

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Bruno Mühlmann Holanda



SEGURANÇA DE PROCESSO BASEADA EM RISCO: ESTUDO DE
CASO DE UM ACIDENTE EM UMA PLANTA DE OLEFINAS NOS
ESTADOS UNIDOS

RIO DE JANEIRO

2022

Bruno Mühlmann Holanda

SEGURANÇA DE PROCESSO BASEADA EM RISCO: ESTUDO DE CASO DE UM
ACIDENTE EM UMA PLANTA DE OLEFINAS NOS ESTADOS UNIDOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Orientador(es): Carlos André Vaz Júnior, D. Sc.
Carolina Zanon Costa, D. Sc.

Rio de Janeiro

2022

CIP - Catalogação na Publicação

H722s Holanda, Bruno Mühlmann
Segurança de processo baseada em risco: estudo de caso de um acidente em uma planta de olefinas nos Estados Unidos / Bruno Mühlmann Holanda. -- Rio de Janeiro, 2022.
86 f.

Orientador: Carlos André Vaz Júnior.
Coorientador: Carolina Zanon Costa.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Bacharel em Engenharia Química, 2022.

1. RBPS. 2. Gestão de Segurança. 3. Williams Geismar. 4. Acidente Químico. 5. Segurança de Processos. I. Vaz Júnior, Carlos André, orient. II. Costa, Carolina Zanon, coorient. III. Título.

Bruno Mühlmann Holanda

SEGURANÇA DE PROCESSO BASEADA EM RISCO: ESTUDO DE CASO DE UM
ACIDENTE EM UMA PLANTA DE OLEFINAS NOS ESTADOS UNIDOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Química da Universidade Federal do
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de Engenheiro
Químico

Aprovado em 10 de novembro de 2022.

Carlos André Vaz Júnior, D. Sc., Escola de Química - UFRJ

Carolina Zanon Costa, D. Sc., Escola de Química - UFRJ

Karen Signori Pereira, D. Sc., Escola de Química - UFRJ

Natália Ornellas Lobo Rodrigues, M. Sc., UFRJ

Rio de Janeiro
2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Marise e André, por todo o suporte ao longo da minha vida. É a vocês que eu devo o meu mais sincero obrigado por sempre estarem ao meu lado e me incentivarem a seguir meus sonhos. Nenhum agradecimento é suficiente para demonstrar minha gratidão.

Agradeço a Gabi, minha companheira sempre presente nesses anos de faculdade, com quem dividi experiências, cartas e trabalhos. Quem, além de todo apoio, sempre me deu carinho, amor e compreensão.

Agradeço aos meus orientadores Carlos André Vaz Júnior e Carolina Zanon Costa, por toda a ajuda técnica e atenção durante a elaboração desse trabalho.

Meu obrigado a Rosangela, que com carinho tanto me ensinou e me criou.

Meu obrigado a meus avós, Miriam, Joannito, Irene e Hilton que sempre apoiaram e torceram por mim.

Obrigado a José Paulo e Andrea. Sempre que precisei, vocês estavam dispostos a discutir novas ideias comigo durante nossos jantares.

Agradeço a meus amigos Arthur, Caio, Orlando, Elisa e Bia, que me ajudaram longe de casa e agora espero levar para vida.

Obrigado a meus amigos da EQ, Vinícius, Bruno e Júlia que desde 2017 se sentaram no canto da sala para dividirem as aulas comigo.

Agradeço aos meus amigos de longa data, João Pedro e Pedro, amigos que nem mesmo o tempo ou os oceanos conseguem separar.

Agradeço também a Milena, Brenda e Wants, novos agregados que se tornaram companheiros de vida e de casa.

Obrigado a todos os meus professores e a Escola de Química da UFRJ, por todos os ensinamentos transmitidos nesses últimos anos.

RESUMO

HOLANDA, Bruno M.. **Segurança de processo baseada em risco: estudo de caso de um acidente em uma planta de olefinas nos Estados Unidos**. Rio de Janeiro, 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

A ocorrência de acidentes químicos de grandes proporções no século XX evidenciou a necessidade do estabelecimento de sistemas de gestão de segurança para a mitigação de riscos de processos. Buscando o desenvolvimento de um sistema eficiente, a *Center for Chemical Process Safety* elaborou em 2007 as diretrizes de Segurança de Processos Baseada em Risco (RBPS), na qual propõe atividades e métodos para aprimorar a gestão de segurança de unidades químicas, distribuídos em 20 elementos distintos a respeito da temática de segurança. Este trabalho analisa os fatores contribuintes para o acidente ocorrido na planta de olefinas da Williams Olefins LLC em Geismar, Louisiana, Estados Unidos no ano de 2013, sob a ótica de tal sistema de gestão. A planta consistia em uma unidade de produção de olefinas, onde em 2013, um refeedor conectado ao fracionador de propeno rompeu, ocasionando um BLEVE catastrófico. O rompimento do trocador de calor ocorreu devido a sobrepessão no interior do vaso, que não possuía acesso a um sistema de alívio de pressão adequado. O estudo de caso do acidente evidencia um conjunto de falhas no sistema de gestão de segurança à época empregado pela Williams, que contribuiu de forma direta e indireta para o acidente. Foram detectadas deficiências em 10 dos 20 elementos do sistema RBPS, como por exemplos nos elementos “Cultura de segurança de processos”, “Gestão da mudança” e “Identificação de perigos e análise de riscos”. A análise demonstra como a implementação adequada de uma gestão de segurança baseada em risco pode auxiliar na prevenção de acidentes de processos.

Palavras-chave: RBPS. Gestão de Segurança. Williams Geismar. Acidente Químico. Segurança de Processos.

ABSTRACT

HOLANDA, Bruno M.. **Risk based process safety: case study of an accident at an olefins plant in the United States**. Rio de Janeiro, 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

The occurrence of major chemical accidents in the 20th century highlighted the need for the establishment of safety management systems for process risks mitigation. Seeking to develop an efficient system, the Center for Chemical Process Safety developed the guidelines for Risk Based Process Safety (RBPS) in 2007, that proposes activities and methods to improve the safety management of chemical plants, dividing them into 20 different elements on the subject of safety. This paper analyzes the contributing factors to the accident that occurred at Williams Olefins LLC's olefins plant in Geismar, Louisiana, United States in 2013 from the perspective of this management system. The plant consisted of an olefins production unit, where in 2013, a reboiler connected to the propylene fractionator ruptured, causing a catastrophic BLEVE. The rupture of the heat exchanger occurred due to overpressure inside the vessel, which did not have access to an adequate pressure relief system. The accident case study highlights several issues in the safety management system employed by Williams at the time, which contributed directly and indirectly to the accident. Deficiencies were found in 10 of the 20 elements of the RBPS system, for instance in the elements “Process Safety Culture”, “Management of Change” and “Hazard Identification and Risk Analysis”. The analysis demonstrates how a proper implementation of risk-based safety management can help the prevention of process accidents.

Keywords: RBPS. Safety Management. Williams Geismar. Chemical Accident. Process Safety

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Pilares (base) e elementos (colunas) do sistema RBPS	18
Figura 3.1 - Exemplo de unidade produtora de olefinas por Craqueamento à Vapor.	37
Figura 3.2 - Configuração "demetanizador" front-end para a seção de separação	39
Figura 3.3 - Exemplo de um cracker empregado na produção de olefinas	40
Figura 3.4 - Seção de Quench da planta da Williams Geismar	42
Figura 3.5 - Exemplo de coluna de destilação.....	43
Figura 3.6 - Trocador de calor casca e tubo com a corrente quente no lado da casca.....	44
Figura 3.7 - Unidade de olefinas em Geismar onde ocorreu o acidente de 2013.....	45
Figura 3.8 - Configuração do fracionador de propeno da planta da Williams após 2001.....	46
Figura 4.1 - Linha do tempo de acontecimentos que contribuíram para o acidente de 2013 ...	47
Figura 4.2 - Posição das válvulas instaladas em 2001 no fracionador de propeno (não indica a tubulação referente ao lado do tubo dos trocadores de calor)	48
Figura 4.3 - Exemplo de bloqueio de válvulas em posição aberta.	52
Figura 4.4 - Alteração da vazão de água observada no dia do acidente	54
Figura 4.5 - Aparência do refervedor EA-425B após a explosão.....	57
Figura 4.6 - Explosão ocorrida na planta da Williams Geismar em 2013.....	58
Figura 5.1 - Cenário de acúmulo de propano líquido no refervedor inoperante (não indica a tubulação referente ao lado do tubo dos trocadores de calor)	66
Figura 5.2 - Imagens da fábrica de tintas de Danvers, Massachusetts, Estados Unidos antes (esquerda) e depois (direita) da explosão de 2006	73

Lista de Quadros

Quadro 2.1 - Nomenclatura original (em inglês) e traduzida dos elementos do RBPS.	19
Quadro 5.1 - Elementos do RBPS e fatores relacionados a cada elemento e contribuintes ao acidente	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
API	<i>American Petroleum Institute</i>
BLEVE	<i>Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion</i>
CCPS	<i>Center for Chemical Process Safety</i>
CSB	<i>United States Chemical Safety Hazard and Investigation Board</i>
EPA	<i>United States Environment Protection Agency</i>
HAZOP	<i>Hazard and Operability Analysis</i>
HIRA	<i>Hazard Identification and Risk Analysis</i>
HSE	<i>Health and Safety Executive</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LOPA	<i>Layer of Protection Analysis</i>
MOC	<i>Management of Change</i>
NR	Normas Regulamentadoras
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>
PHA	<i>Process Hazard Analysis</i>
PSSR	<i>Pre-Startup Safety Review</i>
RBPS	<i>Risk Based Process Safety</i>
WSO	<i>World Safety Organization</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 SISTEMAS DE GESTÃO DE SEGURANÇA.....	15
2.1 GESTÃO DE SEGURANÇA DE PROCESSOS BASEADA EM RISCO	16
2.1.1 Comprometimento com a segurança de processos	19
2.1.1.1 Cultura de Segurança de Processos	20
2.1.1.2 Conformidade com Padrões e Normas	21
2.1.1.3 Competência em Segurança de Processos	22
2.1.1.4 Envolvimento da Força de Trabalho	23
2.1.1.5 Proximidade às Partes Interessadas	23
2.1.2 Compreensão de Perigos e Riscos	24
2.1.2.1 Gestão do Conhecimento do Processo	24
2.1.2.2 Identificação de Perigos e Análise de Riscos	25
2.1.3 Gestão dos Riscos.....	26
2.1.3.1 Procedimentos Operacionais	26
2.1.3.2 Procedimentos de Trabalho Seguro	27
2.1.3.3 Integridade e Confiabilidade dos Equipamentos	27
2.1.3.4 Gestão de Trabalhadores Contratados	28
2.1.3.5 Treinamento e Garantia de Desempenho.....	28
2.1.3.6 Gestão da Mudança (Management of Change - MOC).....	29
2.1.3.7 Prontidão para a Operação.....	30
2.1.3.8 Disciplina Operacional	31
2.1.3.9 Gestão da Emergência	31
2.1.4 Aprendizado com a Experiência	32
2.1.4.1 Investigação de Acidentes	32
2.1.4.2 Métricas e Indicadores.....	33
2.1.4.3 Auditoria.....	34
2.1.4.4 Revisão de Gestão e Melhoria Contínua	35
3 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE OLEFINAS LEVES POR CRAQUEAMENTO TÉRMICO.....	36
3.1 DESCRIÇÃO GERAL DO PROCESSO	36
3.2 DESCRIÇÃO DE EQUIPAMENTOS E SISTEMAS EMPREGADOS NO PROCESSO	40
3.2.1 Crackers	40

3.2.2 Sistema de Resfriamento (Seção de Quench)	41
3.2.3 Coluna de Destilação	42
3.2.4 Trocadores de Calor Casca e Tubo	43
3.3 PARTICULARIDADES DO PROCESSO DA WILLIAMS GEISMAR	44
3.3.1 Administração da Planta de Olefinas de Geismar	44
3.3.2 Operação dos Refervedores do Fracionador de Propeno à Época do Acidente	45
4 O ACIDENTE DA WILLIAMS GEISMAR OLEFINS PLANT 2013	47
4.1 INSTALAÇÃO DE VÁLVULAS PARA OS REFERVEDORES DO FRACIONADOR DE PROPENO 2001	47
4.2 REVISÃO DE SEGURANÇA PRÉ-PARTIDA (PSSR) E GESTÃO DA MUDANÇA (MOC) 2001	49
4.3 PROCESS HAZARD ANALYSIS (PHA) 2001	50
4.4 PROCESS HAZARD ANALYSIS (PHA) 2006	51
4.5 ANÁLISE DO ENGENHEIRO DE VÁLVULAS DE ALÍVIO 2008	52
4.6 PROCESS HAZARD ANALYSIS (PHA) 2011	53
4.7 O DIA DO ACIDENTE 2013	54
4.7.1 Alteração no fluxo de água	54
4.7.2 Ausência de procedimentos de identificação de riscos e manutenção de equipamentos	55
4.7.3 O refervedor inoperante continha mistura rica em propano	56
4.7.4 Aumento da pressão interna e explosão do refervedor	56
5 ANÁLISE DO ACIDENTE SOB A ÓTICA DO RBPS	60
5.1 FALHAS EM RELAÇÃO A “CULTURA DE SEGURANÇA DE PROCESSOS”	60
5.2 FALHAS EM RELAÇÃO A “CONFORMIDADE COM PADRÕES E NORMAS”	62
5.3 FALHAS EM RELAÇÃO A “GESTÃO DO CONHECIMENTO DO PROCESSO”	63
5.4 FALHAS EM RELAÇÃO A “IDENTIFICAÇÃO DE PERIGOS E ANÁLISE DE RISCOS”	65
5.5 FALHAS EM RELAÇÃO A “PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS”	67
5.6 FALHAS EM RELAÇÃO A “INTEGRIDADE E CONFIABILIDADE DOS EQUIPAMENTOS”	68
5.7 FALHAS EM RELAÇÃO A “GESTÃO DA MUDANÇA (MANAGEMENT OF CHANGE - MOC)”	70
5.8 FALHAS EM RELAÇÃO A “PRONTIDÃO PARA A OPERAÇÃO”	73
5.9 FALHAS EM RELAÇÃO A “DISCIPLINA OPERACIONAL”	74

5.10 FALHAS EM RELAÇÃO A “INVESTIGAÇÃO DE ACIDENTES”	75
5.11 RESUMO DAS FALHAS RELACIONADAS AO MODELO DE RBPS	76
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
7 CONCLUSÃO.....	80
8 REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

O crescimento econômico e os avanços tecnológicos observados no século XX implicaram a emergência de processos químicos cada vez mais complexos. Processos envolvendo altas pressões e utilizando químicos cada vez mais reativos são apenas alguns exemplos dessa complexidade (CROW; LOUVAR, 2002). Paralelamente ao desenvolvimento tecnológico, uma série de desastres industriais passaram a ocorrer. Já em 1921, com a explosão da planta da BASF na Alemanha (MACZA, 2008), tornou-se evidente a necessidade de abordar com seriedade aspectos da segurança de processos. Desde meados do século XX, avanços significativos em relação a essa disciplina foram feitos, para que a busca pela maior produtividade de um processo e a busca de uma operação mais segura fossem tratadas com igual importância (CROW; LOUVAR, 2002).

Crow e Louvar (2002) definem “segurança/prevenção de perdas” como: “[...] a prevenção de acidentes através da utilização de tecnologias apropriadas para identificar os perigos de uma instalação química e eliminá-los antes que um acidente ocorra”. Segurança de processos é a linguagem comum utilizada para comunicar estratégias de identificação e análise de riscos e medidas de segurança nas indústrias químicas (KHAN; RATHNAYAKA; AHMED, 2015). Ela é hoje identificada como parte integral do desenvolvimento de uma unidade produtiva e não mais apenas como um elemento extra a ser considerado. Ela difere-se da segurança ocupacional, pois trata somente da prevenção e mitigação de grandes acidentes de processos, como incêndios, explosões e liberação de substâncias tóxicas. Já a segurança ocupacional está centrada em acidentes no ambiente de trabalho como escorregões e quedas de trabalhadores (KHAN; RATHNAYAKA; AHMED, 2015).

Essencial para a disciplina de segurança de processos são os termos “perigo” e “risco”. Diversos autores propuseram definições para esses. Por exemplo, perigo e risco são definidos por Crow e Louvar (2002) como:

- Perigo: uma condição química ou física que tem o potencial de causar danos às pessoas, a propriedade ou ao ambiente. Em um processo, existem perigos mecânicos, como equipamentos móveis que podem causar danos aos trabalhadores, e existem perigos químicos como fogo, substâncias reativas e substâncias tóxicas.
- Risco: uma medida do dano humano, do dano ambiental ou da perda econômica em função tanto da probabilidade de ocorrência do acidente e quanto da magnitude das perdas ou lesões causadas por esse.

Vale notar que, pela definição dada por Crow e Louvar (2002), risco pode ser entendido como uma combinação de duas perguntas: (i) “qual a frequência/probabilidade de ocorrência do acidente?” e (ii) “qual a gravidade do acidente?”. Para o presente trabalho, a definição de risco de Crow e Louvar (2002) é adotada com a adição de uma outra pergunta estabelecida pelo *Center for Chemical Process Safety - CCPS* (2007), ressaltando a relevância de identificação do risco: (iii) “o que pode dar errado?”.

Ainda em relação a definições importantes para a compreensão do trabalho, tem-se o termo “evento de segurança”. No presente trabalho, ele é utilizado com base na recomendação da API RP 754, cujo objetivo é identificar diferentes tipologias de indicadores de segurança possíveis. Para tanto, separa-se tais indicadores em quatro grupos distintos, representando diferentes eventos relacionados a segurança de processos. O primeiro grupo, “*Tier 1*”, corresponde a eventos com perdas da primeira camada de contenção, provocando danos relevantes. O segundo grupo, “*Tier 2*”, representa eventos com perdas da primeira camada de contenção, porém com consequências leves. O terceiro grupo, “*Tier 3*”, representa eventos que desafiam as camadas de segurança e *near-miss* (quase-acidentes). Por fim, o quarto grupo, “*Tier 4*”, corresponde ao grupo de indicadores a respeito da disciplina e da performance do sistema de gestão. Nesse sentido, “evento de segurança” é utilizado para fazer referência aos eventos que se enquadram nas categorias: *Tier 1*, *Tier 2* da API RP 754 (API, 2021a).

A compreensão dos termos relacionados a eventos de segurança/desafios para camadas de proteção, “incidentes” e “acidentes”, também é essencial para a prática de segurança de processo. Afinal, o objetivo da disciplina é de garantir a prevenção e a mitigação desses eventos. O CCPS (2007) define incidentes como uma sequência não planejada de eventos com o potencial de gerar consequências indesejáveis. Geralmente, no contexto brasileiro, o termo incidente diz respeito a *near-miss* e é utilizado neste sentido para o presente trabalho. Já acidentes, são considerados como eventos de segurança que resultam em perdas humanas (seja dano ou morte), podendo ser acompanhados por danos a propriedades e impactos ambientais (CCPS, 2007). Eventos de segurança são raramente causados por uma única falha catastrófica. Geralmente, é possível observar múltiplos eventos ou falhas que coincidem e coletivamente resultam no acidente (CCPS, 2010).

