operar a bomba de *stripping*. A decisão de manter essa subtarefa na HTA é pelo fato de se tratar de um procedimento indispensável para o controle dos riscos operacionais e para o desempenho das funções dos operadores de carga entre tanques com o uso da bomba de *stripping*.
- A etapa de verificação da informação de *Strokes* por minuto na IHM também foi considerada na análise hierárquica da tarefa, visto que a indicação do número de *Strokes* estava prevista no projeto de conversão do navio em FPSO, mas não havia sido implementada.

3.2.4 Identificação dos erros humanos

A etapa de identificação de erros humanos (HEI) tem a finalidade de identificar os possíveis erros relacionados as tarefas e subtarefas críticas mencionadas na etapa anterior de Análise de tarefas. Para identificar os erros humanos, utilizamos a taxonomia de erros da *Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach* (SHERPA; Embrey, 1986), que é a taxonomia recomendada no *The Petro-HRA Guideline* (IFE, 2022). Ao utilizar a taxonomia SHERPA, espera-se obter uma avaliação estruturada dos modos de erro, consequências, oportunidades de recuperação e PSFs. As Tabelas 6 e 7 foram utilizadas para a identificação dos possíveis erros humanos relacionados as subtarefas escolhidas para o estudo de caso.

Tabela 6: A taxonomia de erros SHERPA

Erros de Ação	Erros de Verificação
A1 - Operação muito longa/curta	V1 - Verificação omitida
A2 - Operação inoportuna	V2 - Verificação incompleta
A3 - Operação na direção errada	V3 - Verificação certa em objeto errado
A4 - Operação com muita ou pouca força	V4 - Verificação errada em objeto certo
A5 - Desalinhamento	V5 - Verificação no momento errado
A6 - Operação correta no objeto errado	V6 - Verificação errada no objeto errado
A7 - Operação errada no objeto certo	Erro de aquisição
A8 - Operação omitida	R1-Informação não obtida
A9 - Operação incompleta	R2-Informação errada obtida
A10 - Operação errada no objeto errado	R3-Informação incompleta
Erros de comunicação de informação	Erros de seleção
I1 - Informação não comunicada	S1 - Seleção omitida
I2 - Informação errada comunicada	S2 - Seleção errada feita
I3 - Comunicação de informação incompleta	

Fonte: The Petro-HRA Guideline, IFE (2022)

Tabela 7: Taxonomia adicional de erro de decisão

Erros de decisão
D1 - Decisão correta baseada em informação errada / ausente
D2 - Decisão incorreta baseada em informação certa
D3 - Decisão incorreta baseada em informação errada / ausente
D4 - Falha em tomar uma decisão (empasse)

Fonte: The Petro-HRA Guideline, IFE (2022)

A partir das taxonomias de erro foram identificados os possíveis erros humanos relacionados as subtarefas 1.1, 1.2, 2.1 e 2.2:

- Subtarefa 1.1 - Controlar o funcionamento da bomba de *stripping* remotamente.

O operador de marinha interpreta incorretamente a condição de operação da bomba de *stripping* e fecha a descarga da bomba enquanto ela ainda estava em funcionamento. Tal fato é possível porque o operador se baseava em parâmetros inadequados para aferir o funcionamento da bomba, como o percentual de abertura da válvula de controle de vapor. Embora a indicação de número de *strokes* por minuto estivesse prevista no projeto da bomba de *stripping*, ela não havia sido implementada. Portanto, cabia ao operador de marinha com a sua experiência interpretar a relação entre percentual de abertura da válvula de

controle de vapor e o número de *strokes*, considerando as diferentes variáveis do processo. Como resultado do fechamento das válvulas, ocorreu um aumento de pressão no sistema que não foi identificado de imediato por não haver indicador de pressão da descarga da bomba para o operador marítimo. Assim, para que a tripulação monitorasse a pressão do sistema, o operador de campo deveria estar no local da bomba de *stripping* durante a sua operação, o que não ocorreu.

Erro de verificação: V6 - Verificação errada no objeto errado

- Subtarefa 2 - Monitorar a bomba de *stripping in loco*.

O bombeador falha no monitoramento da operação da bomba de *stripping*, pois ele não está presente no local durante o seu funcionamento. A operação local da bomba de *stripping* era realizada seguindo instruções do operador marítimo, principalmente porque algumas válvulas não podiam ser operadas remotamente a partir do console do operador marítimo, visto que a atualização do sistema não havia sido concluída conforme foi planejado no projeto de conversão. Assim, o operador de campo concentrou suas atividades na operação de válvulas e na verificação de sua posição em vez de monitorar a operação do sistema e informar ao operador marítimo do seu funcionamento. Apesar de uma recomendação de avaliação de risco solicitar monitoramento constante da bomba de *stripping* durante seu funcionamento, o procedimento operacional não contemplava tal regra de segurança operacional, e monitorar a pressão do sistema era algo não realizado pela tripulação.

Erro de verificação: V1 - Verificação omitida

- Subtarefa 2.1 - Abrir a válvula de descarga antes da PMO ou PMTA.

A operação da bomba de *stripping* com a descarga fechada era recorrente. O operador de marinha inferia a vazão da bomba de *stripping* indiretamente e através da porcentagem de abertura da válvula de vapor e da pressão da descarga (visualizada em janela pop up no supervísório). Ele não tinha disponível a informação principal, que era o número de *strokes* válvula. Embora a indicação

de número de *strokes* por minuto estivesse prevista no projeto da bomba de *stripping*, ela não havia sido implementada. Portanto, cabia ao operador de marinha com a sua experiência interpretar a relação entre percentual de abertura da válvula de controle de vapor, considerando as diferentes variáveis do processo. Como resultado do fechamento das válvulas, ocorreu um aumento de pressão no sistema. Ressaltando que a bomba de *stripping* era alternativa, sendo capaz de proporcionar elevadas pressões de descarga de forma abrupta. Assim, o operador de campo deveria estar no local da bomba de *stripping* durante a sua operação, o que não ocorreu. Então, conclui-se que operador tinha muito pouco tempo e pouca orientação situacional para abrir a válvula de descarga antes que a pressão se elevasse perigosamente.

Erro de verificação: A1 - Operação muito longa/curta

- Subtarefa 2.2 - Parar a bomba de *stripping* antes de atingir a PMO ou PMTA

A bomba de *stripping* era do tipo alternativa, que são capazes proporcionar elevadas pressões de descarga e aumento subido de pressão em líquidos não compressíveis, como condensado. Então, como a monitoração da operação da bomba era feita de forma indireta, o operador da sala de controle necessitava da confirmação do operador de campo, mesmo porque o fechamento da válvula de vapor poderia falhar. Ele poderia parar a bomba localmente caso constataste algum problema. Entretanto, caso a bomba excedesse as pressões máximas, o mais provável seria a ruptura de algum trecho de tubulação, o que aconteceu de fato e dificilmente ambos os operadores conseguiriam parar a bomba a tempo de evitar um incidente.