Um exemplo de evento de segurança clássico são as explosões *Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion* (BLEVE). Esses acidentes geralmente resultam em danos a propriedades e pessoas localizadas próximas a ocorrência. BLEVEs são explosões onde há uma rápida transição de fase na qual um líquido, contido a uma temperatura acima da sua temperatura de ebulição a pressão atmosférica, é rapidamente despressurizado pela ruptura do

vaso que o continha. Essa despressurização provoca uma transição quase instantânea do líquido para o estado gasoso, com uma grande liberação de energia. Se o material é inflamável, pode resultar em uma Explosão de Nuvem de Vapor (*Vapor Cloud Explosion*). Somente a liberação de energia ocasionada pelo BLEVE já pode causar danos por choques de pressão. Muitas vezes, o evento provoca a projeção violenta de partes do vaso que rompeu para longas distâncias. As causas do BLEVE são diversas, sendo uma das mais comuns o fornecimento de energia ao líquido por meio de uma fonte externa, como um fogo na proximidade do vaso (CROW; LOUVAR, 2002).

Nesse presente trabalho aborda-se, exatamente uma explosão do tipo BLEVE que ocorreu na planta de produção de olefinas da Williams Olefins L.L.C, em Geismar, Louisiana, Estados Unidos em 2013 (CSB, 2016). O acidente é analisado sob a ótica das Diretrizes de Segurança de Processos Baseada em Risco (em inglês, *Guidelines for Risk Based Process Safety – RBPS*), proposta pelo CCPS (2007).

O acidente foi investigado pelo *U.S. Chemical Safety Hazard and Investigation Board* (CSB). A investigação culminou em um relatório final, publicado em 2016 pela CSB. O acidente ocorreu em 2013, seis anos após a publicação do sistema de gestão de segurança RBPS e foi responsável pela morte de duas pessoas, além de ferir outras 167 (CSB, 2016).

A motivação da escolha do acidente está no papel central das deficiências em relação a cultura de segurança e ao sistema de gestão de segurança como fatores contribuintes para a sua ocorrência. Muito além de falhas em equipamentos e erros humanos, a cultura e o sistema de gestão de segurança de uma organização são aspectos que transpassam um único erro e vem sendo identificados como causas geradoras de diversos acidentes na indústria química.

Sendo assim, o objetivo deste presente trabalho é demonstrar que a aplicação das diretrizes do RBPS (CCPS, 2007) por parte da força de trabalho da Williams teria sido capaz de reduzir as chances de ocorrência do acidente catastrófico de 2013 da planta de olefinas em Geismar, Louisiana, nos Estados Unidos.

O estudo primeiro apresenta o conceito e os objetivos de sistemas de gestão de segurança, além de detalhar os princípios do RBPS, por meio da discussão de seus pilares e elementos. Posteriormente, apresenta-se o processo de produção de olefinas leves, como o empregado à época na unidade envolvida no evento em Geismar. Depois, detalha-se a série de eventos que precederam o acidente e corroboraram para a sua ocorrência. Na sequência, esses eventos são analisados sob a ótica do RBPS, identificando quais elementos da diretriz falharam ou não foram completamente respeitados. Por fim, realiza-se a conclusão do trabalho.

2 SISTEMAS DE GESTÃO DE SEGURANÇA

Sistemas de gestão de segurança de processos (*Process Safety Management - PSM*) são definidos pela CCPS (2022a) como: “conjunto extensivo de políticas, procedimentos e práticas concebidos para assegurar que as barreiras contra episódios de acidentes estão em vigor, em uso, e são eficazes”. Desse modo, um sistema de gestão tem como objetivo estabelecer, de maneira formal, práticas relacionadas à segurança de processos, que abrangem desde a identificação de riscos até a cultura de uma organização.

Sistemas de gestão apresentam papel central para a prevenção de acidentes, ao endereçar deficiências ligadas a fatores organizacionais que podem ser identificados como causas desses. Nivolianitou, Konstandinidou e Michalis (2006) realizaram uma revisão de 498 acidentes da indústria petroquímica presentes na base de dados europeia Sistema de Reporte de Grandes Acidentes (*Major Accident Report System*). Primeiramente, eles identificaram que 40% desses apresentavam “erro humano” como fator contribuinte, enquanto “falhas em equipamentos” era identificada em 44% dos casos. Contudo, ao examinarem os relatórios completos dos acidentes, eles observaram que a principal causa por trás dos erros humanos eram o desenho incorreto de equipamentos e a falta de procedimentos adequados. Eles verificaram também que muitas falhas em equipamentos tinham como origem a ausência de uma rotina de manutenção (NIVOLIANITOU; KONSTANDINIDOU; MICHALIS, 2006). Deficiências organizacionais, como desenhos incorretos e a ausência de procedimentos e de manutenção, são problemas organizacionais que um sistema de gestão visa solucionar.

Para disseminar o conhecimento a respeito de sistemas de gestão de segurança e publicar diretrizes de implementação desses, foram desenvolvidas organizações especializadas. Pode-se observar tal fenômeno no início da década de 1970, com a criação da *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA) em 1970 nos Estados Unidos, da *Health and Safety Executive* (HSE) em 1974 no Reino Unido e da *World Safety Organization* (WSO) em 1975. Essas organizações permitiram a criação de plataformas para o compartilhamento de informação sobre segurança de processos e sistemas de gestão (LI; GULDENMUND, 2018).

Já a promoção de leis e regulações sobre ferramentas de gestão de segurança por agências reguladoras e governos, como a OSHA e a União Europeia, se deu especialmente após grandes acidentes do século XX, como Flixborough no Reino Unido em 1974 (CROW; LOUVAR, 2002), Seveso na Itália em 1976 (CROW; LOUVAR, 2002), Bophal na Índia em 1984 (CROW; LOUVAR, 2002) e Piper Alpha no Reino Unido em 1988 (CULLEN, 1990)

(KHAN *et al.*, 2016). Por exemplo, após o acidente de Seveso em 1976, a União Europeia publicou a “Seveso directive” de 1982 (COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 1982) e após o acidente de Bhopal de 1984, a União Europeia publicou a “Seveso-II” de 1996 (COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 1997) (LI; GULDENMUND, 2018).

Contudo, mesmo com a implementação gradual de sistemas de gestão de segurança nas últimas décadas, grandes acidentes continuaram a ocorrer na indústria, como o caso da explosão da BP em Texas City 2005 (CSB, 2007). Muitas companhias implementaram sistemas de gestão, mas ainda continuavam insatisfeitas com os resultados observados. Assim, nas últimas décadas expandiu-se a busca, dentro da disciplina de segurança de processos, para aprimoramento desses sistemas (KLEIN; DHARMAVARAM, 2012).

Hendershot (2011) indica que para melhorar a performance de processos em termos de segurança e prevenção de acidentes o maior desafio não é de âmbito técnico. Segundo o autor, o maior desafio é de âmbito cultural, ou seja, está em garantir que as atividades de uma operação sejam feitas de maneira adequada, em todo local e a todo tempo por todos os membros de uma companhia. Por isso, ele destaca a importância de um sistema de gestão de segurança que estabeleça uma forte cultura organizacional, na qual os trabalhadores da empresa busquem ativamente as melhores práticas de mitigação de riscos.

Ainda visando aprimorar a performance de sistemas de gestão, Klein e Dharmavan (2012) identificaram cinco possíveis áreas de melhorias que deveriam ser endereçadas. A primeira diz respeito ao senso de vulnerabilidade, ou seja, não ser complacente com nenhum tipo de risco. A segunda diz respeito a implementação prática de gestão de riscos, ou seja, garantir rigorosidade nas atividades e nas ferramentas de identificação e mitigação de riscos. A terceira diz respeito a capacidade organizacional, ou seja, o conhecimento em termos de segurança a nível organizacional. A quarta é a disciplina operacional, ou seja, a busca por excelência e formalidade na condução de atividades. Por fim, a quinta diz respeito a cultura de segurança de processos, ou seja, os valores compartilhados pelos membros da organização.

Visando garantir o aprimoramento de sistemas de gestão, valorizando a importância da cultura como indicado por Hendershot (2011), o CCPS estabeleceu em 2007, as diretrizes RBPS. Elas abordam os 5 aspectos distintos de melhorias apontados por Klein e Dharmavan (2012). O item a seguir detalha a emergência do RBPS e discute seus pilares e elementos.

2.1 GESTÃO DE SEGURANÇA DE PROCESSOS BASEADA EM RISCO

Até a primeira década do século XXI, mesmo depois da implementação formal das primeiras ferramentas de gestão, como as diretrizes “Seveso directive” de 1982 (COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 1982) e “Seveso-II” de 1996 da União Europeia (COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 1997), as investigações de acidentes continuaram a identificar a inadequada gestão de segurança como um dos principais fatores contribuintes para os diferentes eventos de segurança (KHAN *et al.*, 2016).

Visando aprimorar o desenvolvimento e a implementação de sistemas de gestão de segurança de processos o CCPS propôs, em 2007, as Diretrizes de Segurança de Processos Baseada em Risco (em inglês *Guidelines for Risk Based Process Safety* – RBPS). O RBPS é um *framework* que propõe métodos e atividades para garantir o desenvolvimento, a correção ou o aprimoramento de componentes de um sistema de gestão de segurança, por meio de uma abordagem baseada em risco (CCPS, 2007).

Em uma abordagem gestão baseada em risco, uma companhia não só cumpre com obrigações regulatórias e aprende com o passado, como também utiliza informação de riscos para desenvolver seu sistema. Desse modo, detecção de perigos, mensuração de riscos e métricas relacionadas ao sistema de gestão de segurança são estudados para prever sua performance e indicar pontos de melhoria (CCPS, 2007).

Com essa abordagem, o RBPS propõe iniciativas para melhorar a efetividade do sistema de gestão de segurança das organizações. A efetividade de um sistema de gestão é definida como uma função tanto da performance do sistema, quanto de sua eficiência. Garantir a efetividade de um sistema de gestão busca endereçar o dilema enfrentado por empresas da indústria química: responder as demandas da sociedade de garantir e aprimorar a segurança de processos e, ao mesmo tempo, realizar isso com menos recursos – financeiros e humanos –, para manter a competitividade da companhia (FRANK, 2007)

Como consequência, o RBPS apresenta uma perspectiva estratégica seletiva para a aplicação das diretrizes propostas. Ou seja, o rigor do desenvolvimento e implementação de cada iniciativa do sistema de gestão é proporcional a sua necessidade para a mitigação dos riscos da unidade (FRANK, 2007). Essa abordagem seletiva reconhece que nem todos os riscos em uma unidade química são iguais e que os recursos e esforços devem ser mais focados em operações de maior risco dentro da unidade. (CCPS, 2007)

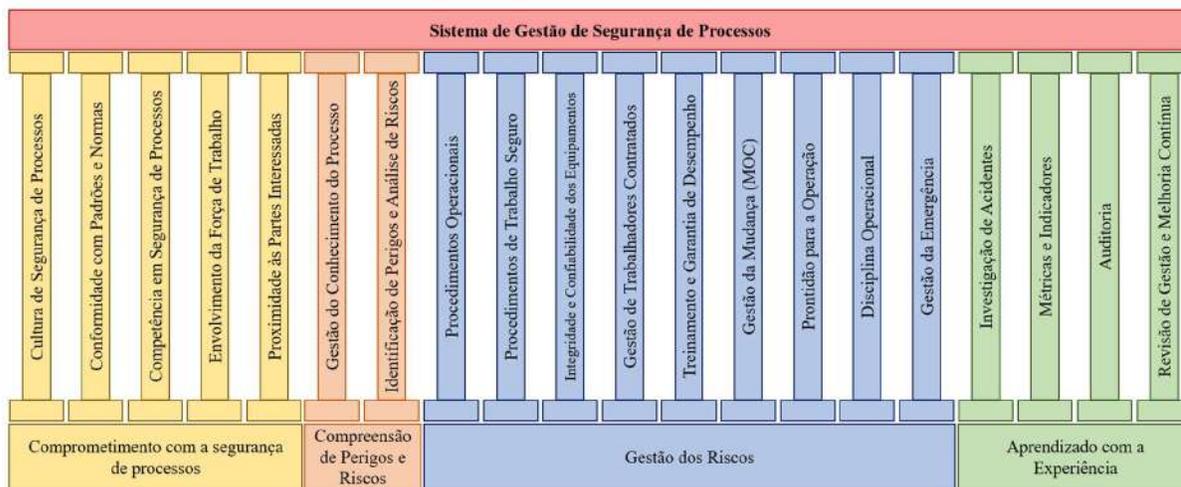
Ao utilizar uma abordagem baseada em risco, tem-se como objetivo identificar as deficiências de um sistema de gestão e atribuir os recursos adequados para melhorar as práticas de segurança. Além do RBPS proposto pelo CCPS, outras abordagens baseadas em risco já são aplicadas por países europeus. Como exemplo, publicações como o *Purple Book* (UJIT DE

HAAG; ALE, 1999) holandês são usadas por organizações europeias para atividades de gestão, controle e redução de riscos de processos, indicando procedimentos e análises quantitativas de risco para priorizar as medidas a serem tomadas para essas atividades (KHAN *et al.*, 2016).

Sistemas de gestão de segurança baseados em risco têm observado o crescimento de sua relevância nas últimas décadas. Por exemplo, a CSB começou a destacar a aplicação do RBPS como ferramenta para a prevenção de acidentes em suas investigações mais recentes. Esse foi o caso de uma das últimas investigações completadas em 2022, referente ao acidente que ocorreu em na planta da Loy-Lange Box Company (CSB 2022). O acidente consistiu em um BLEVE causado pela corrosão das paredes de um vaso pressurizado da planta. Em seu relatório, a CSB (2022) afirma que para ter prevenido o acidente, a Loy-Lange necessitaria implementar princípios de gestão de segurança de processos que incluísse os elementos presentes no RBPS da CCPS.

Para alcançar a efetividade e a excelência que o RBPS se propõe, enquanto sistema de gestão, ele é composto por 4 pilares fundamentais: Comprometimento com a Segurança de Processos (traduzido do original *Commit to process safety*), Compreensão de Perigos e Riscos (traduzido do original *Understand hazard and risks*), Gestão de Riscos (traduzido do original *Manage risk*) e Aprendizado com a Experiência (traduzido do original *Learn from experience*). Esses pilares são desdobrados em 20 elementos que devem ser postos em prática pelas companhias no desenvolvimento de seu sistema de gestão (CCPS, 2007). A Figura 2.1 é uma ilustração adaptada do CCPS (2007) que identifica tais pilares e elementos. O Quadro 2.1 indica os nomes originais em inglês e as traduções adotadas para cada elemento.

Figura 2.1 - Pilares (base) e elementos (colunas) do sistema RBPS.



Fonte: Adaptado de CCPS (2007)

Quadro 2.1 - Nomenclatura original (em inglês) e traduzida dos elementos do RBPS.

Pilares (nomenclatura traduzida)	Nomenclatura original do elemento	Nomenclatura traduzida do elemento
Comprometimento com a Segurança de Processos	Process safety culture	Cultura de Segurança de Processos
	Compliance with standards	Conformidade com Padrões e Normas
	Process safety competence	Competência em Segurança de Processos
	Workforce involvement	Envolvimento da Força de Trabalho
	Stakeholder outreach	Proximidade às Partes Interessadas
Compreensão de Perigos e Riscos	Process knowledge management	Gestão do Conhecimento do Processo
	Hazard identification and risk analysis (HIRA)	Identificação de Perigos e Análise de Riscos
Gestão dos Riscos	Operating procedures	Procedimentos Operacionais
	Safe work practices	Procedimentos de Trabalho Seguro
	Asset integrity and reliability	Integridade e Confiabilidade dos Equipamentos
	Contractor management	Gestão de Trabalhadores Contratados
	Training and performance assurance	Treinamento e Garantia de Desempenho
	Management of change	Gestão da Mudança (Management of Change - MOC)
	Operational readiness	Prontidão para a Operação
	Conduct of operations	Disciplina Operacional
	Emergency management	Gestão da Emergência
Aprendizado com a Experiência	Incident investigation	Investigação de Acidentes
	Measurement and metrics	Métricas e Indicadores
	Auditing	Auditoria
	Management review and continuous improvement	Revisão de Gestão e Melhoria Contínua

Fonte: Elaboração própria a partir de CCPS (2007)

Nos itens 2.1.1 a 2.1.4.4 esses pilares e elementos são apresentados em maior detalhe. Os itens são elaborados com base no CCPS (2007).

2.1.1 Comprometimento com a segurança de processos

O primeiro pilar do RBPS é o comprometimento com a segurança de processos. Esse pilar tem por objetivo desenvolver a cultura da empresa nessa temática, identificar e garantir a

aplicação de padrões de segurança, estabelecer a competência organizacional e garantir a presença de todos os trabalhadores e principais *stakeholders* na gestão de segurança do processo. Para tanto, esse pilar é composto por 5 elementos: cultura de segurança de processos, conformidade com padrões e normas, competência em segurança de processo, envolvimento da força de trabalho e proximidade às partes interessadas.

2.1.1.1 Cultura de Segurança de Processos

Muitos autores buscaram definir cultura de segurança de processos. Um exemplo dessas definições é dado por Hale (2000) como: “[...] as atitudes, crenças e percepções partilhadas pelo grupo que são definidoras de normas e valores, que determinam como atuam e reagem em relação a riscos e sistemas de controle de riscos”.

Esse elemento recebe clara relevância no sistema RBPS, sendo apresentado como o primeiro elemento das diretrizes propostas pelo CCPS (2007). Isso porque a cultura de processo determina tanto a diligência com que a companhia implementa cada elemento do RBPS, quanto a efetividade de sua implementação (FRANK, 2007).

Apesar de inserida dentro do primeiro pilar do RBPS, a cultura de segurança de processos é fundamental para todos os 4 pilares. Uma fraca cultura de processos não somente não garante a aderência às normas de gestão, como também acarreta um fraco desenvolvimento da compreensão das vulnerabilidades do processo, uma baixa dedicação de recursos para controlar riscos e uma reduzida importância dada ao aprendizado e atualização das práticas de segurança a partir de outros acidentes (FRANK, 2007).

A cultura de segurança deve ser nutrida a todo momento e deve partir da liderança da companhia. Para estabelecer valores e comportamentos desejados, líderes devem comunicar e reforçar práticas do sistema de gestão a todo o tempo, visando ressaltar os resultados positivos que uma cultura de processos pode gerar e como a sua existência afeta, em termos práticos, o dia a dia de cada membro da organização (SCHEIN, 2004).