Erro de verificação: R3 – Informação Incompleta

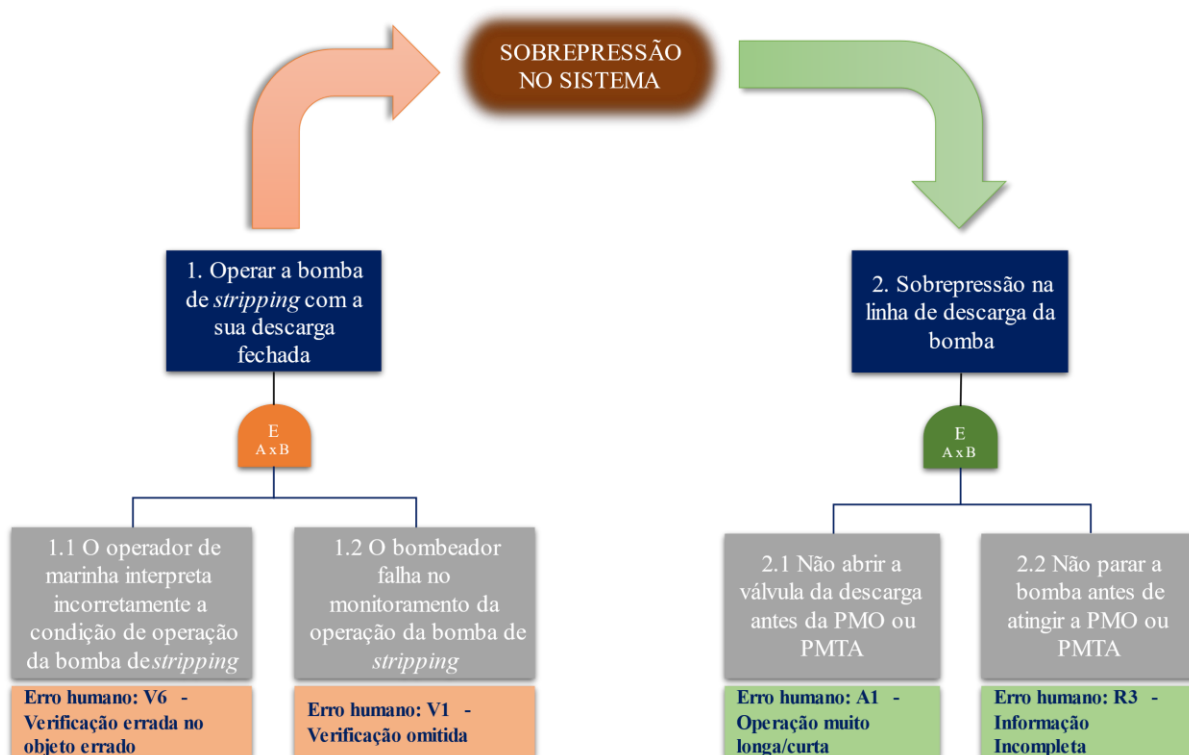
3.2.5 Modelagem de erros humanos

A quinta etapa da HRA se concentra em modelar os erros humanos por meio da construção de uma árvore de falhas para a operação da bomba de *stripping* durante a transferência de cargas entre os tanques. A árvore de falhas é exemplificada na Figura 10 com as subtarefas associadas a erros relacionados à ação humana.

Primeiramente, verificou-se as possíveis falhas humanas que fizeram com que a bomba operasse com a sua descarga fechada. Uma delas diz respeito ao monitoramento através dos parâmetros de percentual de abertura da válvula de controle de vapor e pressão de descarga, medidas indiretas do deslocamento da bomba alternativa que levaram à falha de interpretação da condição operacional da bomba de stripping. Assim, o operador marítimo decidiu fechar a descarga da bomba acreditando que ela não estava em operação. Outra falha humana que contribuiu para a operação da bomba de *stripping* com sua descarga fechada tem relação com o monitoramento da operação da bomba realizado pelo bombeador, uma vez que ele deveria confirmar as condições de operação da bomba para o operador de marinha. Dessa forma, ambas as falhas contribuíram para a operação da bomba de *stripping* com sua descarga bloqueada, que por sua vez gerou um aumento de pressão no sistema.

Considerando a sobrepressão da linha de descarga da bomba, achamos importante identificar quais as possíveis falhas humanas poderiam ter contribuído para esse aumento bastante significativo na pressão do sistema. Nesse sentido, consideramos que numa identificação de sobrepressão o operador poderia ter deixado de abrir a válvula de descarga e de parar a bomba antes de atingir a PMO ou PMTA. Embora não se possa depositar toda essa responsabilidade no operador, entendemos que isso seria uma opção a ser avaliada diante de um cenário com tanto foco em ações humanas.

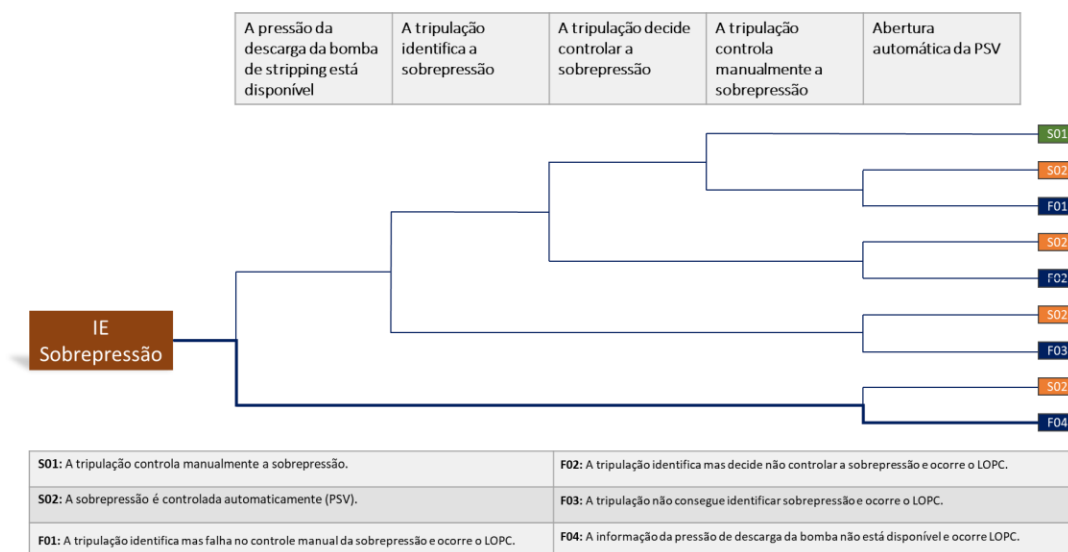
Figura 10: Árvore de falhas para a operação da bomba de *stripping*



Fonte: Elaborado pelos autores

Em virtude da sobrepressão ter sido um fator bastante relevante para a perda de contenção, o grupo optou por elaborar uma árvore de eventos com o intuito de detalhar como seria o controle da sobrepressão gerada pela operação da bomba de *stripping* com a descarga fechada caso houvesse tempo suficiente para uma intervenção humana. A Figura 11 exemplifica os casos de sucesso e de falhas para esse controle do aumento da pressão no sistema.

Figura 11: Árvore de eventos para o Controle de sobrepressão gerado pela operação da bomba de *stripping* com a descarga fechada



Fonte: Elaborado pelos autores

As seguintes premissas foram adotadas para a elaboração da árvore de falhas no estudo:

- A árvore de falhas apresentada exemplifica apenas as possíveis falhas humanas para que a bomba operasse com a sua descarga fechada e para que houvesse uma sobrepressão na linha de descarga na bomba. Vale ressaltar que a PSV era passível de falha e existia uma alta probabilidade dela não funcionar devido o relatório da ANP apontar que não havia evidências da sua manutenção e calibração.
- O grupo achou relevante considerar a falha humana referente ao monitoramento da operação da bomba de *stripping* por um operador *in loco*, pois essa atividade fazia parte de uma salvaguarda identificada na análise de riscos do FPSO CDSM.
- O grupo considerou a possibilidade de interferência humana na árvore de falhas e na árvore de eventos de sobrepressão, embora o aumento de pressão durante a operação de uma bomba de *stripping* com sua descarga fechada seja muito rápido e bastante difícil de ser controlado manualmente pelo operador.