O elemento de cultura apresenta três ações como princípios chave. Primeiramente, a liderança deve garantir a manutenção de uma prática confiável, isso é, garantir a prática da cultura de segurança de maneira consistente ao longo do tempo. Em segundo lugar, líderes precisam desenvolver e implementar uma cultura sadia, ou seja, um conjunto de valores, aceitos pelo grupo, capazes de direcionar seu comportamento face a desafios encontrados pela organização. Por fim, deve-se monitorar e guiar a cultura, estabelecendo métricas de segurança

para demonstrar que acidentes são evitáveis e que normas de segurança são importantes e devem ser seguidas dentro da organização (CCPS, 2007).

Cultura de segurança de processo é identificada como fator contribuinte em diferentes acidentes ao longo da história. O acidente da BP Texas City (CSB, 2007), a explosão ocorrida na refinaria da BP em 2005, é um exemplo de acidente marcado por problemas relacionados a cultura de segurança. Isso porque, o acidente foi decorrências de múltiplas falhas simultâneas, desde o não cumprimento de procedimentos até a presença de um baixo número de profissionais para operar a partida da unidade. Além disso, a investigação do acidente concluiu que as ferramentas de segurança eram não priorizadas para garantir a redução de custos de produção. Por fim, a empresa não foi capaz de aprender e atualizar as suas práticas com acidentes e *near-misses* em outras refinarias da organização (KASNIAK, 2009).

2.1.1.2 Conformidade com Padrões e Normas

Conformidade com padrões e normas é o segundo elemento do pilar de comprometimento com a segurança de processos. De acordo com CCPS (2007), padrões e normas, no contexto do RBPS, são definidos como sistemas para identificar e divulgar diferentes diretrizes, códigos e legislações aplicáveis a segurança de processos. Uma das principais características desse elemento é garantir que os padrões e normas aplicáveis ao processo sejam de fácil e rápido acesso para os usuários potenciais.

Atualmente, diversos são os exemplos desses sistemas disponíveis para a indústria química. Eles são agrupados em diferentes categorias: normas internas da organização, normas voluntárias da indústria, legislações nacionais e regulações internacionais.

Como exemplo de normas e padrões nacionais tem-se as Normas Regulamentadoras (NR) e as Normas Brasileiras da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A primeira consiste em obrigações, direitos e deveres a serem cumpridos por trabalhadores e empregadores para prevenir acidentes de trabalho e ocorrência de doenças (MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA, 2022). A segunda consiste em normas elaboradas pela ABNT que dispõe sobre a conformidade e certificação de sistemas e produtos (ABNT, 2022). Vale ressaltar que algumas normas são impostas por meio da legislação vigente – como o caso das NR – enquanto outras são adotadas de maneira voluntária pelas organizações – como o caso de algumas Normas Brasileiras da ABNT não referenciadas por uma legislação vigente (BATTAGIN, 2014).

Como exemplos de normas internacionais aplicáveis tem-se: as normas da *International Organization for Standardization* (ISO), elaboradas por experts internacionais no ramo em que atuam para garantir produtos seguros e de boa qualidade (ISO, 2022) e as *American Petroleum Institute* (API) *Recommended Practices*, elaboradas por especialistas para aprimorar a segurança operacional, a proteção ambiental e a sustentabilidade do setor de petróleo e gás (API, 2021b).

A importância da conformidade com as normas auxilia empresas a operar de maneira segura, a implementar processos de segurança de maneira consistente e, inclusive, minimizar o passivo legal em casos de acidentes.

De acordo com o RBPS, o nível de formalidade e burocracia na implementação de sistemas de padrões e normas deve ser proporcional ao nível de risco de uma atividade. Tal abordagem justifica-se na estratégia seletiva do RBPS, ou seja, onde o rigor do desenvolvimento de cada iniciativa é proporcional a sua necessidade.

2.1.1.3 Competência em Segurança de Processos

O terceiro elemento do pilar de comprometimento com a segurança de processos é a competência em segurança de processos. Ele consiste no desenvolvimento do conhecimento sobre o sistema de segurança do processo e a transmissão desse conhecimento para as diferentes partes da organização. Engloba um conjunto de três ações relacionadas:

- 1) Melhoria contínua do conhecimento e da competência em segurança.
- 2) Garantia de disponibilidade da informação para quem necessite.
- 3) Aplicação consistente dos conceitos e práticas aprendidas.

Apesar de tal elemento ser próximo aos elementos do RBPS de “Gestão do Conhecimento do Processo” e “Treinamento e Garantia de Desempenho”, ele difere desses dois por tratar da geração de novos conhecimentos em uma escala organizacional. “Gestão do Conhecimento do Processo” é um elemento do pilar de “Compreensão de Riscos” e corresponde aos meios para catalogar tais conhecimentos. Já “Treinamento e Garantia de Desempenho” é um elemento do pilar de “Gestão de Risco” e trata do desenvolvimento e manutenção do conhecimento na escala individual dos membros da organização.

Em geral, o elemento de competência do RBPS busca atingir dois objetivos. O primeiro é a compreensão e a correta interpretação das práticas de segurança de processo, para garantir que a companhia tome as melhores decisões durante as atividades realizadas. Frequentemente, esse conhecimento será, então, transcrito para manuais técnicos ou normas a serem divulgados internamente. Consequentemente, o segundo objetivo é permitir a transmissão efetiva do saber

entre membros da organização, garantindo que o conhecimento seja repassado para diferentes grupos ao longo do tempo.

2.1.1.4 Envolvimento da Força de Trabalho

O quarto elemento do Comprometimento com a Segurança de Processos consiste no envolvimento da força de trabalho. Esse elemento é caracterizado por um sistema que deve permitir a participação ativa de trabalhadores da companhia e contratados no desenho, implementação e melhoria contínua do sistema de gestão de segurança.

De acordo com tal elemento, recomenda-se o desenvolvimento de um plano de ações escrito para regulamentar e assegurar a participação dos trabalhadores na elaboração de cada elemento do sistema de gestão de segurança. Ainda, o acesso ao grupo de informações, principalmente as elaboradas durante o desenho do sistema de gestão de segurança, deve ser garantido a todos os trabalhadores da organização.

As melhores práticas para o envolvimento da força de trabalho consistem na participação dos trabalhadores tanto para a identificação de problemas e riscos quanto para o desenvolvimento de recomendações para mitigá-los. Companhias que aplicam tais práticas reportam benefícios tangíveis e intangíveis não apenas no quesito de segurança das atividades, como também no quesito de métricas de negócio. Companhias relatam, por exemplo, reduções na quantidade de relações adversariais de gerentes e empregados além de uma melhor imagem para com os clientes e público geral (ALDER, 2000).

2.1.1.5 Proximidade às Partes Interessadas

O último elemento do comprometimento com a segurança de processos é a proximidade às partes interessadas e envolvidas nas atividades da companhia. Esse elemento consiste em um conjunto de três ações distintas, visando garantir que informações relevantes a respeito da segurança de processo estejam disponíveis a todos os possíveis grupos afetados por tais atividades. As três ações são:

- 1) Estabelecer um diálogo sobre segurança de processos com indivíduos ou organizações que podem ser afetados por processos da empresa.
- 2) Estabelecer relacionamentos com a comunidade, outras companhias e autoridades (locais, estaduais e federais).
- 3) Prover informações precisas sobre produtos, processos, plantas, riscos e perigos das unidades da empresa às partes interessadas.

De acordo com o elemento de proximidade às partes interessadas, elas devem (i) receber informações sobre os riscos das unidades da companhia, (ii) serem instruídas em como agir em caso de uma emergência e (iii) possuírem um canal aberto para comunicação com a companhia (JAYARAMAN; SHARIFF; ZAINI, 2019).

Além de ser um elemento do sistema de gestão de segurança, a adequada proximidade às partes interessadas também é crucial para permitir a operação das organizações. Isso porque, sem a confiança das partes envolvidas, companhias químicas podem perder o apoio e a aceitação social por parte da população. Com uma menor aceitação popular dessas empresas, governos reduzem programas de desenvolvimento e incentivos para algumas áreas da indústria química. É o caso, por exemplo, de Alemanha e Bélgica, que estão reduzindo seus programas nucleares após o acidente ocorrido em Fukushima Dai-chi, no Japão em 2011. Nesse evento de segurança, a organização responsável pela planta falhou em identificar, alertar e evacuar os residentes afetados pelo acidente, contribuindo para a queda de reputação da organização e aceitação da população em relação a indústria nuclear em geral (JAYARAMAN; SHARIFF; ZAINI, 2019).

2.1.2 Compreensão de Perigos e Riscos

Compreensão dos perigos e riscos é o segundo pilar da RBPS. Esse pilar engloba apenas dois elementos do sistema de gestão. Ele diz respeito ao conhecimento em relação a atividade operada, à identificação de perigos e de meios para a redução de riscos e à determinação do risco residual de um processo. Assim, graças a essa compreensão, a companhia poderá alocar seus recursos de maneira eficaz para garantir a segurança das atividades desenvolvidas.

2.1.2.1 Gestão do Conhecimento do Processo

O primeiro elemento do pilar de compreensão de perigos e riscos é a gestão do conhecimento do processo. Ele consiste na documentação de dados relacionados à segurança e à operação de um determinado processo, na atualização de tais dados - quando necessário - além de sua disponibilização para todos os trabalhadores que sejam impactados por tal processo.

Esse elemento complementa o elemento de “Competência em segurança de processos”. A gestão do conhecimento do processo tipicamente responde por perguntas do tipo “qual?”, como por exemplo “qual o número de refervedores está em operação?”, enquanto a

competência em segurança de processos responde por perguntas do tipo “por que?”, como “por que somente um dos refervedores está em operação?”.

A gestão do conhecimento é um elemento essencial para todo o sistema de gestão de segurança. Isso porque treinamentos, procedimentos de gestão da mudança e da emergência geralmente baseiam-se em documentos e informações coletados e disponibilizados pela organização.

Diferentes documentos podem ser elaborados como consequência da implementação desse elemento. Alguns exemplos são as bases de dados de desenhos de processos e de equipamentos, informações a respeito de elementos químicos empregados, documentos elaborados em análises de riscos, além de normas e diretrizes aplicáveis aos processos.

2.1.2.2 Identificação de Perigos e Análise de Riscos

O segundo elemento desse pilar é a identificação de perigos e análise de riscos (tradução do inglês *Hazard Identification and Risk Analysis* - HIRA). Esse elemento consiste no grupo de atividades para o reconhecimento de riscos e recomendações para mitigá-los. O objetivo desse elemento é garantir que a organização compreenda os riscos associados às diferentes atividades e os mantenha dentro de seus limites de tolerância.

As ferramentas para o desenvolvimento da HIRA podem ser diversas. O CCPS (2007) preconiza que a ferramenta utilizada deve ser a necessária para atingir os níveis mínimos de análise que permitam a tomada de decisão consciente. Enquanto um número insuficiente de análises não garante escolhas adequadas com base nos riscos do processo, um número excessivo de análises seria um desperdício de recursos humanos e financeiros.

Os métodos e modelos para a análise de risco podem ser divididos entre categorias distintas. A primeira categoria consiste em análises qualitativas, ou seja, não-numéricas, baseadas em diagramas, esquemas e gráficos, como por exemplo *Hazard and Operability Analysis (HAZOP)* e *Process Hazard Analysis (PHA)*. A segunda categoria é a de análises semiquantitativas, as quais produzem resultados numéricos aproximados ao invés de absolutos e englobam ferramentas como *Layer of Protection Analysis (LOPA)*. A terceira categoria é a de análises quantitativas, as quais visam uma estimativa numérica realista para compreensão dos riscos, onde enquadram-se ferramentas como árvore de falhas. Há, ainda, uma quarta categoria, de análises híbridas, que consiste em uma combinação de análises quantitativas e qualitativas, que se diferem de análises semiquantitativas por apresentarem resultados mais

realistas graças à parte quantitativa. Essas englobam em geral ferramentas recentemente desenvolvidas como Bayesian-LOPA (KHAN; RATHNAYAKA; AHMED, 2015).

A HIRA é um elemento crucial para o sistema de gestão de segurança de uma organização. Isso porque, na ausência de uma compreensão adequada dos riscos de uma determinada atividade, não é possível determinar a resposta para três perguntas chaves do sistema RBPS e determinar os riscos da operação da unidade:

- 1) O que pode dar errado durante o processo?
- 2) Qual o impacto de tal evento?
- 3) Quão frequente é a ocorrência desse evento?

2.1.3 Gestão dos Riscos

O terceiro pilar da RBPS diz respeito a gestão dos riscos associados aos processos desenvolvidos por uma organização. Esse pilar engloba nove elementos, sendo esse o maior número de elementos entre todos os pilares do sistema de gestão. O foco desse pilar está em garantir a prudência na condução das operações, gerir suas mudanças, além de preparar uma resposta adequada em caso de um acidente.

2.1.3.1 Procedimentos Operacionais

Procedimentos operacionais constituem o primeiro elemento do pilar de gestão de riscos. Eles são definidos pelo CCPS (2007) como procedimentos escritos, que listam os passos adequados para a realização de uma determinada tarefa e descrevem como esses passos devem ser efetuados. Normalmente são empregados para detalhar rotinas que devem ser seguidas pelos trabalhadores durante a operação em uma unidade, como por exemplo procedimentos de como realizar a partida de um determinado equipamento, de como efetuar a limpeza periódica de certos equipamentos, de como agir em caso de problemas (*troubleshooting*) e de como trocar entre produtos e instrumentos empregados na produção.

Os procedimentos operacionais geralmente são desenvolvidos em conjunto com operadores e engenheiros de processos, antes da operação ser realizada. O objetivo desse elemento é aumentar a confiabilidade das atividades humanas em uma unidade. Procedimentos adequados incluirão, além do detalhamento das tarefas, a descrição de processos, de perigos, de sistemas de controles e as instruções de como proceder em situações anormais.

Para o estabelecimento adequado de diretrizes operacionais, as organizações devem se basear em certos princípios, tais como: (i) a identificação de quais procedimentos são

necessários, com base nos riscos da atividade e do conhecimento dos operadores, (ii) a consistência de procedimentos entre as diferentes áreas, e (iii) a garantia de desenvolvimento e atualização do procedimento escrito. Com esses princípios busca-se estabelecer o mínimo de diretrizes para uma operação segura por parte de todos os operadores, sem estabelecer uma quantidade excessiva de instruções, que acabaria por dificultar a sua implementação.

2.1.3.2 Procedimentos de Trabalho Seguro

O elemento procedimentos de trabalho seguro do pilar de gestão de risco diz respeito as ações que visam garantir o controle de riscos associados a atividades que não se enquadram na rotina da operação. Por definição, são procedimentos que englobam atividades que não se enquadram no processo de conversão de matérias-primas a produtos – abordado pelo elemento de “Procedimentos operacionais” – nem em uma rotina de manutenção – geralmente abordada pelo elemento de “Integridade e confiabilidade de equipamentos”. Trabalho seguro geralmente engloba atividades como a entrada em espaço confinado, os trabalhos a quente, os trabalhos em altura ou a retirada de uma válvula de um equipamento para recalibragem e recertificação.

O objetivo do elemento de procedimentos de trabalho seguro é mitigar riscos em trabalhos não rotineiros. Para garantir tal objetivo elabora-se um sistema de procedimentos e um sistema de regras e, principalmente, permissões para a realização de trabalhos seguros, a serem obedecidos pela força de trabalho da organização.

Muitas atividades não rotineiras apresentam normas regulatórias específicas, que devem ser obedecidas pelos procedimentos desenvolvidos pela organização. Como exemplo em território nacional, tem-se a NR 33 e a NR 35. A primeira regulamenta em âmbito nacional trabalhos em espaços confinados, enquanto a segunda regulamenta trabalhos em altura, estabelecendo medidas de prevenção, capacitação e gestão da emergência para tais tipos de operação (MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA, 2006, 2012).

2.1.3.3 Integridade e Confiabilidade dos Equipamentos

A integridade e confiabilidade dos equipamentos consiste em garantir que os equipamentos estejam desenhados e instalados de acordo com as especificações técnicas e que estejam adequados para o uso. Para tanto, faz-se necessário a implementação de inspeções, testes e manutenções preventivas para garantir tal adequação.

As atividades relacionadas a esse elemento visam prevenir a liberação de materiais perigosos, a liberação repentina de energia, além de garantir a alta disponibilidade de sistemas de segurança, que previnam ou mitiguem tais eventos.

Esse elemento tem como propósito desenvolver materiais para garantir a performance confiável dos diferentes equipamentos. Assim, busca-se realizar relatórios sobre inspeções iniciais, testes e outras atividades que foram realizadas previamente a operação para garantir a adequação dos materiais. Além, busca-se estabelecer procedimentos para controlar e implementar as atividades de manutenção, visando assegurar a integridade dos equipamentos.

2.1.3.4 Gestão de Trabalhadores Contratados

Outro elemento constituinte do pilar de gestão de risco é a gestão de trabalhadores contratados – externos a organização. A gestão de contratados é um sistema de controle que visa (i) garantir que os contratados respeitem e estejam de acordo com os padrões de segurança da unidade e (ii) assegurar o cumprimento com o sistema de gestão de segurança da companhia.

A presença de trabalhadores externos pode aumentar os riscos de uma determinada atividade da organização, ao posicionar profissionais não familiarizados com os processos e o sistema de gestão de segurança da companhia. Para mitigar esse aumento, companhias devem selecionar cuidadosamente os trabalhadores contratados e aplicar orientações e treinamentos de segurança específicos para tais profissionais.

2.1.3.5 Treinamento e Garantia de Desempenho

O treinamento e garantia de desempenho da força de trabalho é mais um elemento do pilar de gestão de risco. De acordo com o CCPS (2007), treinamento é a instrução prática dos requisitos para a realização de tarefas e dos métodos empregados na operação. O treinamento tem como finalidade garantir que a força de trabalho possua os atributos mínimos para uma tarefa, mantenha sua performance ou, ainda, seja promovida a um cargo de maior relevância. Garantia de desempenho por sua vez é o meio pelo qual os trabalhadores demonstram, no dia a dia da operação, que eles compreenderam o treinamento proposto e são capazes de aplicá-lo.

Durante a elaboração de um sistema de treinamento, espera-se que sejam elaborados listas de diretrizes a respeito da realização de tarefas, além de relatórios sobre quais treinamentos iniciais foram realizados e quais são os treinamentos futuros para cada posição. Os treinamentos devem ser específicos para cada tarefa e cargo, visando suprir lacunas entre as habilidades que um funcionário possui e os atributos necessários para a realização da tarefa.

2.1.3.6 Gestão da Mudança (Management of Change - MOC)

O sexto elemento da gestão de riscos é a gestão da mudança. A gestão da mudança diz respeito aos processos e revisões necessários para avaliar alterações propostas em uma unidade. Tais revisões abrangem análises de desenhos de equipamentos e de procedimentos operacionais, visando garantir que nenhum risco não previsto foi introduzido e que nenhum risco existente teve um aumento desconhecido. Esse elemento também inclui a notificação a respeito da alteração para toda a força de trabalho que pode ser impactada pela mudança.

De acordo com esse elemento do RBPS, espera-se que cada mudança proposta seja propriamente revista. Após a mudança, a operação somente deve ser autorizada quando os riscos associados forem adequadamente identificados e controlados. Outros elementos do RBPS podem ser revisados caso necessário, como os elementos de “Treinamento e garantia de desempenho”, “Gestão do conhecimento do processo” e “Identificação de perigos e análise de riscos”. Para tanto organizações estabelecem protocolos que irão detalhar como a gestão da mudança será implementada em cada caso.

Para assegurar a adequada implementação do elemento de gestão da mudança, o CCPS (2007) propões cinco princípios chaves. O primeiro diz respeito a (i) estabelecer uma prática confiável, ou seja, garantir a prática de gestão da mudança de maneira consistente ao longo do tempo. Além, (ii) deve-se identificar todos os potenciais cenários de modificação que exigirão a realização de um MOC, (iii) avaliar os impactos possíveis da alteração, (iv) decidir se permitirá a ocorrência da mudança e (v) atualizar os dados a respeito do processo.

Deficiências a respeito da realização adequada de MOCs são identificadas como fatores contribuintes para grandes acidentes. Como exemplo desses acidentes, tem-se a explosão ocorrida no navio-plataforma operado pela BW Offshore na costa brasileira em 2015. A investigação do acidente por parte da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) identificou a não realização do gerenciamento da mudança como uma das causas raiz para o acidente (ANP, 2015). De acordo com o relatório, não foi emitido, na fase de projeto da operação do navio-plataforma, um documento que evidenciasse um processo de gestão da mudança para avaliar os riscos de alterações na operação, como a mudança no armazenamento de condensado – produto que vazou para dentro da casa de bombas do navio, originando a explosão.

Deficiências em relação ao MOC também são identificadas como causas do acidente de Flixborough em 1974. A investigação do acidente concluiu que não foi promovida uma adequada revisão da mudança referente a instalação de uma tubulação temporária entre dois

reatores da planta. Após dois meses de operação, com diversos inícios e reinícios, os reatores tiveram que ser despressurizados e resfriados para a correção de um vazamento em outra região da planta. Depois da correção, durante o reinício da operação novamente e retomada da pressão e da temperatura de trabalho nos reatores, a tubulação temporária falhou devido a variação de forças em suas dobras e extremidades, provocando a liberação de aproximadamente 30 toneladas de mistura rica em ciclohexano. A consequente explosão provocada pela presença da mistura provocou um dos acidentes mais catastróficos da história da indústria química (FAULK; DA FONSECA, 2022).

2.1.3.7 Prontidão para a Operação

Prontidão para a operação é mais um elemento associado ao pilar da gestão de riscos. Esse elemento consiste na garantia de que os equipamentos que estavam fora de operação estejam em condições seguras para serem religados. Todos os equipamentos desligados são abordados por esse elemento, seja por um momento breve ou por um período mais extenso como no caso de manutenções e modificações na planta.

As fases de pré-partida e de partida de um processo estão entre as mais críticas do ciclo de vida de um projeto. Por isso, a prontidão para operação é um elemento chave do RBPS. De acordo com as práticas relacionadas ao elemento, espera-se o estabelecimento de uma revisão para autorizar de maneira segura o início do processo ou designar uma lista de ações a serem seguidas para torná-lo pronto para uma retomada segura. O elemento abrange práticas relacionadas a revisão de pré-partida de (i) novos processos, (ii) processos que foram desligados para modificações e (iii) processos que foram desligados por outros motivos administrativos.

Esse elemento tem uma forte ligação com o elemento de MOC. Sendo assim, muitas vezes torna-se difícil distinguir entre atividades ligadas a esse elemento e as relacionadas a MOCs. Como descreve o CCPS (2007):

“Os elementos MOC e a prontidão estão intimamente ligados, e muitas empresas consideraram eficiente incluir uma revisão da prontidão como um dos últimos passos de um MOC. Isso facilita as revisões de prontidão que são realizadas como resultado de uma mudança, mas isso não é aplicável a todos os outros tipos de situações de *start-up*” (CCPS, 2007)

O elemento de prontidão pode ser abordado como uma extensão do elemento da OSHA de revisão de segurança de pré-partida (traduzido do inglês *Pre-Startup Safety Review* – PSSR) (OSHA, 2013). De acordo como CCPS (2007):

“O elemento de prontidão nesta diretriz é definido de forma mais ampla do que o elemento de revisão da segurança do processo de gestão de segurança pré-início da OSHA, ao abordar especificamente todas as condições de partida – não apenas os resultantes de processos novos ou alterados” (CCPS, 2007)

Como consequência, a própria atividade de revisão de segurança de pré-partida (PSSR) é um exemplo de ferramenta abrangida pelo presente elemento. Essa atividade consiste em uma revisão indicada para unidades novas ou modificadas, quando a modificação é significativa o suficiente para requerer mudanças na informação de segurança do processo. Ela visa verificar, antes do início de uma operação, que os equipamentos, os procedimentos operacionais e a força de trabalho estão prontos para o início do processo (OSHA, 2013).

2.1.3.8 Disciplina Operacional

O oitavo elemento do pilar de gestão de riscos é a disciplina operacional. Ele diz respeito a execução de tarefas operacionais e de gestão de maneira estruturada e deliberada. Esse elemento visa institucionalizar a excelência na execução de tarefas, mantendo a máxima precisão na execução possível.

A disciplina operacional torna-se relevante, especialmente com o aumento da complexidade dos processos de uma organização. O objetivo de introduzir formalidade na condução das tarefas é garantir uma execução segura, confiável e consistente.

Além disso, esse elemento visa o estabelecimento de uma política que descreve a expectativa da organização em relação a conduta dos trabalhadores para a realização de cada atividade operacional. Tal política deve conter um sistema de permissões – quais ações são proibidas, quais ações necessitam controle especial e quais ações são permitidas sem controle especial – e de procedimentos que devem ser adotados para a realização de cada atividade. Buscando garantir a excelência operacional, esse elemento também indica a necessidade de controle do status de sistemas e equipamentos da unidade de processos.

Como descrito por Klein (2005), a disciplina operacional diz respeito a dedicação e ao comprometimento por parte de cada membro da organização em realizar cada tarefa da maneira mais adequada possível. Ela é a tradução prática dos demais elementos presentes no sistema de gestão de segurança de uma empresa. Independentemente da qualidade do sistema de gestão de uma organização, sem a adequada implementação do elemento de disciplina organizacional, não é possível obter os resultados desejados em termos de segurança de processos.

2.1.3.9 Gestão da Emergência

Gestão de emergências é o último elemento do pilar de gestão de risco. Esse elemento engloba atividades de planejamento em relação a eventuais acidentes. Além disso, ele diz respeito à alocação e treinamento de recursos para execução do plano de emergências. Sempre com o propósito de permitir a execução desse plano, ele também compreende mecanismos para a transmissão de informação as partes interessadas em como proceder em caso de eventos de segurança. Três aspectos devem ser considerados na gestão de emergências:

- 1) Proteção de pessoas (que estejam dentro ou fora das unidades produtivas).
- 2) Responsividade para acidentes catastróficos (explosões, liberações de químicos nocivos ou de grande quantidade de energia).
- 3) Comunicação às partes interessadas.

O objetivo da gestão de emergências é mitigar as consequências de um eventual acidente. Para tanto são elaboradas diretrizes e planos de resposta, além do treinamento e equipagem de equipes de contenção para proteção de pessoas, propriedades e ambientes.

A gestão inadequada de emergências foi um fator contribuinte para o agravamento do desastre ocorrido em Piper Alpha (1988). A organização possuía um plano de resposta à emergência inadequado, com falta de equipamentos de combate a incêndio e falta de treinamento da força de tarefa para como agir em caso de acidentes. Ainda, os procedimentos de segurança eram mal compreendidos e implementados pelos trabalhadores. Além disso, os exercícios de simulações de emergência eram raramente realizados na unidade. Todos esses fatores contribuíram para expressivo número de 165 mortes de trabalhadores ocasionadas pelo acidente (MAJID; SHARIFF; LOQMAN, 2016).

2.1.4 Aprendizado com a Experiência

O quarto pilar da RBPS é o aprendizado com a experiência. Esse pilar envolve a análise de erros passados da organização e de terceiros, sejam de acidentes ou *near-misses*, como fontes de informação para melhoria das práticas de segurança. Esse pilar é formado por 4 elementos a serem detalhados nos itens a seguir.

2.1.4.1 Investigação de Acidentes

O primeiro elemento do quarto pilar do RBPS é a investigação de acidentes. Esse elemento diz respeito ao processo de reportar, acompanhar e investigar acidentes. Ele inclui a elaboração de um sistema formal de investigação e o desenvolvimento de uma base de dados sobre eventos de segurança passados. Também compreende a análise de recomendações

geradas a partir de investigações, com o objetivo solucionar as deficiências que originaram ou que possam a vir originas eventos de segurança.

De acordo com esse elemento, as organizações devem buscar desenvolver diferentes análises a partir de incidentes e acidentes passados. Deve-se elaborar (i) um histórico sobre os incidentes e acidentes ocorridos internamente, (ii) relatórios que identificam causas aparentes e causas raiz – desde falhas em equipamentos até sistemas de gestão se segurança ineficazes – , além de (iii) um acompanhamento da implementação das recomendações decorrentes das investigações. Vale ressaltar que o CCPS (2007) também preconiza a avaliação de acidentes externos – isto é, de outras organizações – e a sua aplicabilidade em relação aos processos da organização como parte do elemento de investigação de acidentes.

O acidente de Buncefield em 2005 (KNEGTERING; PASMÁN, 2009) pode ser considerado um exemplo de falha em relação ao elemento de investigação de acidentes. O acidente decorreu de um transbordamento de um tanque de gasolina. Durante a investigação do acidente, a equipe responsável pela análise observou que, em média, um acidente decorrente do transbordamento de tanques de gasolina ocorria aproximadamente a cada 5 anos desde o início dos anos 1960 até a data da análise. Ela destaca ainda que a falha ocorrida em Buncefield poderia ter sido prevista com antecedência (KNEGTERING; PASMÁN, 2009). A avaliação de acidentes passados poderia auxiliar na prevenção da catástrofe ocorrida em Buncefield.

2.1.4.2 Métricas e Indicadores

O segundo elemento do pilar de aprendizado com a experiência é o de métricas e indicadores. Esse elemento diz respeito ao estabelecimento de um sistema de dados para monitorar a efetividade do sistema de gestão de segurança de uma organização.

Um sistema de métricas adequado deve ser composto tanto de métricas sobre acidentes e *near-misses* do passado, quanto de métricas sobre a qualidade da implementação das ferramentas de um sistema de gestão de segurança de uma organização. Diferentes tipos de métricas e indicadores de segurança de processos são discutidos no *Guidelines for Process Safety Metrics* (CCPS, 2010), onde propõe-se três diferentes categorias de métricas, quais sejam: *lagging*, *near-miss* e *leading*.

A primeira categoria, referente as métricas *lagging*, são métricas retrospectivas, associadas a acidentes que já ocorreram no passado, que podem ainda servir como indicativos de possíveis problemas futuros. Tais métricas devem ser objetivas e abordar de maneira global os eventos de segurança, mesmo quando não catastróficos (CCPS, 2010). Exemplos de

métricas nessa categoria são a contagem do número acidentes e as taxas de severidade (como o número de feridos por evento de segurança). A segunda categoria, referente a métricas *near-miss*, são também métricas retrospectivas, porém relacionadas a eventos de segurança que não causaram danos a pessoas, perdas de negócio e não atingiram critérios de severidade para serem consideradas *lagging*. Métricas *near-miss* são importantes para indicar riscos que devem ser endereçados antes da ocorrência de um acidente grave (CCPS, 2010). Por fim, a terceira categoria de métricas, referente a métricas *leading*, são métricas prospectivas e indicam a performance de processos, disciplina operacional e camadas de proteção para a prevenção de acidentes (CCPS, 2010). Em geral tais métricas visam indicar problemas a serem corrigidos antes que qualquer acidente ocorra. Alguns elementos do RBPS como “Integridade e confiabilidade dos equipamentos”, “Gestão da mudança (MOC)”, “Identificação de perigos e análise de riscos” e “Treinamento e garantia de desempenho” podem servir de fonte para métricas *leading* (CCPS, 2010). Como exemplo, uma organização pode medir quantos itens de recomendações provenientes de PHAs ainda precisam ser implementados, ou quantos treinamentos da força de trabalho já foram realizados no ano.

2.1.4.3 Auditoria

Auditoria é o terceiro elemento do pilar de aprendizado com a experiência. Esse elemento diz respeito ao procedimento de avaliação para garantir que o sistema de gestão de segurança seja implementado como pretendido. Assim, busca-se estabelecer um processo de análises periódicas dos demais elementos do RBPS, verificando a conformidades desses com as diretrizes estabelecidas.

Sendo assim, a auditoria também apresenta um papel crucial no RBPS. Esse elemento estabelece procedimentos formais de controle para garantir a performance do sistema de gestão como um todo, além de permitir a identificação de oportunidades para melhora sua efetividade.

Um sistema de auditoria adequado deve conter um grupo de atividades específicas para avaliar um sistema de gestão de segurança. Somente uma análise alto-nível de documentos e dados históricos dificilmente indicará defeitos em controles de segurança presentes. Para identificar as falhas de maneira sistemática, um sistema de auditoria deve contar com entrevistas da força de trabalho da organização, além de verificações pontuais nas próprias instalações (HOCHLEITNER; ROCHE, 2017).

2.1.4.4 Revisão de Gestão e Melhoria Contínua

O último elemento do pilar de aprendizado com a experiência é a revisão de gestão e melhoria contínua. Ela consiste no processo rotineiro que visa avaliar se o sistema de gestão está sendo executado como pretendido e produzindo os resultados desejados. Apesar de muito semelhante ao elemento de “Auditoria”, esse elemento se enquadra como uma revisão que busca suprir as lacunas, em termos de segurança, das tarefas realizadas no dia a dia antes mesmo da realização de uma revisão periódica de auditoria.

O objetivo do elemento é garantir, com regularidade e de maneira proativa, a conformidade dos processos de uma unidade com o seu sistema de gestão de segurança, por meio de revisões rotineiras agendadas previamente com as equipes. Geralmente, espera-se o desenvolvimento de um memorando interno sumarizando a revisão, com eventuais ineficiências identificadas e propostas de recomendações para solucioná-las. Esses memorandos são mais informais e mais genéricos que os relatórios elaborados no elemento de “Auditoria”, porém são desenvolvidos com maior frequência.

3 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE OLEFINAS LEVES POR CRAQUEAMENTO TÉRMICO

Para uma análise adequada do acidente ocorrido em Williams Geismar, além da compreensão dos diferentes elementos de um sistema de gestão de segurança, como o proposto pela CCPS (2007), torna-se necessário a compreensão das características do processo produtivo da unidade. Assim, neste capítulo busca-se apresentar o processo de produção de olefinas empregado na planta da Williams Geismar à época do acidente. Além da descrição geral do processo, discute-se os principais equipamentos e sistemas envolvidos no evento de segurança.

3.1 DESCRIÇÃO GERAL DO PROCESSO

Olefinas constituem um grupo de hidrocarbonetos simples que apresentam ligação dupla. De acordo com Gholami *et al.* (2021), os principais integrantes são olefinas leves, como eteno, propeno, buteno e buta-1,3-dieno. Os componentes desse grupo são utilizados como matéria prima para a produção de polímeros, solventes, fibras sintéticas e de outros materiais (FAKHROLESLAM; SADRAMELI, 2020).

Entre as olefinas leves, a mais comercializada, em termos de massa, é o eteno. O eteno foi produzido inicialmente pela Union Carbide em 1922, e a primeira planta industrial foi construída apenas em 1925, na Virgínia, nos Estados Unidos. Em 2022, no que tange às olefinas leves, espera-se uma produção global de mais de 200 milhões de toneladas de eteno e mais de 140 milhões de toneladas de propeno (FAKHROLESLAM; SADRAMELI, 2020; GHOLAMI *et al.*, 2021).

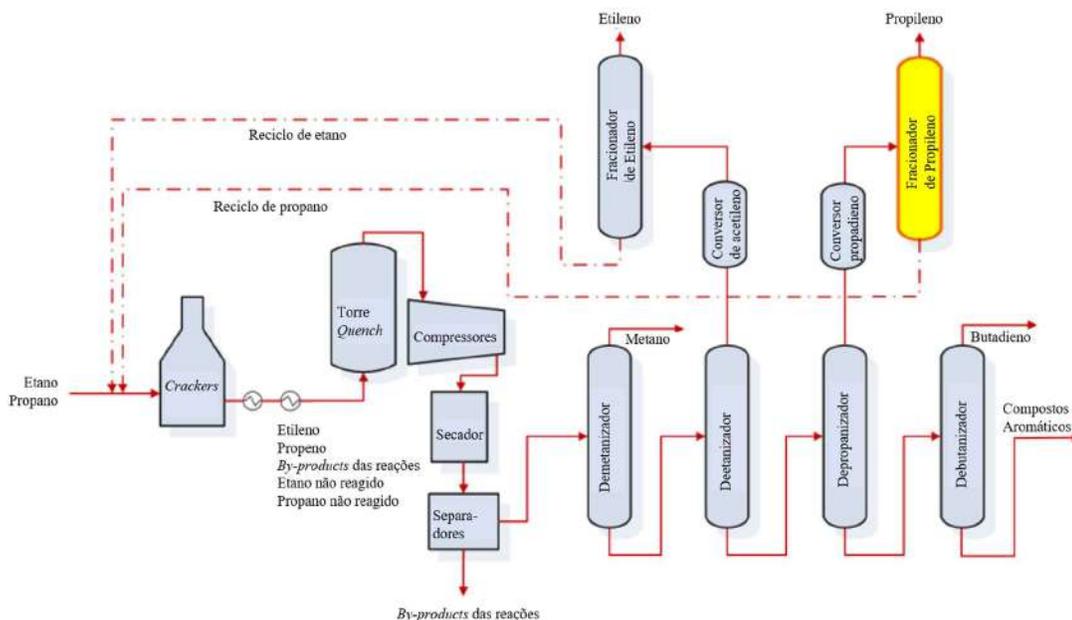
Nesse cenário, destaca-se que diferentes processos foram desenvolvidos para a produção de olefinas em escala industrial. Atualmente, tanto matérias primas fósseis quanto matérias primas renováveis podem ser empregadas para a produção de tais componentes. Para olefinas leves, as principais rotas tecnológicas são o Craqueamento a Vapor – *Steam Cracking* – e o Craqueamento Catalítico Fluidizado – *Fluid Catalytic Cracking*. Além desses dois processos, nos últimos anos outras rotas vêm ganhando relevância em termos industriais, como, por exemplo, a produção de olefinas renováveis por meio de biomassa e da pirólise de lixo plástico (SADRAMELI, 2015; GHOLAMI *et al.*, 2021). À época do acidente, a planta da Williams Geismar utilizava a tecnologia de Craqueamento a Vapor para a produção de olefinas.