3.2.6 Quantificação de erros humanos

Na análise de confiabilidade humana utilizada, os fatores humanos serão analisados como fatores influenciadores de desempenho (PSFs). Os PSFs provavelmente afetarão o desempenho do operador, positivamente ou negativamente (IFE, 2022).

Conforme mencionado no *The Petro-HRA Guideline*, “Um PSF é um aspecto das características individuais, ambiente, organização ou tarefa do ser humano que especificamente reduz ou melhora o desempenho humano, aumentando ou diminuindo, respectivamente, a probabilidade de erro humano” (Boring & Blackman, 2007, p. 177). Sendo assim, os fatores influenciadores de desempenho estarão presentes nessa etapa de quantificação. Na metodologia Petro-HRA estão incluídos nove fatores modeladores de desempenho (PSFs), são eles:

1. Tempo;
2. Estresse por ameaça;
3. Complexidade da tarefa;
4. Experiência/Treinamento;
5. Procedimentos;
6. Interface Homem-Máquina;
7. Atitudes em relação à segurança, trabalho e apoio à gestão;
8. Equipe;
9. Ambiente Físico de Trabalho.

Para a quantificação dos erros humanos, foi preenchida uma planilha de quantificação resumida disponibilizada no *The Petro-HRA Guideline* para cada sub tarefa selecionada no estudo de caso (Tabelas de 8 a 11). O formulário contém os 9 PSFs, para os quais são atribuídos níveis com base na sua relevância para contribuição com o erro humano potencial. Com esses dados preenchidos, calculamos a probabilidade de ocorrência de erro humano (HEP) para cada evento multiplicando-se o HEP nominal (0,01) por cada um dos multiplicadores correspondentes aos Níveis PSFs selecionados.

Destaca-se que as subtarefas para as quais encontramos HEP maior que 1, consideramos o HEP igual a 1, por ser uma orientação do método Petro-HRA visto que o HEP consiste em probabilidade e deve estar entre 0 e 1. As Figuras 12 e 13 apresentam o cálculo da probabilidade de erro humano das subtarefas 1.1, 1.2, 2.1 e 2.2.

Tabela 8: Planilha de quantificação resumida Petro-HRA para sub tarefa 1.1

Tabela resumo dos fatores influenciadores de Petro-HRA			
Instalação	FPSO CDSM		
Data	11/02/2015		
ID e descrição do evento de falha humana (HFE)	Subtarefa 1.1 - O operador marítimo falha na interpretação dos dados da console e na detecção do funcionamento da bomba V6 – Verificação errada no objeto errado		
Cenário do evento de falha humana	Fechamento da descarga da bomba de stripping enquanto a bomba ainda estava funcionando, provocando um aumento (desvio) de pressão do sistema.		
Analistas	Fernanda Ribeiro, Rodrigo Nogueira, Etyane Dantas, Samir Bressame e Cleiton Felizardo		
Cálculo da Probabilidade de Erro Humano (HEP)	HEP = 0,01x1x25x10x15x50x1x10x10x10		
Fatores influenciadores de Desempenho (PSFs)	Níveis PSF	Multiplicador	Fundamentação: razões específicas para a seleção do nível PSF
Tempo disponível	Efeito negativo extremamente alto	HEP=1	Este fator influenciador de desempenho não é relevante para esta tarefa ou cenário por ser apenas uma questão de interpretação dos dados indicados pela IHM.
	Efeito negativo muito alto	50	
	Efeito negativo moderado	10	
	Efeito nominal	1	
	Efeito positivo moderado	0,1	
	Não aplicável.	1	
Estresse à ameaça	Alto efeito negativo	25	O operador possui uma sobrecarga causada por problemas sistêmicos e uma função de bastante responsabilidade, considerada de grande impacto na Segurança Operacional de uma unidade de produção flutuante.
	Baixo efeito negativo	5	
	Efeito negativo muito baixo	2	
	Efeito nominal no	1	
	Não é aplicável	1	
Complexidade da tarefa	Efeito negativo muito alto	50	A tarefa de detectar o funcionamento da bomba se torna complexa devido aos parâmetros utilizados para a detecção da operação da bomba e o excesso de atividades necessárias para a manutenção e operação do sistema de transferência de carga. O operador marítimo comandava parte das válvulas da sala de controle sem indicação de pressão de descarga da bomba e, embora grande parte das válvulas do sistema de transferência de carga fosse comandada através do sistema supervisor na CCRM pelo operador de marinha, algumas válvulas eram controladas através de comandos manuais no <i>upper deck</i> e no
	Efeito negativo moderado	10	
	Efeito negativo muito baixo	2	
	Efeito nominal	1	
	Baixo efeito positivo	0,1	
	Não é aplicável.	1	

			primeiro piso dentro da casa de bombas. Portanto, sua tarefa também dependia de informações e ações do operador de campo. Ressalta-se que o operador de marinha acumulava a função de superintendente de marinha, e por vezes até como bombeador, quando das férias de um dos bombeadores, evidenciando uma sobrecarga de trabalho e responsabilidade em uma função considerada de grande impacto na Segurança Operacional de uma unidade de produção flutuante.
Experiência/Treinamento	Efeito negativo extremamente alto	HEP=1	As tarefas como alinhamentos utilizados para movimentação de carga e operação das válvulas pela tela do IHM eram realizadas por operadores de marinha expatriados e mais experientes, porém havia falta de treinamento nos procedimentos existentes e falha na capacitação.
	Efeito negativo muito alto	50	
	Efeito negativo moderado	15	
	Baixo efeito negativo	5	
	Efeito nominal	1	
	Efeito positivo moderado	0,1	
	Não é aplicável.	1	
Procedimentos	Efeito negativo muito alto	50	O manual de operação da bomba indicava a realização de ações locais a serem realizadas durante operação de partida ou parada da bomba, mas não havia procedimento formal documentado para a operação da bomba.
	Alto efeito negativo	20	
	Baixo efeito negativo	5	
	Efeito nominal	1	
	Baixo efeito positivo	0,5	
	Não aplicável	1	
Interface Homen-Máquina	Efeito negativo extremamente alto	HEP=1	A indicação da informação de <i>strokes</i> por unidade de tempo da bomba de <i>stripping</i> não estava disponível para o operador de marinha por meio da tela do IHM na fase de operação da unidade. Também não havia indicação da pressão da descarga confiável, pois a informação da pressão de descarga da bomba era representada através de uma janela do tipo pop up, ou seja, possível de ser omitida na operação de demais sistemas. Registros dos operadores de marinha apontavam falta de confiabilidade nas informações disponíveis na CCR
	Efeito negativo muito alto	50	
	Efeito negativo moderado	10	
	Efeito nominal	1	
	Baixo efeito positivo	0,5	
	Não aplicável.	1	
Atitudes em relação à Segurança, Trabalho e Apoio da Gestão	Efeito negativo muito alto	50	Sistema de gerenciamento da segurança operacional deficiente, os

	Efeito negativo moderado	10	operadores não têm certeza sobre as regras e regulamentos que são importantes para realizar a tarefa.
	Efeito nominal	1	
	Efeito positivo moderado	0,5	
	Não aplicável.	1	
Trabalho em equipe	Efeito negativo muito alto	50	Degradação da equipe de marinha e ausência da função de supervisão. O operador de marinha acumulava funções e dependia de informações e ações do operador de campo para o manuseio de válvulas e medição da pressão na descarga da bomba, visto que alguns comandos de válvulas eram manuais e não havia indicação de pressão na CCR. Como bombeador tinha que verificar as válvulas, o monitoramento da operação da bomba ficava deficiente e o trabalho em equipe afetado.
	Efeito moderadamente negativo	10	
	Efeito negativo muito baixo	2	
	Efeito nominal	1	
	Baixo efeito positivo	0,5	
	Não aplicável.	1	
Ambiente Físico de Trabalho	Efeito negativo extremamente alto	HEP=1	Os sistemas estavam degradados, portanto o ambiente de trabalho é relevante para esta tarefa ou cenário.
	Efeito negativo moderado	10	
	Efeito nominal no desempenho	1	
	Não aplicável	1	

Fonte: The Petro-HRA Guideline, IFE (2022)

Tabela 9: Planilha de quantificação resumida Petro-HRA para sub tarefa 1.2

Instalação	FPSO CDSM		
Data	11/02/2015		
ID e descrição do evento de falha humana (HFE)	Subtarefa 1.2 - O operador de campo não monitora a operação da bomba V1 – Verificação omitida		
Cenário do evento de falha humana	Fechamento da descarga da bomba de stripping enquanto a bomba ainda estava funcionando, provocando um aumento (desvio) de pressão do sistema.		
Analistas	Fernanda Ribeiro, Rodrigo Nogueira, Etyane Dantas, Samir Bressame e Cleiton Felizardo		
Cálculo da Probabilidade de Erro Humano (HEP)	HEP = 0,01x1x5x50x15x50x1x10x10x10		
Fatores influenciadores de Desempenho (PSFs)	Níveis PSF	Multiplicador	Fundamentação: razões específicas para a seleção do nível PSF
Tempo disponível	Efeito negativo extremamente alto	HEP=1	O tempo para a leitura do manômetro é insignificante, porém o operador de campo tem muitas tarefas para realizar e por isso não tem tempo suficiente
	Efeito negativo muito alto	50	

	Efeito negativo moderado	10	para monitorar a operação da bomba com sucesso, que deveria ser de forma contínua.
	Efeito nominal	1	
	Efeito positivo moderado	0,1	
	Não aplicável.	1	
Estresse à ameaça	Alto efeito negativo	25	A operação era recorrente, porém a degradação dos sistemas e a sobrecarga de tarefas elevou o nível de estresse dos operadores.
	Baixo efeito negativo	5	
	Efeito negativo muito baixo	2	
	Efeito nominal no	1	
	Não é aplicável	1	
Complexidade da tarefa	Efeito negativo muito alto	50	O manual de operações marítimas solicitava que o operador de campo monitorasse a bomba de <i>stripping</i> sempre que possível, mas sem mencionar o que teria sido monitorado. No final, muitas tarefas foram atribuídas ao operador de campo longe do local da bomba, na parte inferior da sala de bombas, inclusive para abrir e fechar válvulas e verificar a posição das válvulas próximas ao convés principal.
	Efeito negativo moderado	10	
	Efeito negativo muito baixo	2	
	Efeito nominal	1	
	Baixo efeito positivo	0,1	
	Não é aplicável.	1	
Experiência/Treinamento	Efeito negativo extremamente alto	HEP=1	A experiência para leitura de um manômetro é algo bem básico para um(a) operador(a), porém o treinamento para a operação da bomba é deficiente para que o operador saiba todas as etapas das tarefas e como realizar. No FPSO CDSM eles não tinham isso estabelecido, portanto, não estavam bem treinados para a execução da tarefa
	Efeito negativo muito alto	50	
	Efeito negativo moderado	15	
	Baixo efeito negativo	5	
	Efeito nominal	1	
	Efeito positivo moderado	0,1	
	Não é aplicável.	1	
Procedimentos	Efeito negativo muito alto	50	O procedimento operacional não havia sido concluído de acordo com o projeto de conversão do navio. Além disso, análise de risco do sistema de carga considerou como salvaguarda que o operador de campo estaria no local da bomba de <i>stripping</i> durante todo o tempo em que ela estivesse em operação, porém esse monitoramento contínuo não foi incluído nos procedimentos operacionais. Provavelmente os operadores marítimos e de campo não tinham conhecimento de que o monitoramento da pressão de
	Alto efeito negativo	20	
	Baixo efeito negativo	5	
	Efeito nominal	1	
	Baixo efeito positivo	0,5	
	Não aplicável	1	

			descarga da bomba de <i>stripping</i> era considerado uma salvaguarda.
Interface Homen-Máquina	Efeito negativo extremamente alto	HEP=1	Considera-se que um manômetro seja uma interface muito básica na vida de um operador. Se tivesse uma indicação do limite máximo, poderíamos até pontuar como fator levemente positivo. Mas como não temos certeza disto, e nem sabemos se a escala é considerável, deixaremos como nominal.
	Efeito negativo muito alto	50	
	Efeito negativo moderado	10	
	Efeito nominal	1	
	Baixo efeito positivo	0,5	
	Não aplicável.	1	
Atitudes em relação à Segurança, Trabalho e Apoio da Gestão	Efeito negativo muito alto	50	Sistema de gerenciamento da segurança operacional deficiente, os operadores não têm certeza sobre as regras e regulamentos que são importantes para realizar a tarefa.
	Efeito negativo moderado	10	
	Efeito nominal	1	
	Efeito positivo moderado	0,5	
	Não aplicável.	1	
Trabalho em equipe	Efeito negativo muito alto	50	O trabalho em equipe tinha influência na operação, uma vez que o operador poderia ser pressionado pelo rádio com a sala de controle devido as diversas atribuições que o bombeador tinha com o operador marítimo.
	Efeito moderadamente negativo	10	
	Efeito negativo muito baixo	2	
	Efeito nominal	1	
	Baixo efeito positivo	0,5	
	Não aplicável.	1	
Ambiente Físico de Trabalho	Efeito negativo extremamente alto	HEP=1	Os sistemas estavam degradados, portanto o ambiente de trabalho poderia impactos negativos para esta tarefa
	Efeito negativo moderado	10	
	Efeito nominal no desempenho	1	
	Não aplicável	1	

Fonte: The Petro-HRA Guideline, IFE (2022)

Tabela 10: Planilha de quantificação resumida Petro-HRA para sub tarefa 2.1

Tabela resumo dos fatores influenciadores de Petro-HRA	
Instalação	FPSO CDSM
Data	11/02/2015
ID e descrição do evento de falha humana (HFE)	Subtarefa 2.1 – Abrir a válvula de descarga antes de atingir a PMO ou PMTA A1 – Operação muito longa/curta
Cenário do evento de falha humana	Não abrir a válvula a tempo
Analistas	Fernanda Ribeiro, Rodrigo Nogueira, Etyane Dantas, Samir Bressame e Cleiton Felizardo