O Craqueamento a Vapor é um processo tradicional para a produção de olefinas. Para essa rota, podem ser empregados como matéria-prima (i) frações líquidas do petróleo – como

nafta, proveniente do refino do petróleo cru –, bem como (ii) hidrocarbonetos leves – como etano e propano, componentes separados, por exemplo, de correntes de gás natural. Espera-se obter, a partir de frações líquidas do petróleo, rendimentos¹ de 20% a 40% de eteno e de 14% a 21% de propeno. A partir de hidrocarbonetos leves, por outro lado, a rota prevê a produção de aproximadamente 80% de eteno e 2,4% de propeno. Nos Estados-Unidos, devido à revolução do gás de xisto e ao barateamento do gás natural, houve grande expansão da capacidade de Craqueamento a Vapor à base de hidrocarbonetos leves (CORNOT-GANDOLPHE, 2013; ZHAO; JIANG; WANG, 2021).

Assim sendo, a tecnologia do Craqueamento a Vapor faz com que os hidrocarbonetos saturados sejam transformados em hidrocarbonetos insaturados, por meio do fornecimento de energia térmica ao sistema. Suas plantas são, desse modo, tipicamente compostas por quatro seções principais: (i) fornos (ou *crackers*), (ii) seção de resfriamento, (iii) seção de secagem e compressão e (iv) seções de separação (FAKHROESLAM; SADRAMELI, 2020; GHOLAMI *et al.*, 2021). A Figura 3.1 ilustra o processo produtivo, à base de etano e propano.

Figura 3.1 - Exemplo de unidade produtora de olefinas por Craqueamento à Vapor.



Fonte: Adaptado de CSB, 2016

¹ Trata-se da razão de massa de produto por massa de matéria prima utilizada.

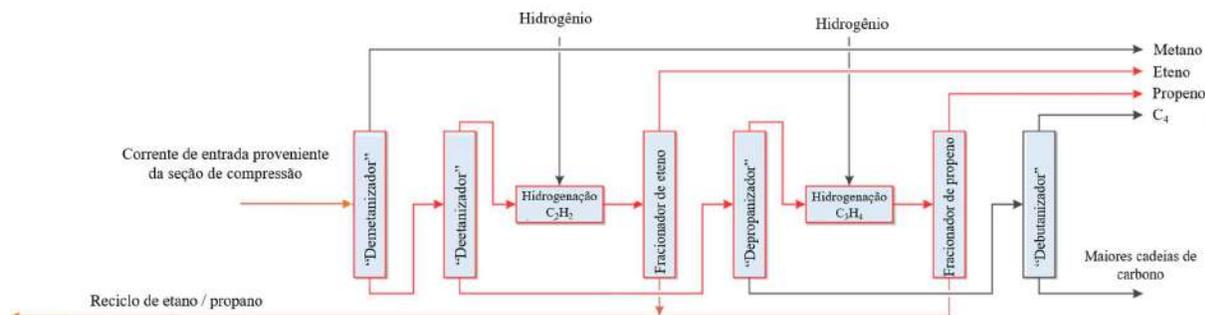
A primeira seção, onde estão presentes os *crackers*, é considerada a principal do processo produtivo em uma planta de olefinas. Nesses equipamentos ocorrem as reações de transformação das cadeias de hidrocarbonetos, utilizados como matéria prima, em olefinas leves. Essas reações são extremamente endotérmicas e necessitam que calor seja cedido ao sistema por meio de uma fonte externa de energia. Esse calor é, geralmente, obtido pela queima de combustíveis nos fornos, o que garante altas temperaturas de operação nos *crackers* (GHOLAMI *et al.*, 2021).

O segundo setor do processo de Craqueamento a Vapor é a seção de resfriamento – ou sistema de *quench*. O objetivo dessa parte do processo é garantir o resfriamento rápido da corrente efluente do *cracker*, para obter o rendimento ótimo de produtos e evitar reações indesejadas. O sistema de resfriamento utilizado depende da matéria prima empregada no processo. Para unidades a base de hidrocarbonetos leves somente o resfriamento direto é aplicado. Nesse mecanismo, o efluente do *cracker* é resfriado a temperaturas próximas à ambiente por meio do contato direto com água dispersada em uma torre *quench*. Há também o sistema de resfriamento indireto, observado geralmente em plantas a base de frações líquidas de petróleo. Nesse sistema o resfriamento é conduzido em uma bateria de trocadores de calor – denominada *transfer line Exchange*. Ao sair dessa seção a corrente é rica em olefinas leves, principalmente eteno, propeno, mas contém outros compostos C₂ (como etino), C₃ (como propadieno) e C₄ (como butadieno) e compostos de cadeias mais longas (FAKHROLESLAM; SADRAMELI, 2020).

A seção de secagem e compressão é a terceira fração do Craqueamento a Vapor. Os produtos obtidos, após a passagem pelo resfriamento, entram, então, em um setor da unidade onde a corrente gasosa passa por compressores e é, em seguida, direcionada a uma seção de remoção de umidade. A parte de compressão do processo compreende normalmente entre 4 e 6 estágios de compressores centrífugos cujo objetivo é elevar a pressão dos produtos à adequada para a operação de separação (FAKHROLESLAM; SADRAMELI, 2020).

Em seguida, a corrente efluente da terceira repartição do Craqueamento a Vapor é direcionada ao último setor do processo, a seção de separação. Em geral, nele emprega-se a destilação criogênica para a separação da corrente gasosa. Essa seção é geralmente composta por 6 colunas de destilação. Três configurações distintas de sequência dessas colunas podem ser encontradas na indústria: “demetanizador” *front-end*, “deetanizador” *front-end* e “depropanizador” *front-end* (FAKHROLESLAM; SADRAMELI, 2020). A primeira das três configurações é descrita em detalhes no parágrafo a seguir e exemplificada na Figura 3.2. Essa primeira configuração era a configuração adotada na planta da Williams.

Figura 3.2 - Configuração "demetanzador" front-end para a seção de separação.



Fonte: Adaptado de Fakhroleslam e Sadramelli, 2019.

Para a configuração “demetanzador” *front-end*, a corrente entra na primeira coluna, o “demetanzador”, que separa a corrente de entrada em uma de topo, rica em H_2 , CO e CH_4 , e uma de fundo, que será enviada para a segunda coluna, o “deetanizador”. Essa coluna divide a entrada em uma corrente de topo, rica em compostos C_2 e em uma de fundo com os demais componentes. A corrente de topo será direcionada a um reator de hidrogenação (“Hidrogenação C_2H_2 ”) que converte o etino a eteno, antes de ser enviada ao fracionador de eteno. Esse por sua vez, separa a corrente em uma que será rica em eteno e outra que será rica em etano. Já a corrente de fundo do “deetanizador” é levada ao “depropanizador”. Esse último separa os compostos C_3 na corrente de topo. Essa corrente é direcionada a um reator de hidrogenação (“Hidrogenação C_3H_4 ”) que converte propadieno a propeno antes de entrar no fracionador de propeno. Esse último separa a entrada em uma corrente rica em propeno e outra rica em propano. Por fim, a corrente de fundo do “depropanizador” é enviada a última coluna de destilação, o “debutanizador”, que separa componentes C_4 , na corrente de topo, dos componentes com maiores cadeias de carbono, na corrente de fundo (FAKHROESLAM; SADRAMELI, 2019).

Para a configuração “deetanizador” *front-end* a primeira coluna da quarta seção é o “deetanizador”. A corrente de topo dessa coluna é em seguida direcionada ao “demetanzador” e segue o processo de maneira similar ao descrito para a primeira configuração – porém, por óbvio, sem passar novamente pelo “deetanizador”. Por fim, a terceira configuração é caracterizada pela presença do “depropanizador” como primeira coluna da última parte do processo e é raramente encontrada para a separação de gases do Craqueamento a Vapor (FAKHROESLAM; SADRAMELI, 2019).

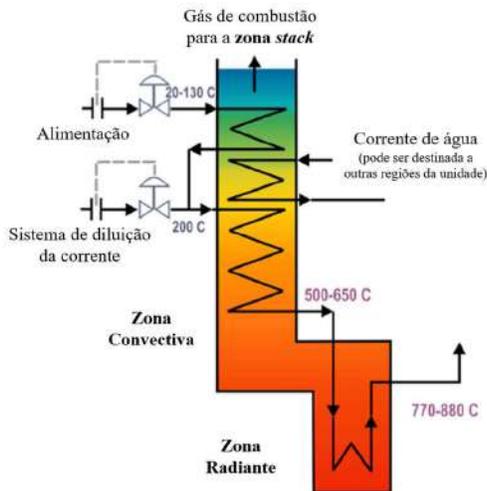
3.2 DESCRIÇÃO DE EQUIPAMENTOS E SISTEMAS EMPREGADOS NO PROCESSO

Os itens a seguir detalham os principais equipamentos e sistemas empregados na produção de olefinas por meio da tecnologia de Craqueamento a Vapor e que estão envolvidos no acidente ocorrido na planta da Williams Geismar em 2013. Esses elementos e sistemas são: (i) *crackers*, (ii) sistema de *quench*, (iii) colunas de destilação e (iv) trocadores de calor.

3.2.1 Crackers

Os equipamentos centrais do processo de obtenção de olefinas por Craqueamento a Vapor são os fornos (*crackers*) da unidade. Em geral, o processo de craqueamento (ou seja, a transformação de hidrocarbonetos em moléculas simples como olefinas leves) ocorre em reatores tubulares. Esses estão presentes dentro dos fornos, a baixa pressão e a altas temperaturas – variando entre 600°C e 900°C. O *cracker* é formado por três zonas: a zona convectiva, zona radiante e a zona *stack* (SADRAMELI, 2015). A Figura 3.3 demonstra uma representação esquemática do equipamento.

Figura 3.3 - Exemplo de um cracker empregado na produção de olefinas.



Fonte: Adaptado de Sadrameli, 2016

A corrente de hidrocarbonetos é pré-aquecida na região de convecção pela presença de gases derivados da combustão. Uma corrente de diluição é misturada à de hidrocarbonetos com três objetivos: aumentar a temperatura da alimentação, diluir a corrente de entrada e mitigar a formação de coque. Em seguida a corrente pré-aquecida e diluída é direcionada a seção radiante, onde é aquecida à temperatura ótima de craqueamento, graças ao calor liberado pela

queima de combustíveis nos queimadores e cedido à corrente. Por fim, no setor de *stack* é onde ocorre a saída dos gases, a temperaturas entre 100°C e 150°C (SADRAMELI, 2015).

3.2.2 Sistema de Resfriamento (Seção de Quench)

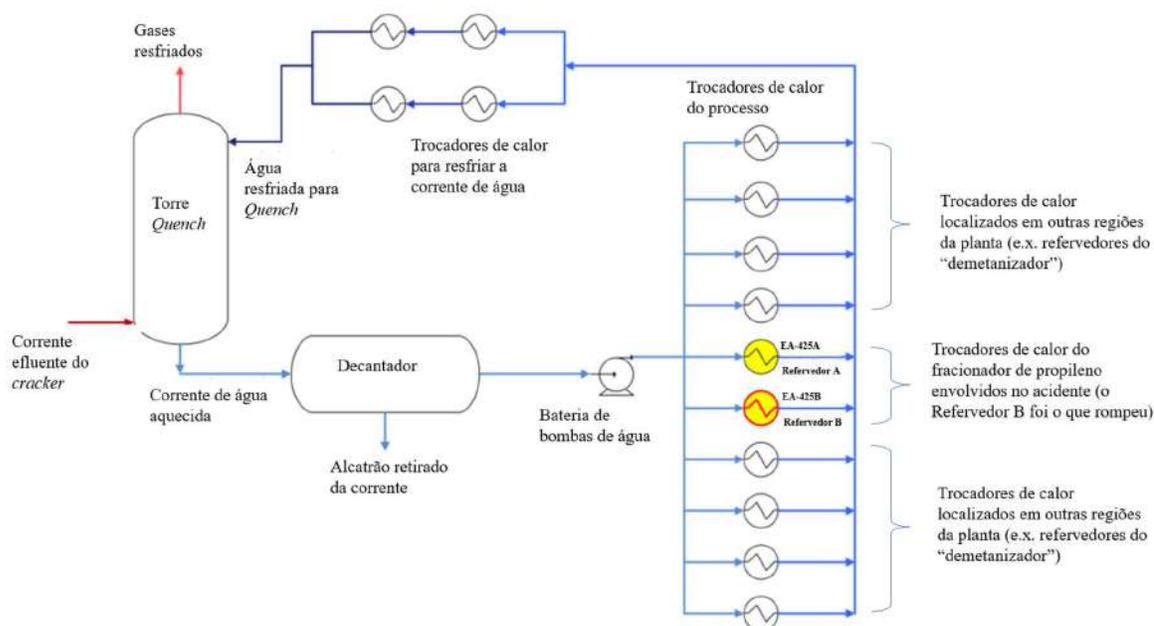
Os gases provenientes dos fornos, estão a temperaturas de até 875°C e precisam ser resfriados rapidamente para preservar a composição da corrente desejada. Por consequência, eles são direcionados a torres de *quench* onde água é pulverizada diretamente sobre a corrente gasosa (EMERSON PROCESS MANAGEMENT, 2010). Na planta de olefinas da Williams a água pulverizada na torre de *quench* era proveniente de um sistema fechado de circulação de água.

O sistema de resfriamento faz parte do sistema fechado de circulação de água da planta de olefinas e engloba a torre de *quench* e os refeedores presentes nas colunas de destilação da unidade. Na torre de *quench*, a água de processo utilizada retira calor da corrente gasosa e é direcionada a diferentes trocadores de calor da unidade. Nos diferentes trocadores de calor, a corrente de água serve como fonte de calor para outras correntes de processo, por meio da troca térmica entre as correntes. Por fim, a corrente aquosa passa por um sistema de resfriamento antes de ser redirecionada a torre de *quench*.

Como a água de processo entra em contato diretamente com a corrente proveniente do *cracker*, o alcatrão formado como *by-product* nesse último equipamento e, assim, presente na corrente gasosa será dissolvido na água pulverizada. Apesar do sistema de circulação possuir um equipamento para a sedimentação de tal composto, inevitavelmente, parte dele permanecerá na corrente de processo. Com o tempo, o alcatrão se adere, gradativamente, nas paredes internas dos equipamentos do sistema de resfriamento, como os refeedores, em um processo denominado de incrustação. Esta incrustação reduz a vazão das correntes de água além da eficiência da transferência de calor dentro dos equipamentos (CSB, 2016).

A Figura 3.4 exemplifica o sistema de circulação de água da unidade da Williams (CSB, 2016). Nela estão exemplificados os equipamentos presentes nesse setor, como a torre *quench*, o decantador (para sedimentação do alcatrão), os trocadores de calor para resfriamento da corrente de água que entra na torre e os trocadores de calor da unidade (precedidos por uma bateria de bombas). Os últimos estão localizados em diferentes regiões da planta, como por exemplo nas diferentes colunas de destilação. Na Figura 3.4 destaca-se dois trocadores de calor, os refeedores A e B, com os respectivos códigos EA-425A e EA-425B. Esses foram os equipamentos envolvidos no acidente, como será detalhado no capítulo 4.

Figura 3.4 - Seção de Quench da planta da Williams Geismar.



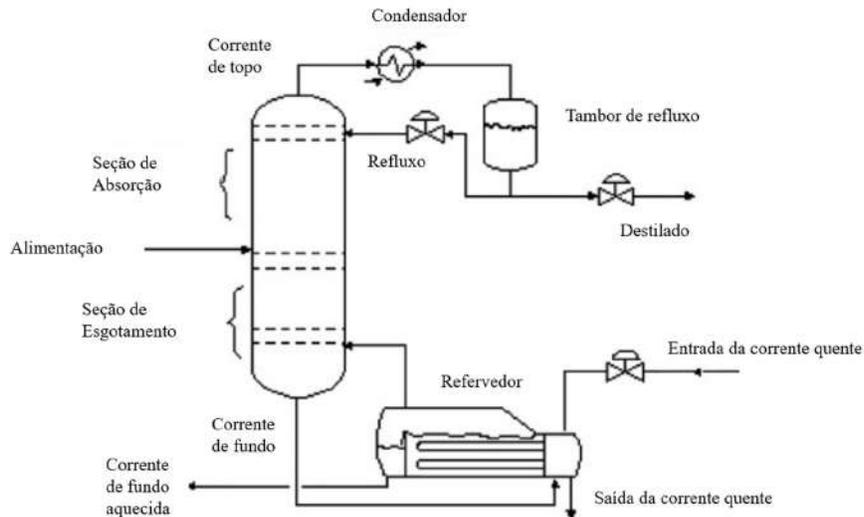
Fonte: Adaptado de CSB, 2016

3.2.3 Coluna de Destilação

As colunas de destilação de uma unidade produtora de olefinas por craqueamento a vapor são equipamentos empregados para a separação dos produtos das reações ocorridas nos *crackers*. De acordo com Speight (2020), colunas de destilação em geral são torres destinadas a promoção de transferência de energia ou de matéria, com o objetivo de separar as substâncias presentes na corrente de entrada. São compostas por: (i) um vaso, onde ocorre a separação, (ii) componentes internos como pratos e bandejas para promover o contato entre as correntes de vapor e líquido, (iii) refervedores para promover a vaporização da corrente de fundo, (iv) um condensador para promover a condensação da corrente de topo e (v) um tambor de refluxo para armazenar o vapor condensado da corrente de topo e permitir o refluxo do líquido.

A Figura 3.5 ilustra uma coluna de destilação típica. Nela estão destacados as seções de absorção e de esgotamento, além dos equipamentos que compõem a coluna. Como a Figura 3.5 exemplifica uma coluna com apenas uma corrente de entrada, o setor de absorção consiste na parcela entre a alimentação e a corrente de topo e o setor esgotamento de consiste na parcela entre a alimentação e a corrente de fundo.

Figura 3.5 - Exemplo de coluna de destilação.



Fonte: Adaptado de Speight, 2020

Em uma unidade produtora de olefinas, como a unidade envolvida no acidente da Williams Geismar 2013, as colunas de destilação podem ser empregadas para diferentes funções. Em especial, as colunas de destilação são empregadas como “demetanizadores”, “deetanizadores”, “depropanizadores”, fracionadores de eteno e fracionadores de propeno (EMERSON PROCESS MANAGEMENT, 2010). Como operam com correntes pressurizadas, os equipamentos de tais colunas, em geral estão conectadas a um sistema válvulas de alívio de pressão para limitar a pressão do sistema a um valor máximo e buscar evitar um cenário de sobrepressão (BODIZS *et al.*, 2015). Em algumas colunas de destilação a válvula de alívio de pressão pode estar localizada somente no topo do vaso onde ocorre a separação, enquanto em outras pode-se encontrar válvulas também conectadas aos demais equipamentos, como os refrervedores (CSB, 2016).