Cálculo da Probabilidade de Erro Humano (HEP)	HPE = 0,01 x 50 x 5 x 10 x 5 x 20 x 1 x 10 x 10 x 10		
Fatores influenciadores de Desempenho (PSFs)	Níveis PSF	Multiplicador	Fundamentação: razões específicas para a seleção do nível PSF
<i>Tempo disponível</i>	Efeito negativo extremamente alto	HEP=1	Bombas alternativas são capazes de gerar elevação de pressão súbita na descarga. Seria um tempo de reação muito rápido dos operadores.
	Efeito negativo muito alto	50	
	Efeito negativo moderado	10	
	Efeito nominal	1	
	Efeito positivo moderado	0,1	
	Não aplicável.	1	
Estresse à ameaça	Alto efeito negativo	25	A operação era recorrente, porém a degradação dos sistemas e da gestão de pessoas elevou o nível de estresse dos operadores.
	Baixo efeito negativo	5	
	Efeito negativo muito baixo	2	
	Efeito nominal no	1	
	Não é aplicável	1	
Complexidade da tarefa	Efeito negativo muito alto	50	A tarefa de abrir uma válvula é relativamente simples, mas as condições de monitoração das variáveis de processo para determinar o momento correto de abrir a válvula tornavam a operação mais complexa.
	Efeito negativo moderado	10	
	Efeito negativo muito baixo	2	
	Efeito nominal	1	
	Baixo efeito positivo	0,1	
	Não é aplicável.	1	
Experiência/Treinamento	Efeito negativo extremamente alto	HEP=1	Não é possível precisar o grau de experiência dos operadores, mas sabemos que a operação era recorrente. Entretanto, pode se inferir que a baixa experiência dos ocupantes nos cargos de liderança refletia na operação.
	Efeito negativo muito alto	50	
	Efeito negativo moderado	15	
	Baixo efeito negativo	5	
	Efeito nominal	1	
	Efeito positivo moderado	0,1	
	Não é aplicável.	1	
Procedimentos	Efeito negativo muito alto	50	Apesar de prevista no manual de operação e HAZOP, não havia procedimento formal para a operação assistida localmente da partida da bomba.
	Alto efeito negativo	20	
	Baixo efeito negativo	5	
	Efeito nominal	1	
	Baixo efeito positivo	0,5	
	Não aplicável	1	
Interface Homen-Máquina	Efeito negativo extremamente alto	HEP=1	A vazão da bomba de <i>stripping</i> era inferida indiretamente pela

	Efeito negativo muito alto	50	porcentagem de abertura da válvula de vapor, portanto não tinha nenhuma precisão. A contagem do número de <i>strokes</i> da válvula na IHM era prevista no projeto, mas não foi implementada. A monitoração da pressão de descarga na IHM era por janela pop up.
	Efeito negativo moderado	10	
	Efeito nominal	1	
	Baixo efeito positivo	0,5	
	Não aplicável.	1	
Atitudes em relação à Segurança, Trabalho e Apoio da Gestão	Efeito negativo muito alto	50	Na época da ocorrência, havia mudança em cargos de liderança. Muitos riscos estavam mapeados e as ações para solucioná-los ainda estavam em andamento. Devido à substituição de pessoal, alguns cargos acumulavam funções.
	Efeito negativo moderado	10	
	Efeito nominal	1	
	Efeito positivo moderado	0,5	
	Não aplicável.	1	
Trabalho em equipe	Efeito negativo muito alto	50	A realização de muitas tarefas simultâneas prejudicava o trabalho em equipe.
	Efeito moderadamente negativo	10	
	Efeito negativo muito baixo	2	
	Efeito nominal	1	
	Baixo efeito positivo	0,5	
	Não aplicável.	1	
Ambiente Físico de Trabalho	Efeito negativo extremamente alto	HEP=1	Os sistemas estavam degradados. Válvulas davam passagem, sendo raqueteadas, aumentando o risco operacional.
	Efeito negativo moderado	10	
	Efeito nominal no desempenho	1	
	Não aplicável	1	

Fonte: The Petro-HRA Guideline, IFE (2022)

Tabela 11: Planilha de quantificação resumida Petro-HRA para sub tarefa 2.2

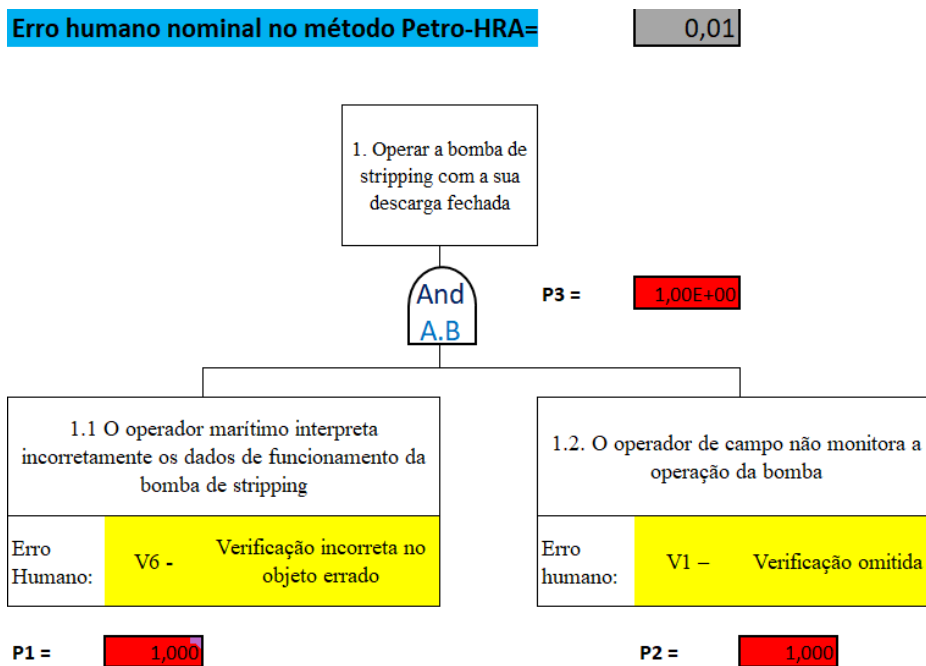
Tabela resumo dos fatores influenciadores de Petro-HRA	
Instalação	FPSO CDSM
Data	11/02/2015
ID e descrição do evento de falha humana (HFE)	Subtarefa 2.2 – Parar a bomba de <i>stripping</i> antes de atingir a PMO ou PMTA R3 – Informação Incompleta
Cenário do evento de falha humana	Não parar a bomba a tempo
Analistas	Fernanda Ribeiro, Rodrigo Nogueira, Etyane Dantas, Samir Bressame e Cleiton Felizardo
Cálculo da Probabilidade de Erro Humano (HEP)	$HPE = 0,01 \times 50 \times 5 \times 10 \times 5 \times 50 \times 1 \times 10 \times 10 \times 10$

Fatores influenciadores de Desempenho (PSFs)	Níveis PSF	Multiplicador	Fundamentação: razões específicas para a seleção do nível PSF
Tempo disponível	Efeito negativo extremamente alto	HEP=1	Bombas alternativas são capazes de gerar elevação de pressão súbita na descarga. Seja um tempo de reação muito rápido dos operadores.
	Efeito negativo muito alto	50	
	Efeito negativo moderado	10	
	Efeito nominal	1	
	Efeito positivo moderado	0,1	
	Não aplicável.	1	
Estresse à ameaça	Alto efeito negativo	25	A operação era recorrente, porém a degradação dos sistemas e da gestão de pessoas elevou o nível de estresse dos operadores.
	Baixo efeito negativo	5	
	Efeito negativo muito baixo	2	
	Efeito nominal no	1	
	Não é aplicável	1	
Complexidade da tarefa	Efeito negativo muito alto	50	A tarefa de abrir uma válvula é relativamente simples, mas as condições de monitoração das variáveis de processo para determinar o momento correto de abrir a válvula tornavam a operação mais complexa.
	Efeito negativo moderado	10	
	Efeito negativo muito baixo	2	
	Efeito nominal	1	
	Baixo efeito positivo	0,1	
	Não é aplicável.	1	
Experiência/Treinamento	Efeito negativo extremamente alto	HEP=1	Não é possível precisar o grau de experiência dos operadores, mas sabemos que a operação era recorrente. Entretanto, pode se inferir que a baixa experiência dos ocupantes nos cargos de liderança refletia na operação.
	Efeito negativo muito alto	50	
	Efeito negativo moderado	15	
	Baixo efeito negativo	5	
	Efeito nominal	1	
	Efeito positivo moderado	0,1	
	Não é aplicável.	1	
Procedimentos	Efeito negativo muito alto	50	Apesar de prevista no manual de operação e HAZOP, não havia procedimento formal para a operação assistida localmente da partida da bomba.
	Alto efeito negativo	20	
	Baixo efeito negativo	5	
	Efeito nominal	1	
	Baixo efeito positivo	0,5	
	Não aplicável	1	
Interface Homen-Máquina	Efeito negativo extremamente alto	HEP=1	A vazão da bomba de stripping era inferida indiretamente pela porcentagem de abertura da válvula de vapor, portanto não tinha nenhuma
	Efeito negativo muito alto	50	

	Efeito negativo moderado	10	precisão. A contagem do número de strokes da válvula na IHM era prevista no projeto, mas foi implementada. A monitoração da pressão de descarga na IHM por janela pop up.
	Efeito nominal	1	
	Baixo efeito positivo	0,5	
	Não aplicável.	1	
Atitudes em relação à Segurança, Trabalho e Apoio da Gestão	Efeito negativo muito alto	50	Na época da ocorrência, havia mudança em cargos de liderança. Muitos riscos estavam mapeados e as ações para solucioná-los ainda estavam em andamento. Devido à substituição de pessoal, alguns cargos acumulavam funções. A degradação dos sistemas elevava ainda mais o risco operacional.
	Efeito negativo moderado	10	
	Efeito nominal	1	
	Efeito positivo moderado	0,5	
	Não aplicável.	1	
Trabalho em equipe	Efeito negativo muito alto	50	A realização de muitas tarefas simultâneas prejudicava o trabalho em equipe.
	Efeito moderadamente negativo	10	
	Efeito negativo muito baixo	2	
	Efeito nominal	1	
	Baixo efeito positivo	0,5	
	Não aplicável.	1	
Ambiente Físico de Trabalho	Efeito negativo extremamente alto	HEP=1	Os sistemas estavam degradados. Válvulas davam passagem, sendo raqueteadas, aumentando o risco operacional.
	Efeito negativo moderado	10	
	Efeito nominal no desempenho	1	
	Não aplicável	1	

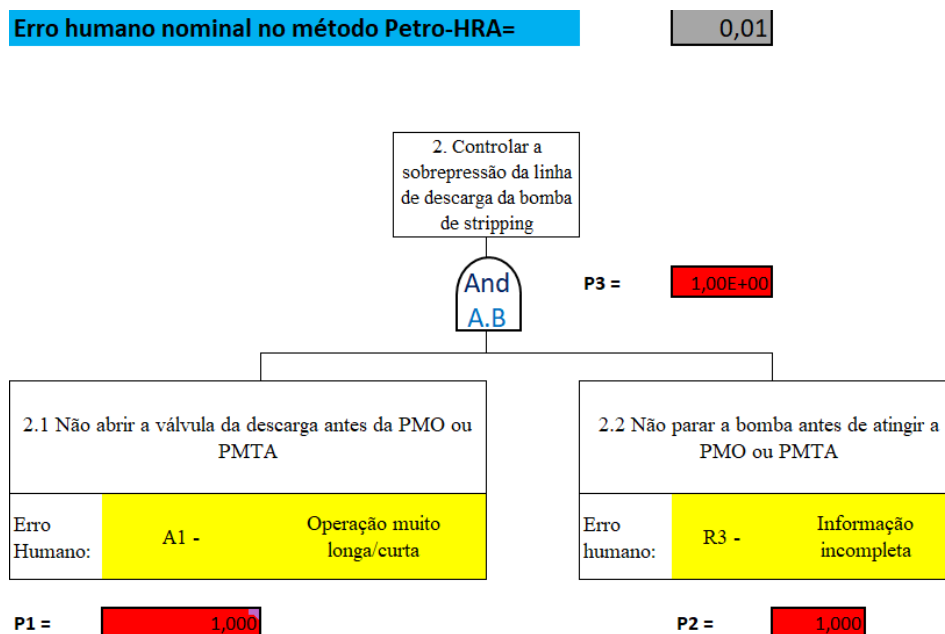
Fonte: The Petro-HRA Guideline, IFE (2022)

Figura 12: Cálculo da probabilidade de erro humano das subtarefas 1.1 e 1.2



Fonte: Elaborada pelos autores

Figura 13: Cálculo da probabilidade de erro humano das subtarefas 2.1 e 2.2



Fonte: Elaborada pelos autores

3.2.7 Redução de erros humanos

Durante a etapa da quantificação dos erros humanos foi possível avaliar quais são os PSFs mais relevantes para o desempenho humano e que devem ser analisados de maneira mais criteriosa para a redução das falhas humanas, são eles:

- IHM - Disponibilidade de parâmetros adequados na CCRM

A utilização de parâmetros de percentual de abertura da válvula de controle de vapor e pressão de descarga levou à falha de interpretação da condição operacional da bomba de *stripping*, visto que são medidas indiretas do deslocamento da bomba alternativa. A medida direta do deslocamento da bomba seria dada pelo número de *strokes*. Além disso, o operador marítimo controlou a bomba de *stripping* e parte das válvulas da sala de controle sem indicação de pressão de descarga da bomba, pois o único indicador de pressão disponível para o sistema foi instalado na descarga da bomba, dentro da casa de bombas, e cinco andares abaixo do convés principal. Portanto, para reduzir as falhas humanas é preciso garantir que todos os sistemas necessários para o início da operação da unidade estejam aderentes ao projeto, implementados, comissionados e disponíveis para a execução da tarefa.

- Procedimentos – Disponibilidade de procedimentos

A análise de risco do sistema de carga considerou como salvaguarda que o operador de campo estaria no local da bomba de *stripping* durante todo o tempo em que ela estivesse em operação. Não foi incluído nos procedimentos operacionais e não foi observado durante a tarefa que originou o acidente. Há evidências que mostram que os operadores marítimos e de campo não estavam cientes de que o monitoramento da pressão de descarga do SP era considerado uma salvaguarda. Uma estratégia para aprimorar o desempenho humano na tarefa crítica em questão seria desenvolver e implementar procedimentos operacionais claros e acessíveis, garantindo que estejam sempre atualizados, disponíveis e adequados antes do início de qualquer operação. É essencial que esses procedimentos forneçam instruções precisas e estabeleçam diretrizes claras para

controlar os riscos operacionais, delineando tanto o que deve ser feito quanto o que deve ser evitado durante a execução das atividades.

- Complexidade de execução da tarefa

O manual de operações marítimas solicitava que o operador de campo monitorasse a bomba de *stripping* sempre que possível, mas sem mencionar o que teria sido monitorado. No final, muitas tarefas foram atribuídas ao operador de campo longe do local da bomba, na parte inferior da sala de bombas, inclusive para abrir e fechar válvulas e verificar a posição das válvulas próximas ao convés principal. Simplificar procedimentos e processos operacionais pode diminuir a complexidade das tarefas, especialmente quando há padronização e análise do tempo necessário para executar cada etapa. A integração de tecnologias inovadoras, como sistemas de automação, pode tornar as atividades menos complexas e impulsionar a eficiência operacional.