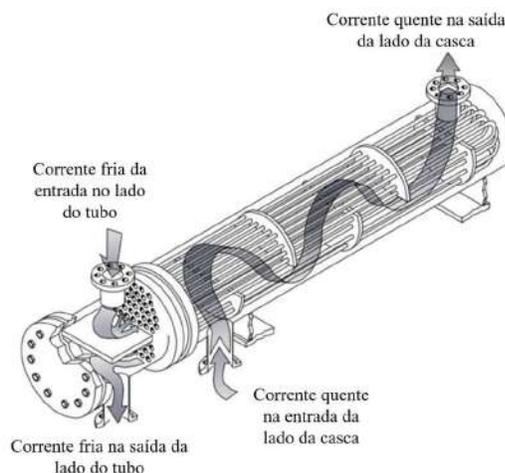
3.2.4 Trocadores de Calor Casca e Tubo

Entre os diversos equipamentos empregados para a promoção da transferência de calor entre duas correntes, os trocadores de calor do tipo casca e tubo são um dos mais empregados na indústria química. Em colunas de destilação, esses podem ser utilizados como refrervedores (CSB, 2016).

Os trocadores casca e tubo promovem a transferência de calor pela circulação de correntes quentes – por exemplo, no lado externo de tubos, denominado lado da casca – em

volta de correntes frias – por exemplo, no lado interno dos tubos, denominado lado do tubo – presentes em tubos dentro da casca cilíndrica. Diversas configurações são possíveis para esses trocadores de calor, inclusive a inversão da configuração das correntes frias e quentes (PARISHER; RHEA, 2022). A Figura 3.6 exemplifica uma das possíveis configurações, onde a corrente quente ocupa o lado da casca do trocador de calor.

Figura 3.6 - Trocador de calor casca e tubo com a corrente quente no lado da casca.



Fonte: Parisher e Rhea, 2022

Os trocadores de calor da coluna de destilação empregada como fracionador de propeno na unidade de olefinas da Williams utilizavam a água de processo aquecida, corrente quente, no lado dos tubos e a corrente de hidrocarbonetos, corrente fria, no lado da casca. A corrente de hidrocarbonetos era composta 95% por propano, sendo os outros 5%, majoritariamente propeno, e C4s – hidrocarbonetos compostos por 4 carbonos. A corrente de água entrava nos refeedores a uma temperatura inicial de 85°C e vaporizava parcialmente a corrente de propano que entrava, aproximadamente, a 55°C. (CSB, 2016).

3.3 PARTICULARIDADES DO PROCESSO DA WILLIAMS GEISMAR

3.3.1 Administração da Planta de Olefinas de Geismar

A planta de olefinas analisada era operada pela Williams Olefins LLC, subsidiária da Williams Companies, Inc em 2013. Ela é uma companhia americana, fundada em 1908, posicionada no setor de infraestrutura de energia, que opera tubulações de gás natural e gás

natural liquefeito, além de unidades de processamento como plantas de olefinas (WILLIAMS, 2022).

A *Williams Geismar Olefins Plant* localizava-se em Geismar, Louisiana, nos Estados Unidos. A unidade foi construída em 1967 utilizando a tecnologia desenvolvida pela Lummus Company e foi operada inicialmente pela Allied Chemical. Antes de ser comprada pela Williams em 1999, a planta era administrada pela Union Texas Petroleum e pela Atlantic Richfield Company. Em junho de 2013, época do acidente, a planta era operada pela Williams, mas a propriedade era dividida entre a empresa e a Saudi Basic Industries Corp. (CSB, 2016).

Em 2017, a atual administradora da planta, a Nova Chemicals, completou a aquisição da Williams Geismar Olefins Plant por 2,1 bilhões de dólares, juntamente com a assinatura de um contrato de longo prazo com a Williams para o fornecimento de matéria prima para a unidade (WILLIAMS, 2017). Atualmente, a planta produz aproximadamente 900 mil toneladas de eteno além de 50 mil toneladas de propeno, empregando cerca de 130 trabalhadores (NOVA CHEMICALS, 2022). A Figura 3.7 representa a planta de olefinas em Geismar (NOVA CHEMICALS, 2022).

Figura 3.7 - Unidade de olefinas em Geismar onde ocorreu o acidente de 2013.



Fonte: Nova Chemicals, 2022

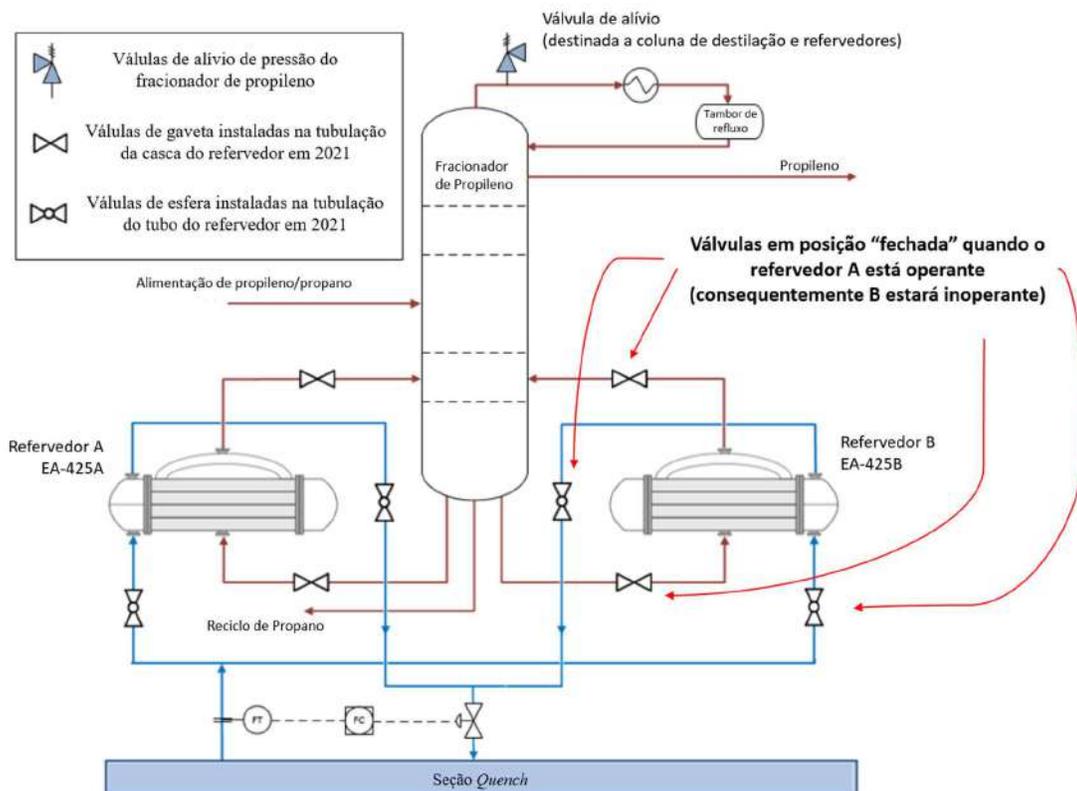
3.3.2 Operação dos Refervedores do Fracionador de Propeno à Época do Acidente

Dentre todas as particularidades que a planta da Williams apresentava à época do acidente, a configuração dos refervedores do fracionador de propeno merece destaque devido a sua relevância para a ocorrência do acidente. Os refervedores do fracionador de propeno, refervedor A e refervedor B, eram identificados pelos códigos: “EA-425A” e “EA-425 B”, como identificado na Figura 3.8 (CSB, 2016).

O desenho original da unidade contava com dois trocadores de calor operando simultaneamente como refervedores no fracionador de propeno. Esses refervedores eram conectados a uma válvula de alívio de pressão localizada na parte superior da torre do fracionador. Devido ao processo de incrustação de alcatrão no sistema de resfriamento, paradas periódicas na operação eram necessárias para a limpeza dos refervedores e consequente remoção do alcatrão acumulado nos equipamentos. (CSB, 2016)

Em 2001, a Williams promoveu uma modificação na planta, instalando válvulas nas correntes de entrada e saída das correntes de processo que passavam pelos refervedores. Essa alteração permitia a organização um processo contínuo, com apenas um único refervedor por vez em operação. Isso porque, a configuração promovida permitia a limpeza e manutenção de um dos equipamentos enquanto o outro estava em operação. Consequentemente, eliminou-se a necessidade de paradas periódicas para a remoção de alcatrão dos refervedores. Dessa maneira um deles permaneceria isolado do processo e inoperante (CSB, 2016). A Figura 3.8 é uma ilustração do fracionador de propeno após as alterações, destacando as válvulas instaladas em 2001 e a válvula de alívio de pressão do fracionador de propeno.

Figura 3.8 - Configuração do fracionador de propeno da planta da Williams após 2001.



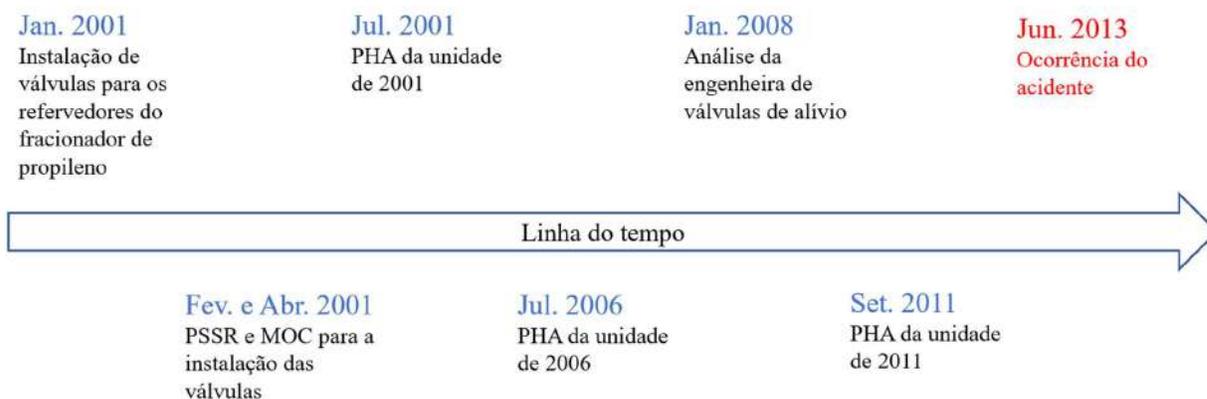
Fonte: Adaptado de CSB, 2016

4 O ACIDENTE DA WILLIAMS GEISMAR OLEFINS PLANT 2013

Este capítulo discute os fatores que contribuíram para a ocorrência do acidente na planta da Williams Geismar em 2013. A investigação desse evento foi concluída em 2016 e resultou em um relatório final elaborado pela CSB, organização investigadora, denominado “Williams Geismar Olefins Plant, Reboiler Rupture and Fire, Geismar, Louisiana” (CSB, 2016). Os itens deste presente capítulo são elaborados com base nesse relatório.

A Figura 4.1 demonstra a linha do tempo com os principais eventos que antecederam o acidente, a partir dos quais serão analisados os fatores contribuintes da explosão:

Figura 4.1 - Linha do tempo de acontecimentos que contribuíram para o acidente de 2013.



Fonte: Adaptado de CSB, 2016

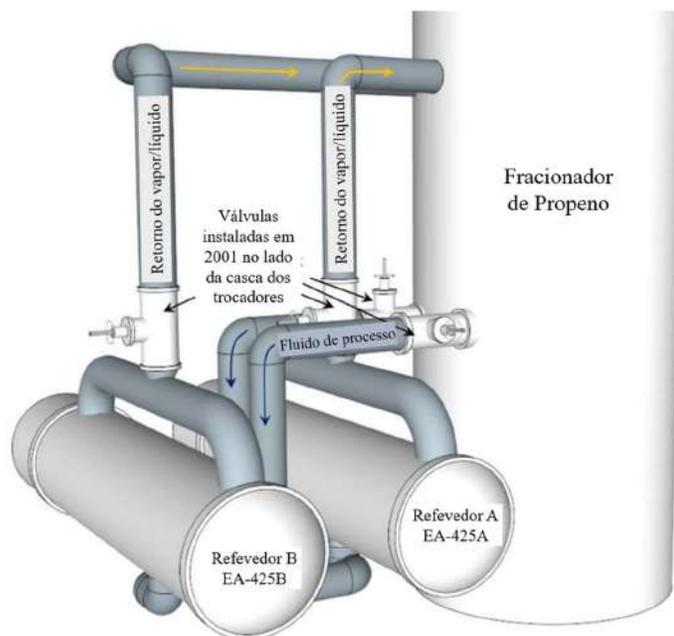
4.1 INSTALAÇÃO DE VÁLVULAS PARA OS REFERVEDORES DO FRACIONADOR DE PROPENO 2001

Em 2013, à época do acidente, a planta da Williams operava com apenas um refervedor por vez no fracionador de propeno. Porém, o desenho original da unidade previa operação de dois refervedores de maneira simultânea, tornando necessária paralisações periódicas dos equipamentos para a limpeza. Para alterar a configuração da planta e permitir um processo contínuo, a organização, em janeiro de 2001, concluiu a instalação de válvulas manuais nas correntes de hidrocarbonetos e nas correntes de água conectadas aos refervedores do fracionador de propeno. As válvulas foram instaladas tanto na entrada, quanto na saída dos refervedores. Essa mesma alteração foi realizada em outros refervedores que compunham o sistema de resfriamento da unidade, com o intuito de garantir que a planta estivesse adequada

para que a operação se desse de forma contínua, ou seja, sem a necessidade de limpezas periódicas dos equipamentos. A Figura 4.2 ilustra o posicionamento das válvulas instaladas nas tubulações do lado da casca dos trocadores de calor, para o caso da coluna de destilação empregada na separação do propeno.

Ao introduzir tais modificações na planta, a Williams aumentou o risco de ocorrência de sobrepressão em equipamentos da unidade produtora de olefinas, especialmente em relação ao sistema do fracionador de propeno. Isso porque, como a válvula de alívio de pressão dessa etapa do processo encontrava-se no topo da coluna de destilação, os trocadores de calor poderiam eventualmente ficar isolados justamente desse mecanismo de segurança. Isso aconteceria em cenários onde as novas válvulas localizadas na tubulação da corrente de hidrocarbonetos, ou seja, no lado da casca dos trocadores, estivessem em posição “fechada”, fazendo com que o caminho entre o refeedor e a válvula de alívio estivesse obstruído.

Figura 4.2 - Posição das válvulas instaladas em 2001 no fracionador de propeno (não indica a tubulação referente ao lado do tubo dos trocadores de calor).



Fonte: Adaptado CSB, 2016

Desse modo, o calor fornecido pela corrente quente, nesse caso, a corrente de água, ou proveniente de qualquer outra fonte externa à corrente de hidrocarbonetos poderia aumentar a temperatura e, conseqüentemente a pressão do conteúdo de hidrocarbonetos que se encontrasse no interior do refeedor. Sem nenhum mecanismo de alívio de pressão, e com as válvulas na

saída e na entrada do trocador na posição “fechada”, o aumento da pressão interna do lado da casca poderia acarretar uma sobrepressão no trocador de calor. Pode-se verificar que, ao adicionar as válvulas para permitir uma operação contínua sem nenhuma salvaguarda adicional, os trocadores de calor perderam uma camada de proteção, tornando-se mais suscetíveis à ocorrência de acidentes.

4.2 REVISÃO DE SEGURANÇA PRÉ-PARTIDA (PSSR) E GESTÃO DA MUDANÇA (MOC) 2001

Já em fevereiro de 2001, a Williams promoveu um questionário com 21 questões sobre segurança antes da partida do processo, para a realização da PSSR como determinada pela OSHA e pela *Environment Protection Agency* (EPA). Isso porque, uma vez realizadas modificações que alteram informações relacionadas à segurança do processo, faz-se necessária a realização dessa revisão antes do início da operação (EPA, 1999; OSHA, 2013). A investigação da CSB (2016) destacou que o documento deveria ser preenchido pelos revisores de PSSR da Williams, porém não apresentou os cargos ou os departamentos responsáveis por ele.

Importante ressaltar que algumas das questões foram respondidas de maneira incorreta, enquanto outras sequer foram endereçadas. Não obstante os equívocos e a ausência de respostas para perguntas relevantes em termos de segurança, o documento foi aprovado pela gestão da operação. A título exemplificativo, destaca-se pergunta não respondida, referente especificamente ao sistema de alívio de pressão, em que se questionou: “Válvula de alívio de pressão está adequada e válvulas de bloqueio estão travadas em aberto? Sistemas de liberação de pressão estão posicionados e operando onde é apropriado?” (CSB, 2016).

Adicionalmente, a OSHA e a EPA preveem a realização de uma revisão de gestão da mudança (MOC), quando há a instalação de novos equipamentos na planta de processo (EPA, 1999, OSHA, 2013). A revisão deve incluir o treinamento da força de trabalho para gerir a nova configuração, além da análise de possíveis impactos em termos de segurança de processo.

A Williams realizou o MOC somente em abril de 2001, ou seja, três meses após o término da instalação das válvulas. A revisão consistia em um questionário, com perguntas de “sim”, “não” ou “não aplicável”. Entre os diferentes departamentos responsáveis por responder este questionário, encontravam-se ao menos os de: operações, de manutenção, técnico, segurança e de engenharia de projetos. A força de trabalho da Williams não identificou novos

riscos ao processo decorrentes da mudança, em especial, ela não identificou a possibilidade de sobrepressão dos vasos.

Segundo a CSB (2016), em relação à instalação de válvulas na entrada de saída de equipamentos pressurizados, a *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) propõe o regulamento “*ASME Boiler and Pressure Vessel Code*”. A Williams aderiria de maneira voluntária a esse regulamento. De acordo com o código, a instalação de válvulas que podem impedir a conexão entre um vaso pressurizado e sua válvula de alívio pode ser realizada caso condições especiais sejam observadas. Para tanto, faz-se imprescindível a verificação que procedimentos de mitigação de riscos foram devidamente implementados. Assim, o regulamento determina a aplicação de medidas de controles administrativas ou hierarquicamente superiores², de forma a garantir uma conexão entre o equipamento e a válvula de alívio. Apesar da aderência ao código, a Williams não adotou nenhum dos controles recomendados.

Em relação a procedimentos de operação da unidade, a Williams possuía um único procedimento genérico para o início de qualquer refeedor. Esse procedimento foi considerado suficiente para a nova configuração, apesar de não contemplar a presença das novas válvulas instaladas em 2001 na entrada e na saída das correntes de fluido de processo dos trocadores de calor.

4.3 PROCESS HAZARD ANALYSIS (PHA) 2001

Outro evento de extrema relevância para a compreensão dos fatores que contribuíram o acidente diz respeito as PHAs realizadas nos anos que antecederam o acidente. Os mecanismos regulatórios da OSHA e da EPA obrigam as unidades químicas americanas a realizarem uma PHA, com uma periodicidade máxima de cinco anos (EPA, 1999; OSHA, 2013). Assim sendo, em julho de 2001, cinco anos após a realização da última PHA, uma análise de riscos foi proposta pela empresa no que tange à planta de olefinas.

Na PHA de 2001, a equipe não identificou a sobrepressão dos refeedores como um possível risco da planta. Todavia, a equipe considerou o cenário onde as novas válvulas

² A hierarquia de controles estabelece uma ordem de eficiência entre os diferentes tipos de controle, de acordo com sua confiabilidade de não falha. Segundo ela, o procedimento mais eficiente é o desenho inerentemente seguro do equipamento (i), seguido de guardas passivas, que reduzem o risco sem necessidade de ativação do equipamento quando solicitado (ii), sistemas de guardas ativas, que necessitam a ativação de um equipamento quando solicitados (iii) e controles procedurais (ou administrativos) que incluem diretrizes e geralmente precisam da ação de um agente humano para estarem disponíveis (HENDERSHOT, 2006), como a instalação de cadeados em válvulas (iv).

estariam fechadas e o classificou como de baixa severidade, cuja consequência seria apenas a alteração nas razões das correntes de fundo do trocador de calor.

A única recomendação feita em relação aos refervedores do fracionador de propeno e ao seu sistema de válvulas foi a adição do último ao diagrama de processo da unidade (*Piping and Instrumentation Diagram – P&ID*) que ainda não havia sido alterado até o momento da realização da PHA. Ou seja, no P&ID ainda não constavam as válvulas manuais instaladas na unidade em 2001.

4.4 PROCESS HAZARD ANALYSIS (PHA) 2006

Cinco anos depois, em julho de 2006, uma nova PHA foi promovida por parte da Williams para a unidade de olefinas em Geismar. Dessa vez, a equipe foi capaz de identificar que os refervedores do fracionador de propeno estariam sujeitos ao risco de uma eventual sobrepressão. Como recomendação da PHA para mitigar a probabilidade de ocorrência de tal evento, a equipe sugeriu que as novas válvulas, localizadas no caminho entre o trocador de calor e a válvula de alívio de pressão, fossem travadas em posição “aberta”. Tal medida administrativa impediria a obstrução dessa tubulação e o isolamento do trocador de calor de seu sistema de alívio de pressão.

A recomendação da equipe responsável pela PHA foi de:

“Considerar o bloqueio aberto de pelo menos uma das válvulas manuais associadas a cada um dos refervedores do fracionador de propeno (EA-425 A/B) para que as válvulas de alívio no topo do fracionador de propeno possam fornecer proteção térmica de alívio para estes refervedores.” (CSB, 2016)

Somente em 2010, ou seja, três anos e meio anos após esse estudo, a equipe identificou como “completa” a recomendação presente na PHA. No entanto, destaca-se que a força de trabalho da unidade travou em posição “aberta” apenas as válvulas localizadas na corrente de saída ao trocador de calor que estava em operação. Desse modo o outro trocador de calor, inoperante, poderia ficar isolado da válvula de alívio do sistema, caso as válvulas de bloqueio instaladas em 2001 estivessem posição fechada.

Para garantir a permanência da válvula em posição aberta a equipe da Williams optou por instalar um cadeado. Essa modificação do processo não só altera informações de segurança como também configura como uma instalação de novos equipamentos. Nesse sentido, esperava-se a realização de uma revisão de gestão da mudança (MOC), prévia à instalação, bem como uma PSSR. Todavia, a força de trabalho da unidade não realizou nenhum dos procedimentos.

Destaca-se que válvulas podem ser travadas com diferentes tipos de cadeados e instrumentos. A título exemplificativo, é possível utilizar cabos metálicos com travas na ponta ou lacres para garantir a permanência da válvula em uma determinada posição, conforme se verifica na Figura 4.3, na qual essa está travada em posição aberta graças a aplicação de um tipo de lacre (MARSZAL, 2021).

Figura 4.3 - Exemplo de bloqueio de válvulas em posição aberta.



Fonte: Marszal, 2021

4.5 ANÁLISE DO ENGENHEIRO DE VÁLVULAS DE ALÍVIO 2008

Em janeiro de 2008, a Williams contratou um serviço terceirizado de engenharia para realizar a análise do sistema de válvulas de alívio da unidade. O objetivo da análise era confirmar se o conjunto desse tipo de salvaguardas presente na planta estava instalado adequadamente e se ele seria capaz de proteger os equipamentos em caso de um aumento de pressão repentino. A engenheira responsável pela condução do estudo foi capaz de identificar a presença de válvulas não travadas na posição aberta, que poderiam aumentar os riscos do processo. Essas válvulas eram as localizadas entre os refeedores do fracionador de propeno e a válvula de alívio de pressão no topo da coluna de destilação desse sistema. De acordo com a análise realizada, essa configuração provocava um aumento do risco de ocorrência de sobrepressão no refeedor.

Além de identificar o problema, a equipe terceirizada também indicou à Williams medidas necessárias para uma operação com níveis de riscos toleráveis em relação ao sistema de alívio de pressão. A engenheira advertiu que todas as válvulas entre os trocadores de calor

do refervedor de propeno – inclusive o refervedor inoperante – e a respectiva válvula de alívio deveriam ser travadas em posição aberta. Ela indicou, também, a possibilidade de proteções adicionais contra a sobrepressão a serem implementadas, que consistiam na instalação de duas novas válvulas de alívio nos trocadores de calor, desenhadas para a proteção da casca dos refervedores do fracionador de propeno.

Apesar das recomendações realizadas pela equipe contratada, a Williams optou por não implementar nenhuma alteração adicional ao processo. A organização considerou que as ações promovidas para endereçar as recomendações da PHA de 2006 – isto é, o travamento das válvulas manuais conectadas apenas ao refervedor em operação – já seriam suficientes.

4.6 PROCESS HAZARD ANALYSIS (PHA) 2011

Novamente, em 2011, a Williams realizou uma PHA para a planta de olefinas. Nessa oportunidade, a equipe responsável se baseou em dois sistemas de documentação da companhia: (i) no sistema interno de rastreio de ações implementadas e (ii) na base de dados relacionada as medidas de gestão da mudança (MOC). A equipe optou por não realizar a auditoria dos documentos utilizados, tampouco realizar uma verificação direta na planta para a condução do estudo.

O sistema de rastreio de ações da empresa informava que as recomendações da PHA de 2006, referentes ao travamento em posição “aberta” das válvulas conectadas aos refervedores do fracionador de propeno, haviam sido completamente implementadas – informação atualizada somente em 2010. Assim sendo, a equipe, apesar de ter considerado o risco de sobrepressão dos trocadores de calor, indicou que dois sistemas de salvaguarda já haviam sido implementados:

1. Válvulas de alívio, localizadas no topo da coluna do fracionador de propeno
2. Cadeados para garantir que as válvulas posicionadas entre os refervedores e as válvulas de alívio estivessem travadas em posição aberta, de modo a assegurar a conexão entre os dois equipamentos

No entanto, não houve a verificação da veracidade das informações presentes nos documentos utilizados como base para a PHA. Desse modo, a equipe responsável pela realização da PHA não foi capaz de identificar que os cadeados não estavam presentes nos dois refervedores do fracionador de propeno, mas apenas no trocador de calor em operação. Por conseguinte, a equipe responsável recomendou tão-somente que o diagrama de processos (P&ID) fosse atualizado, de modo a indicar que ao menos uma das válvulas manuais ligadas a

cada refervedor, localizadas na corrente de fluido de processos estava travada na posição aberta.

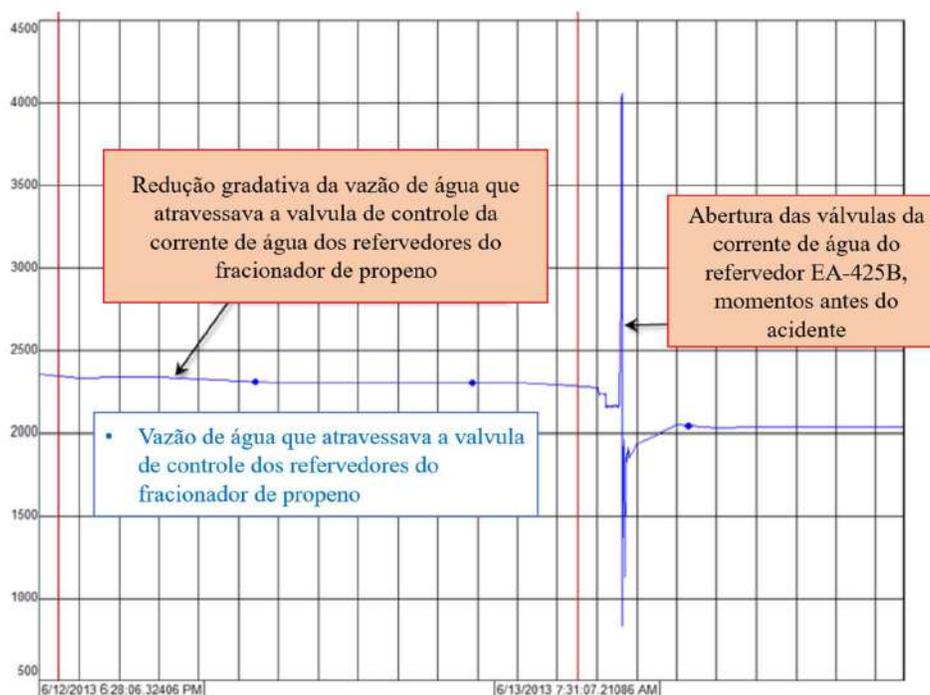
Ao atualizar o diagrama de processos, o coordenador responsável verificou que, de acordo com a lista de cadeados, apenas o refervedor operante estava travado em posição aberta. Ele comunicou tal fato ao responsável pelo sistema de gestão de segurança da unidade e informou que iria refleti-la no diagrama P&ID. Assim, a equipe de gestão da Williams identificou a recomendação da PHA de 2011 como completa, mesmo que somente as válvulas conectadas a um dos refervedores estivessem bloqueadas em posição “aberta”.

4.7 O DIA DO ACIDENTE 2013

4.7.1 Alteração no fluxo de água

Na reunião diária do dia 13 de junho de 2013, a força de trabalho de operações e de manutenção da Williams Geismar Olefins Plant identificou uma alteração no comportamento das vazões de água no sistema de resfriamento da planta. O gerente da planta, presente na reunião, verificou a gradual queda de vazão de água no refervedor operante do fracionador de propeno, o refervedor EA-425A. A Figura 4.4 ilustra a alteração na vazão de água no dia do acidente.

Figura 4.4 - Alteração da vazão de água observada no dia do acidente.



Fonte: Adaptado de CSB, 2016.

Em seguida, sem a existência de um procedimento operacional para casos como esse, a equipe determinou que estaria a cargo do supervisor de operações verificar a causa da queda de vazão observada. Ao analisar o equipamento, o operador identificou, como possível razão para a diferença de vazões observada, a incrustação no refeedor do fracionador de propeno devido ao acúmulo de alcatrão no equipamento. De acordo com o supervisor, seria necessário alterar o refeedor em operação, direcionando a corrente proveniente da coluna de destilação e do sistema de resfriamento para o trocador de calor, até então inoperante. Vale ressaltar que a conclusão alcançada, qual seja, de que a incrustação teria levado à alteração da vazão de água, lastreou-se nas experiências prévias do supervisor.

Logo depois, o supervisor buscou contactar o gerente de operações para a tomada de decisão em relação a troca dos refeedores. Contudo, o gerente estava indisponível e, então, o supervisor retornou ao fracionador de propeno para continuar a análise da alteração observada na vazão de água do sistema de resfriamento.

4.7.2 Ausência de procedimentos de identificação de riscos e manutenção de equipamentos

Nota-se que, antes de qualquer ação tomada pelo supervisor na unidade de olefinas, nenhum procedimento de identificação de risco foi proposto. A alteração dos refeedores em operação significava uma modificação na configuração da planta e, conseqüentemente, uma modificação das informações de segurança. Nesse sentido, a identificação prévia de risco poderia ter sido realizada.

Vale ressaltar que, nem sempre mudanças na operação (que inclusive alteram informações de segurança) impõem a realização de uma análise de riscos, ou de MOCs e de PSSRs. Como exemplo, caso uma alteração tenha sido prevista a nível de projeto, tais análises tornam-se desnecessárias, uma vez que se espera que os riscos da operação e de sua mudança já tenham sido identificados na fase de desenho do processo. Para o caso da Williams, se o refeedor inoperante fosse considerado como em *stand-by*, a mudança realizada pelo supervisor não precisaria estar acompanhada de uma análise de risco. Porém, caso o refeedor fosse considerado como em *out-of-service*, então uma identificação de risco prévia deveria ser realizada. De acordo com a investigação (CSB, 2016), à época do acidente havia uma confusão em relação ao estado do refeedor por parte dos trabalhadores da planta

Ademais, a incrustação de equipamentos do sistema de resfriamento da unidade era um fenômeno recorrente e esperado pela força de trabalho da Williams, devido à própria

configuração da unidade de olefinas. Contudo, a empresa não havia elaborado, até a época do acidente, nenhuma rotina de manutenção periódica visando impedir a ocorrência desse evento no interior dos equipamentos da planta, tampouco estabelecidos procedimentos operacionais para a identificação e gerenciamento desse evento. Importante salientar que a incrustação, não foi causa direta do acidente. A sua eventual presença no equipamento em operação, o refervedor EA-425A, apenas provocou a alteração na vazão observada e a mudança do fluxo de água, por ação do supervisor, para o refervedor EA-425B.

4.7.3 O refervedor inoperante continha mistura rica em propano

A última manutenção realizada no refervedor inoperante, antes do dia do acidente, havia sido em fevereiro de 2012. Durante a manutenção, a força de trabalho preencheu o trocador de calor com nitrogênio e o isolou do processo fechando a válvula localizada na corrente de entrada de fluido de processo do trocador de calor. De acordo com a investigação da CSB (2016), durante o período entre a última manutenção e o dia do acidente, a corrente de fundo do fracionador de propeno, rica em propano, entrou no refervedor, provavelmente devido ao vazamento da válvula fechada ou devido a sua abertura acidental.

Há de se destacar que, de acordo com a CSB (2016), as válvulas instaladas pela Williams na entrada e saída dos refervedores apresentam um histórico de vazamento em posição fechada. De acordo com a CSB, a norma 598 da API³ especifica as taxas de vazamento máximas aceitáveis para válvulas de processo em posição “fechada”. Após o acidente foram realizados testes nas válvulas do refervedor e foi verificado que elas estavam em conformidade com a norma. Acredita-se que o longo período em que o refervedor esteve isolado, sem manutenção, possa ter permitido o acúmulo de fluido de processo no equipamento. Além disso, aberturas acidentais das válvulas durante esse período também podem ter permitido a entrada da mistura no equipamento.

4.7.4 Aumento da pressão interna e explosão do refervedor

Às 8 horas e 33 minutos da manhã do dia 13 de junho de 2013, após o insucesso na tentativa de contactar o gerente de operações, o supervisor abriu a válvula presente na corrente de água, localizada na entrada do refervedor inoperante (EA-425B). Contudo, as válvulas presentes na corrente de hidrocarbonetos dispostas na entrada e na saída do refervedor foram mantidas em posição fechada. Essa configuração permitiu o fornecimento de calor –

³ No Brasil a norma 598 da API é referenciada pela norma ABNT NBR 15827 (API,2020)

proveniente da corrente de água – para o sistema fechado – a parte da casca do trocador de calor – que continha mistura rica em propano líquido. Vale ressaltar que a força de trabalho da Williams não havia mecanismos para detectar a presença de tal mistura no equipamento.

Com o fornecimento de calor, tendo em vista que a corrente de água direcionada ao refeedor estava em aproximadamente 85°, ocorreu o aumento da temperatura do propano líquido. Como as válvulas na entrada e na saída do lado da casca do refeedor estavam fechadas, ocorreu a gradativa expansão térmica da mistura que passou a ocupar todo o volume do lado da casca do trocador de calor. Quando não havia mais espaço para sua expansão, a pressão interna do vaso aumentou rapidamente, provocando um cenário de sobrepressão. Nota-se que o refeedor não dispunha de um sensor interno para verificação da pressão do vaso (ou para a verificação da presença de propano líquido).

Às 8 horas e 36 minutos, três minutos após a abertura das válvulas, a sobrepressão ocasionou uma fratura na estrutura do refeedor. A investigação (CSB, 2016) promoveu um estudo metalúrgico que estimou que a fratura do trocador de calor ocorreu provavelmente devido a pressões entre 674 psig e 1212 psig. A elevada pressão do sistema provocou o aumento abrupto da fratura e a consequente ruptura do equipamento, liberando o conteúdo líquido para a atmosfera. Por sua vez, o líquido superaquecido vaporizou rapidamente e o vapor se expandiu de maneira violenta para a atmosfera, ocasionando um BLEVE (MELHEM, 2018). A Figura 4.5 ilustra o refeedor EA-425B após a explosão (CSB, 2016).

Figura 4.5 - Aparência do refeedor EA-425B após a explosão.



Fonte: Adaptado de CSB, 2016.

A nuvem de propano liberada encontrou alguma fonte de ignição na planta da Williams, provocando uma bola de fogo, em uma explosão de nuvem de vapor (MELHEM, 2018). A explosão e o fogo foram provocaram a morte de dois funcionários da Williams, incluindo o supervisor responsável pela abertura da válvula, além de 167 feridos – à época do acidente a planta passava por uma expansão e um grande número de trabalhadores da construção se encontravam na unidade (CSB, 2016). A Figura 4.6 retrata a bola de fogo decorrente do acidente.

Figura 4.6 - Explosão ocorrida na planta da Williams Geismar em 2013.



Fonte: CSB, 2016.

A CSB (2016) analisou três causas distintas para a sobrepressão que levou ao acidente, sendo elas, (i) o aumento de pressão devido ao aumento da pressão de vapor da corrente líquida, (ii) a expansão e ignição interna pela presença de metil acetileno e propadieno (MAPD), (iii) além da expansão térmica da corrente líquida. Conforme já adiantado, concluiu-se que a foi a expansão térmica a responsável pela catástrofe.

A primeira hipótese de aumento de pressão devido ao equilíbrio líquido vapor foi descartada ao verificarem que a pressão de vapor da corrente de hidrocarbonetos a

aproximadamente 85°C – temperatura da corrente de água – era de aproximadamente 496 psig – não suficiente para causar a fratura do trocador. A segunda hipótese foi descartada ao analisarem que, de acordo com os dados da planta, o percentual de MAPD na corrente de que entrava no fracionador de propeno não excedia a 1,4% em mol. A CSB (2016), indica que eram necessários 60% em mol de MAPD para que a mistura de hidrocarbonetos se decompusesse e entrasse em ignição sem a presença de oxigênio, na temperatura da corrente de água.