- Treinamento

O novo superintendente de marinha estava ainda em processo de familiarização com os sistemas do FPSO Cidade de São Mateus. Não havia ocorrido ainda algum tipo de tutoria ou treinamento do superintendente com um antigo efetivo na função. Foi possível evidenciar a atuação efetiva do superintendente de marinha na tomada de decisões, sem ter pleno conhecimento das condições dos sistemas e das características específicas do FPSO, constatando-se que a capacitação não foi planejada ou eficaz para o novo superintendente de marinha. Havia uma matriz de treinamento para toda a força de trabalho a bordo do FPSO CDSM para treinamentos considerados mandatórios pela Operadora da Instalação (NR-10, NR-34, CBSP, HUET, entre outros). Todavia, não havia uma matriz de treinamento em procedimentos operacionais para as equipes a bordo do FPSO CDSM. Para reduzir a dependência do fator de treinamento, é crucial fornecer recursos adequados e estabelecer requisitos precisos para garantir a capacitação mínima exigida para cada cargo. Isso envolve a implementação de avaliações teóricas e práticas obrigatórias para todos os ocupantes de um cargo, a fim de garantir que estejam aptos a desempenhar todas as funções relacionadas a ele. O investimento em programas de treinamento contínuo, especialmente em procedimentos operacionais, é fundamental para promover a segurança do

processo e dos operadores. Além disso, os procedimentos críticos devem ser submetidos a uma frequência de reciclagem diferenciada, refletindo sua importância e complexidade.

Como podemos observar, a análise quantitativa de HPE demonstra que a atividade falharia invariavelmente em algum momento por múltiplos fatores.

Segundo Mattos e Falco (1998), as bombas alternativas apresentam, de modo geral, as seguintes características:

- baixa vazão e alta pressão;
- vazão pulsátil;
- vazão média independente das características do sistema;
- necessidade de válvula de alívio na linha de descarga (junto a bomba e antes de qualquer válvula).

O fato da bomba de *stripping* ser alternativa torna a sua partida inerentemente arriscada, mesmo com operação assistida localmente, pois quando utilizado no bombeio de fluidos incompressíveis, pode aumentar a pressão de forma abrupta. Sua capacidade de fornecer altas pressões na descarga e seu funcionamento pulsátil pode gerar fortes golpes de aríete em válvulas e raquetes em linhas. Geralmente bombas alternativas são usadas para aplicações nas quais grandes pressões têm que ser vencidas. No caso de transferência entre tanques com pressões próximo a atmosférica, bombas centrífugas seriam mais indicadas e dessa forma a operação com a válvula de descarga poderia ser tolerada.

Então, não se devia considerar uma redução de risco de erros humanos para a atividade de operar a bomba *stripping* com a descarga fechada. A degradação dos sistemas de transferência entre tanques, que tiveram válvulas que estavam dando passagem raqueteadas, aumentou ainda mais o risco da operação.

Não havendo a possibilidade de substituição do tipo de bomba, a gestão deveria implementar intertravamento lógicos, que não permitisse alinhamentos com a descarga da bomba fechada. Bem como a implementação da contagem de Strokes da bomba no supervisória e a continua disponibilidade da pressão de descarga na tela. Dessa forma, o risco passaria a ser influenciado pelo SIL (Safety Integrity Level) dos sistemas de instrumentação. Nesse novo cenário, outras análises seriam necessárias para definir a HEP, de tarefas como bypass de instrumentos e outras.

3.3. Análise das ações e melhoria das barreiras humanas no diagrama bow tie

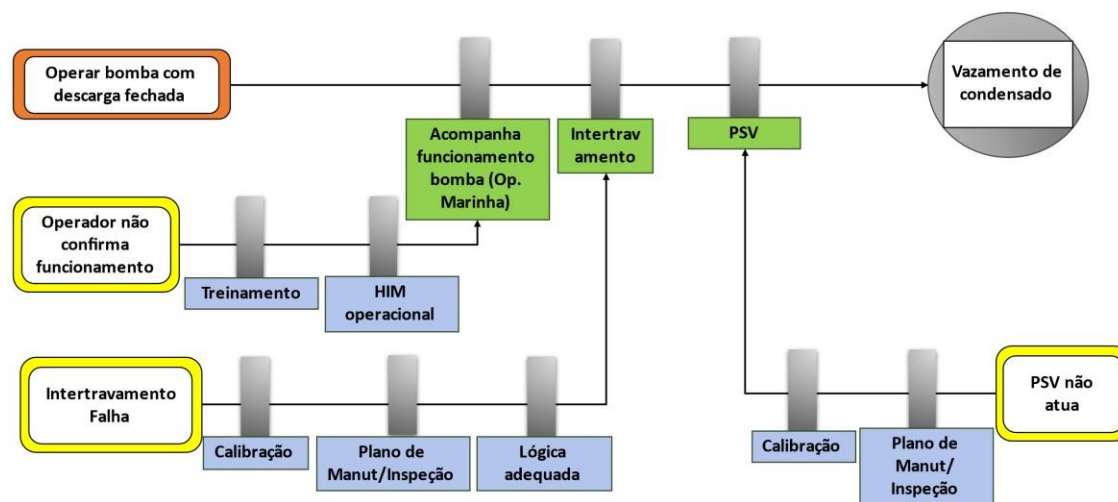
Na figura 14 pode-se verificar o Bow tie com as barreiras preventivas para o evento “Operar bomba com descarga fechada”. A barreira de intertravamento foi adicionada para garantir que não haja o acionamento da bomba com descarga fechada ou que haja o alinhamento com a descarga fechada. Assim como os devidos controles do fator de degradação para que o Intertravamento não falhe, sendo eles a devida Calibração dos sensores, um Plano de Manutenção/Inspeção rodando e uma lógica adequada às variáveis do sistema.

Para a ação superintendente da marinha que opera a bomba, foi adicionada barreira humana, conforme Manual de Bow tie do CCPS (CCPS, 2018), com seus respectivos controles de fator de degradação. Onde seu fator de degradação seria o operador da bomba não confirma o funcionamento (ou não) da bomba na operação. E os controles desse fator de degradação são um treinamento adequado às funções executadas e um HIM operacional e que traga as informações necessárias para o operador tomar decisões.

Adicionalmente, mantém-se a PSV como barreira, também com seus controles de fator de degradação. Sendo o seu fator de degradação a não atuação da PSV devido à falha ou set point inadequado. Logo, seus controles são a adequada calibração da PSV e um registro de Plano de Manutenção/Inspeção rodando.

Baseado na premissa de que as barreiras sofrem degradação ao longo do tempo, o *Bow Tie* elaborado representa em sua estrutura os fatores que comprometem a integridade das barreiras e o que deve ser feito para garantir que as mesmas se mantenham em alto nível de confiabilidade.

Figura 14: Diagrama *Bowtie* elaborado com melhorias



PÚBLICA

Fonte: Elaborada pelos autores

3.4. Dificuldades e oportunidades

A metodologia empregada permite identificar os fatores influenciadores de desempenho de forma clara e correlacionar eles com as barreiras existentes num diagrama de *Bow Tie*. Um diagrama de *Bow tie* na indústria é comumente utilizado para barreiras físicas, químicas ou tecnológicas (equipamentos e sistemas), entretanto também é um recurso que permite adicionar também barreiras humanas e entender como os fatores de degradação afetam e/ou aumentam a possibilidade de erros humanos.

Apesar de uma análise de confiabilidade humana ser muito importante para entender os fatores de degradação que impactam nas barreiras do Bow Tie que dependem da ação humana, a partir do estudo realizado foi possível identificar algumas limitações da metodologia Petro-HRA, que se refere à análise de confiabilidade humana na indústria petrolífera, algumas delas são:

- A análise depende das percepções e julgamentos de quem avalia os fatores influenciadores de desempenho, o que pode levar a vieses individuais ou grupais.

- A análise pode não capturar completamente a complexidade das tarefas e do ambiente de trabalho em algumas situações.
- A confiabilidade da análise pode depender da disponibilidade e qualidade dos dados sobre incidentes anteriores.
- Probabilidade de inconsistências nos resultados da análise devido as abordagens e critérios que podem variar entre os avaliadores.
- A metodologia pode não ser capaz de prever adequadamente comportamentos humanos inesperados ou eventos raros.
- Assim como qualquer outra metodologia, ela pode tornar-se obsoleta se não for atualizada regularmente para refletir as mudanças no ambiente de trabalho e na tecnologia.
- Requer pessoas bem treinadas e experientes para a realização de análises de confiabilidade humana de forma eficaz, o que pode ter um alto custo para a indústria e ser bastante demorado.

Portanto, ao aplicar a metodologia Petro-HRA, é essencial considerar todas essas limitações e explorar abordagens complementares para mitigar riscos e fortalecer a segurança na indústria petrolífera. Uma maneira de aprimorar a metodologia Petro-HRA é incorporar dados mais robustos e atualizados, juntamente com tecnologias de análise de dados avançadas e em tempo real, para aumentar a precisão e relevância das análises. Destaca-se a importância de uma abordagem dinâmica da confiabilidade humana, que leve em conta os aspectos comportamentais e psicológicos mais complexos e dados específicos do contexto offshore, como condições ambientais, tipos de equipamentos, procedimentos operacionais e desafios únicos enfrentados nesse ambiente. O ambiente offshore está sujeito a mudanças frequentes, como novas tecnologias, regulamentações atualizadas e lições aprendidas com incidentes passados. Portanto, a análise de confiabilidade humana resultaria em uma análise atualizada regularmente para refletir essas mudanças e garantir a relevância das análises antes do início da operação. Ao abordar essas áreas de melhoria, a metodologia Petro-HRA pode se tornar mais eficaz e relevante na avaliação e gestão da confiabilidade humana na indústria petrolífera.

4. CONCLUSÕES

O uso da metodologia Petro-HRA em conjunto com o diagrama de *bow tie* revelou-se uma abordagem eficaz para identificar, avaliar e gerenciar as barreiras humanas críticas em cenários de risco, como a transferência de carga entre os tanques em um FPSO. Ao destacar fatores de degradação humana específicos, como falhas cognitivas, erros de percepção e comunicação inadequada, pudemos priorizar melhorias nas barreiras existentes, fortalecendo assim a segurança operacional. A implementação de medidas como treinamento adequado, procedimentos operacionais atualizados e sistemas de supervisão robustos mostrou-se crucial para mitigar os efeitos adversos desses fatores. Além disso, é enfatizada a importância de estabelecer um processo contínuo de monitoramento e revisão das barreiras humanas, bem como a periodicidade na avaliação do desempenho dessas medidas, para garantir a eficácia contínua do sistema de segurança. Embora seja observado que há espaço para aprimoramento, a integração da metodologia Petro-HRA com o diagrama de *bow tie* representa um avanço significativo na gestão de riscos humanos e na prevenção de acidentes, como os ocorridos no FPSO Cidade de São Mateus. Em suma, ao adotar essa abordagem integrada, é possível elevar consideravelmente a capacidade do sistema de lidar com os desafios apresentados pelos fatores de degradação humana, resultando em operações mais seguras e eficientes na indústria petrolífera.

5. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. G. DE; VINNEM, J. E. Major accident prevention illustrated by hydrocarbon leak case studies: A comparison between Brazilian and Norwegian offshore functional petroleum safety regulatory approaches. *Safety Science*, v. 121, p. 652–665, jan. 2020.

BIRD, F.; GERMAIN, G.; CLARK, D. *Practical Loss Control Leadership*, 3rd Edition, DNV GL, Atlanta, 2003.

BYE, A.; LAUMANN, K.; TAYLOR, C.; RASMUSSEN, M.; ØIE, S.; VAN DE MERWE, K.; ØIEN, K.; BORING, R.; PALTRINIERI, N.; WÆRØ, I.; MASSAIU, S.; GOULD, K. PETRO-HRA, A NEW METHOD FOR HUMAN RELIABILITY ANALYSIS IN THE PETROLEUM INDUSTRY. 13th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM 13) 27 October 2016, Seoul, Korea, 2016.

CCPS - CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY OF THE AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS and ENERGY INSTITUTE. *BOW TIES IN RISK MANAGEMENT*. London, UK, 2018.

D.E. EMBREY, “SHERPA: A systematic human error reduction and prediction approach,” International Meeting on Advances in Nuclear Power Systems (1986).

FRANCA, J.; HADDAD, A.; SANTOS, I. Case Study: Human Factors Analysis of FPSO Operations Activities in Brazil. *ResearchGate. Anais...* In: SPE ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION 2019. 1 out. 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/335886210_Case_Study_Human_Factors_Analysis_of_FPSO_Operations_Activities_in_Brazil>. Acesso em: 20 dez. 2023.

FRANÇA, J.; HOLLNAGEL, E. Human Factors Approach to Assess Risks and Reliability in Offshore Operations with FRAM (Functional Resonance Analysis Method). In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE BRASIL. 17 out. 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/374799632_Human_Factors_Approach_to_Assess_Risks_and_Reliability_in_Offshore_Operations_with_FRAM_Functional_Resonance_Analysis_Method>. Acesso em: 10 jan. 2024

GORDON, R. P. E. The contribution of human factors to accidents in the offshore oil industry. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 61, n. 1-2, p. 95–108, jul. 1998.

GUIDANCE ON HUMAN FACTORS SAFETY CRITICAL TASK ANALYSIS | Energy Institute - Publishing. Disponível em: <<https://publishing.energyinst.org/topics/human-and-organisational-factors/risk-management/guidance-on-human-factors-safety-critical-task-analysis2>>. Acesso em: 10 out. 2023

HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE. *Reducing Error and Influencing Behaviour*. Structural Survey, v. 17, n. 3, set. 1999.

MARINHA DO BRASIL DIRETORIA DE PORTOS E COSTAS RELATÓRIO DE INVESTIGAÇÃO DE SEGURANÇA DE ACIDENTE MARÍTIMO FPSO CIDADE DE SÃO MATEUS EXPLOÇÃO SEGUIDA DE ALAGAMENTO, COM VÍTIMAS. 11 DE

FEVEREIRO DE 2015. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/dpc/sites/www.marinha.mil.br.dpc/files/fpso_cid_smateus_br.pdf>. Acesso em: 19 out. 2023.

MATTOS, E. E. ; FALCO, R. Bombas Industrials. – 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

PITBLADO, R.; POTTS, T.; FISHER, M.; GREENFIELD, S. A method for barrier-based incident investigation. *Proc. Safety Prog.*, 34,: 328-334. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/prs.11738>

RAMOS, M.; ALMEIDA, A.; MARTINS, M. Revisiting the FPSO São Mateus Accident From a Human Reliability Perspective Using Phoenix HRA Methodology. In: ASME 2020 39TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN, OFFSHORE AND ARCTIC ENGINEERING. 3 ago. 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/347904823_Revisiting_the_FPSO_Sao_Mateus_Accident_From_a_Human_Reliability_Perspective_Using_Phoenix_HRA_Methodology>. Acesso em: 20 out. 2023.

RELATÓRIO DE INVESTIGAÇÃO DO INCIDENTE DE EXPLOÇÃO OCORRIDO EM 11/02/2015 NO FPSO CIDADE DE SÃO MATEUS SUPERINTENDÊNCIA DE SEGURANÇA OPERACIONAL E MEIO AMBIENTE (SSM). [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/arquivos-relatorios-de-investigacao-de-incidentes/fpso-cidade-de-sao-mateus/relatorio-de-investigacao-fpso-cidade-de-sao-mateus.pdf>>. Acesso em: 4 set. 2023.

RR679: Review of human reliability assessment methods. Disponível em: <<https://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr679.htm>>. Acesso em: 10 out. 2023