Por fim, para confirmar a terceira hipótese, a CSB calculou o volume necessário para que o propano líquido ocupasse todo o trocador de calor a 85°C (temperatura da corrente de água) e, desse modo, verificou que seria necessário 65,5% do volume da parte da casca do trocador ocupado com a mistura de hidrocarbonetos. De acordo com o estudo de Melhem (2018), sob essa temperatura a pressão no interior da casca do trocador de calor pode ter aumentado mais de 2524 psig, o que seria mais do que suficiente para causar a fratura e a ruptura do vaso pressurizado.

Ainda segundo Melhem (2018), a fratura provocou a exposição da mistura líquida de hidrocarbonetos à pressão ambiente e, assim, à abrupta queda de pressão, o que ocasionou uma rápida transição para o estado gasoso. Como consequência, acredita-se que a mistura tenha atingido um pico de pressão de até 7000 psig e uma temperatura de 353,3°C (MELHEM, 2018). Tal temperatura é inferior àquela de autoignição do propano de 470°C (MESSER GASES, 2019), por isso, supõe-se que a mistura tenha encontrado uma fonte de ignição para originar o fogo.

5 ANÁLISE DO ACIDENTE SOB A ÓTICA DO RBPS

A análise do acidente na planta da Williams em Geismar de 2013 (CSB 2016) sob a ótica do sistema de gestão RBPS, proposto pelo CCPS (2007), consiste em identificar os elementos do sistema que falharam ou que não foram adequadamente implementados antes da ocorrência do acidente. Mesmo que muitos elementos possam ter apresentado deficiências ao longo dos anos, foca-se nos principais fatores que contribuíram à ocorrência do acidente de 2013. Vale ressaltar que como os elementos do RBPS estão interligados e, por óbvio, não são mutuamente excludentes, uma mesma falha pode ter influência em dois ou mais elementos.

O objetivo deste capítulo é demonstrar que as chances de ocorrência do acidente de Geismar (CSB 2016) teriam sido reduzidas se um sistema de gestão eficaz, baseado em risco, tivesse sido adotado pela organização. Caso cada elemento do RBPS tivesse sido implementado de maneira adequada, fatores responsáveis pelo acidente poderiam ser evitados.

5.1 FALHAS EM RELAÇÃO A “CULTURA DE SEGURANÇA DE PROCESSOS”

As deficiências em relação ao elemento de “Cultura de segurança de processos” são um dos principais fatores contribuintes para o acidente de junho de 2013. A cultura determina a diligência e a efetividade com que uma organização elabora todos os outros elementos do RBPS. Portanto, ela apresenta-se como um elemento transversal. Quando múltiplos elementos de um sistema de gestão falham, espera-se uma deficiência em relação a cultura de segurança. No caso do acidente da Williams, múltiplos fatores contribuíram para a sua ocorrência.

Para o caso analisado, a não conformidade em relação ao elemento de cultura apresentou um papel tão central, que gerou a identificação, por parte da CSB (2016), de tal deficiência como causa do acidente:

“Nos anos que antecederam o acidente de 13 de junho de 2013, fraquezas significativas na cultura de segurança de processos da Williams Geismar foram evidentes em uma série de deficiências na implementação da gestão da segurança da unidade programas e em fraquezas dos próprios programas escritos. [...] Essas deficiências acabaram por contribuir para a ruptura do refervedor e para a morte de dois empregados.” (CSB, 2016)

Além de estar presente de forma subjacente em outros fatores relacionados aos diferentes elementos do RBPS, as falhas em relação ao elemento de cultura podem ser também observadas em casos concretos.

Um desses casos diz respeito à conclusão do item de recomendação da PHA de 2006, referente a travar em posição aberta as válvulas que se localizavam entre os refervedores e a válvula de alívio no topo da coluna de destilação. Foram necessários mais de 3 anos para que tal recomendação fosse assinalada como concluída, mesmo sendo referente a um risco com altas consequências como a sobrepressão. Isso demonstra um baixo comprometimento com a abordagem de segurança baseada em risco e com uma das principais ferramentas empregadas na unidade para identificar os riscos do processo (CCPS, 2007). Por se tratar de PHAs, essa falha também está relacionada ao item de “Identificação e análise de riscos”.

Como descrito no capítulo 4, após a instalação das válvulas em 2001, a Williams conduziu uma revisão de segurança de pré-partida. O questionário foi respondido pela força de trabalho da Williams, porém de maneira incompleta e, para algumas perguntas, de maneira incorreta. Mesmo assim o documento foi aprovado pela gestão da planta. Uma companhia com forte cultura e comprometimento com a segurança valoriza a elaboração de documentos do sistema de gestão e almeja a excelência nessa elaboração (CCPS, 2007). A não conformidade em relação a condução de PSSR também pode ser relacionada ao elemento de “Prontidão da operação”.

Outro fator que exemplifica uma deficiência em relação ao elemento de cultura do RBPS está relacionado a atitude adotada frente a recomendação da engenheira de válvulas em 2008. A equipe terceirizada identificou que as válvulas ligadas a um dos refervedores do fracionador de propeno – o refervedor inoperante – não estavam travadas em posição aberta e propôs medidas para mitigar o risco de sobrepressão. As medidas, que incluíam o uso de cadeados ou a instalação de válvulas de alívio diretamente no lado da casca dos refervedores, foram, simplesmente, desconsideradas pelos funcionários da Williams.

Adicionalmente, um exemplo de falha em relação a esse elemento diz respeito a percepção de baixo risco para operações que podem acarretar eventos de alta consequência. Como destacado por Hamparian e Kazarians (2017), essa percepção é um fator comum em organizações onde a cultura de segurança não é completamente desenvolvida. Ao decidir abrir a válvula que permitia a entrada de água no refervedor inoperante, o supervisor provavelmente atribuiu um baixo risco para operação, mesmo que as consequências pudessem ser elevadas. A atribuição de baixo risco seria coerente caso o refervedor estivesse em *stand-by* e pronto para entrar no processo – nesse caso, seria justo esperar que a alteração tivesse sido prevista a nível de projeto e um evento de segurança de alta consequência fosse improvável. Contudo, caso o refervedor estivesse *out-of-service*, como acreditava parte da força de trabalho segundo a CSB (2016), essa atribuição de baixo risco seria inadequada e um exemplo de deficiência em relação

a cultura de segurança de processos. A confusão entre *stand-by* e *out-of-service* será também discutida em deficiências relacionadas aos elementos de “Gestão do conhecimento do processo” e “Gestão da mudança (MOC)”.

Tendo em vista a importância de tal elemento para todo o RBPS e das falhas observadas antes do acidente de 2013 a CSB propôs uma recomendação para o aprimoramento dos valores de segurança da empresa. Como recomendação, foi sugerida a formação de um comitê de trabalhadores da Williams, devendo incluir representantes de saúde, de segurança, de gestão, de operações, de manutenção, além de um especialista em cultura de segurança de processos, selecionado pelos outros membros do comitê e independente da unidade de produção. O especialista seria responsável pela condução de uma avaliação periódica – no mínimo a cada 5 anos – da cultura de segurança. O comitê teria o papel de supervisionar a avaliação e revisar o relatório do especialista, garantindo a implementação das recomendações propostas. Por fim, tal relatório deveria ser acessível para os trabalhadores da planta de Geismar (CSB 2016). Portanto, tal recomendação também aprimoraria os outros elementos do RBPS, como o “Envolvimento da força de trabalho”.

5.2 FALHAS EM RELAÇÃO A “CONFORMIDADE COM PADRÕES E NORMAS”

A análise das ações performadas pela Williams nos anos que precederam o acidente permite a conclusão de que o elemento de “Conformidade com padrões e normas” foi mais um elemento do RBPS que apresentou falhas.

A Williams aderiu as normas da ASME, em especial o seu código de refervedores e vasos pressurizado, de maneira voluntária. A seção VIII do seu código de refervedores e vasos pressurizados determina os requisitos em relação ao posicionamento de válvulas de alívio para esses vasos. De acordo com tal código, para a instalação de uma válvula de bloqueio no caminho entre o equipamento pressurizado e sua válvula de alívio de pressão é ao menos necessário aplicar controles administrativos, travamento mecânico, controles de falha da válvula e controles de operação da válvula (CSB 2016). As válvulas instaladas em 2001 são consideradas válvulas de bloqueio quando em posição fechada, tornando necessária a aplicação de tais medidas de salvaguarda para sua instalação. A Williams, porém, optou por não pôr em prática nenhum desses controles, falhando em estar em concordância com uma das normas que adotava. Mesmo após a instalação de um cadeado para travar as válvulas do refervedor em operação, as que estavam conectadas ao refervedor inoperante se mantiveram sem a presença de um controle administrativo e, portanto, ainda em desacordo com o código.

Outra falha referente ao elemento de “Conformidade com padrões e normas” diz respeito ao fato de a realização do MOC para a instalação das novas válvulas de 2001 ter se dado somente após a alteração concluída e a operação iniciada. Quando há a inserção de novos equipamentos na planta, os organismos americanos OSHA e EPA requerem a realização de uma revisão de gestão da mudança antes de sua realização (EPA, 1999; OSHA, 2013). Contudo, a organização optou por realizar tal revisão somente após a instalação das válvulas, falhando em estar em conformidade com tais normas. Essa não conformidade é também uma deficiência em relação ao elemento de “Gestão da mudança (MOC)”.

Ainda referente ao não cumprimento das normas desses dois órgãos americanos, a Williams não realizou um MOC ao introduzir o cadeado para travar em posição aberta a válvula instalada em 2001, conectada ao retervedor operante. A instalação alterava a configuração da planta e, conseqüentemente, demandava a efetuação de uma revisão da mudança. Como as informações de segurança da unidade foram modificadas pela alteração, os órgãos também determinam que uma PSSR seja promovida, o que não ocorreu (EPA, 1999; OSHA, 2013).

O relatório do acidente conduzido pela CSB (2016) também aponta a norma da API 521-2007 à época aplicável a planta de Geismar. A norma era referente a sistemas de alívio de pressão. Segundo ela, o fechamento de uma válvula de bloqueio pode resultar em sobrepressão, o que torna no mínimo necessário o uso de medidas administrativas para controle. Ela afirma que se essa sobrepressão for capaz de ultrapassar a pressão corrigida do teste hidrostático⁴, somente a presença de medidas administrativas pode não ser suficiente para mitigação de riscos. A norma, porém, não explicita a necessidade de outra categoria de medidas. Após o acidente a CSB recomendou a modificação das diretrizes da API para incluir a necessidade a presença de válvulas de alívio de pressão em cenários semelhantes ao encontrado na unidade. Em 2014, a API divulgou uma nova norma, API 521-2014. A partir dela, caso o fechamento de uma válvula de bloqueio implique em um evento de sobrepressão, a presença de um equipamento de alívio de pressão diretamente conectado no vaso pressurizado se faz necessária (CSB, 2016).

5.3 FALHAS EM RELAÇÃO A “GESTÃO DO CONHECIMENTO DO PROCESSO”

⁴ Teste hidrostático é definido na NR-13 (MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA, 2018) como: “tipo de teste de pressão com fluido incompressível, executado com o objetivo de avaliar a integridade estrutural dos equipamentos [...]”. O teste é realizado a uma dada pressão. Para obter a pressão do teste corrigida deve-se multiplicar a pressão do teste pela razão do coeficiente de estresse do material na temperatura desejada sobre o coeficiente de estresse na temperatura do teste (API 521, 2014).

A gestão do conhecimento do processo é mais um elemento que falhou e culminou no acidente em Geismar. Três fatores exemplificam falhas na documentação e atualização de dados relacionados à segurança e a operação do processo.

Primeiramente, a equipe não foi capaz de documentar corretamente a classificação do refervedor inoperante: havia confusão se esse estava em *stand-by*, ou seja, inoperante e pronto para entrar em operação, ou *out-of-service*, ou seja, inoperante e não preparado para entrar e operação. Esse fator também está relacionado a falhas em relação ao item de “Cultura de segurança de processos”, além do item de “Gestão da mudança (MOC)”. Essa confusão pode ser observada quando, após a recomendação de travar as válvulas feita pela PHA de 2006, o refervedor inoperante não teve nenhuma de suas válvulas bloqueadas – nem mesmo a válvula conectada a corrente de saída. Esse fato indica que muitos dos funcionários consideravam o refervedor inoperante como *out-of-service* e que, assim, não precisaria de proteção contra um evento de sobrepresão – por não necessitar estar preparado para ser integrado ao processo. A recomendação da PHA, porém foi explícita ao sugerir a aplicação tal medida a “cada um dos refervedores (EA-425A/B)” – indicando que o refervedor inoperante era visto também como em *stand-by*. Caso a Williams tivesse documentado de forma adequada o status do refervedor, tal confusão poderia ter sido evitada e um sistema apropriado de salvaguarda ter sido aplicado.

O segundo fator relacionado ao elemento de gestão do conhecimento do processo diz respeito ao procedimento de início de refervedores utilizado pela Williams. Um único documento era utilizado pela força de trabalho da Williams para todos os refervedores da planta. De acordo com o documento, o fluido rico em propano estaria no lado do tubo do trocador de calor, enquanto para o refervedor envolvido no acidente, esse fluido estava no lado da casca do equipamento. A Williams deveria estabelecer uma documentação que indicasse a configuração adequada do refervedor e que permitisse identificar o possível cenário de sobrepresão no lado da casca do trocador de calor. Como se tratava de um procedimento da unidade, essa deficiência também tange o elemento de “Procedimentos operacionais”.

Por último, a Williams não atualizava sua documentação com a frequência adequada. Como exemplo, o diagrama de P&ID estava desatualizado em ao menos dois eventos anteriores ao acidente. No primeiro, a equipe não atualizou o diagrama após a instalação das novas válvulas manuais em 2001, implicando em uma recomendação por parte da PHA do mesmo ano de indicar as válvulas no documento. No segundo, também durante a realização de uma PHA, agora em 2011, a equipe verificou que o P&ID da planta não indicava a presença de nenhuma das válvulas travadas em posição aberta. O diagrama de P&ID é um dos principais documentos sobre o processo, detalhando as diferentes etapas da produção. Esse documento é

usado como base de ferramentas de detecção de perigos e análise de riscos na indústria de processo (MECHHOUD; ROUAINIA; RODRIGUEZ, 2016). Conseqüentemente, a sua não atualização frequente dificulta a identificação de riscos relacionados a planta. Ao tratar de PHAs, esse fator também remete a falhas de “Identificação de perigos e análise de riscos”.

5.4 FALHAS EM RELAÇÃO A “IDENTIFICAÇÃO DE PERIGOS E ANÁLISE DE RISCOS”

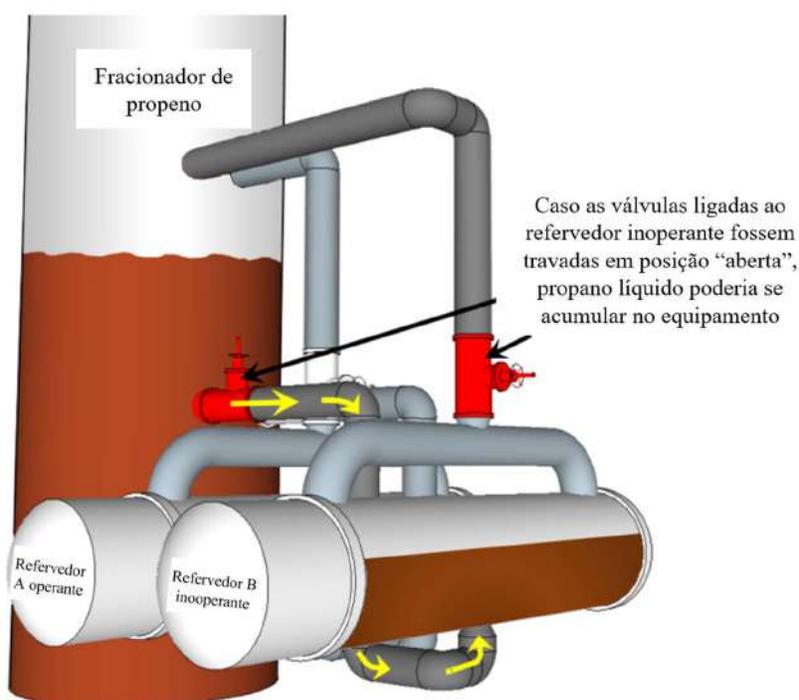
Um dos principais elementos da gestão de segurança baseada em riscos proposta pelo CCPS (2007) é o elemento de identificação de perigos e análise de riscos. A Williams não foi capaz de implementá-lo de maneira adequada, sendo possível associá-lo a diversos fatores que contribuíram para o acidente.

O primeiro fator é a não identificação do perigo de sobrepressão do refeedor durante a realização da PHA de 2001. A sobrepressão é uma das principais causas de acidentes em vasos pressurizados, especialmente para vasos inadequadamente instalados, modificados ou que não tem acesso efetivo a um sistema de alívio de pressão (LADOKUN; NABHANI; ZAREI, 2010). A adequada implementação do elemento de identificação de perigos e análise de riscos implica na busca da excelência na condução de atividades de reconhecimento de riscos, o que passa pela identificação dos riscos mais comuns da unidade (CCPS, 2007). Vale ressaltar que esse fator também tangencia a “Competência em segurança de processos”. Isso porque, ao não ser capaz de identificar o risco, a força de trabalho não garantiu a transmissão do conhecimento e das informações segurança de processos da planta, aspecto do elemento de competência em segurança.

O segundo exemplo de falha em relação a esse elemento consiste na realização de PHAs sob premissas incorretas. Tal fator foi evidenciado na PHA de 2006. A investigação (2016) evidenciou que os responsáveis pela PHA agiam sob a premissa de que ambos os refeedores, EA-425A e EA-425B, operavam simultaneamente. A CSB (2016) não identificou a razão para a presença de tal premissa. Caso os responsáveis pela realização da PHA tivessem total conhecimento da operação teriam identificado que a recomendação de travar em posição aberta ao menos uma das válvulas do refeedor inoperante asseguraria a conexão com a válvula de alívio de pressão, mas também permitiria a entrada e o acúmulo de fluido de processo no equipamento. Essa medida provocaria o acúmulo da mistura rica em propano no equipamento inoperante, o que de acordo com a CSB (2016) não seria prejudicial ao equipamento, mas o preencheria com um líquido inflamável. Sendo assim, essa seria uma recomendação que não

garantiria a segurança inerente do equipamento e, portanto, incomum segundo os investigadores (CSB, 2016). A Figura 5.1 exemplifica esse cenário. Sob premissas corretas, outra medida poderia ter sido proposta, como a instalação de válvulas de alívio nos próprios refervedores ou até mesmo o isolamento total do refervedor inoperante, instalando raquetes tanto nas correntes de água quanto nas correntes de fluido de processo.

Figura 5.1 - Cenário de acúmulo de propano líquido no refervedor inoperante (não indica a tubulação referente ao lado do tubo dos trocadores de calor).



Fonte: Adaptado de CSB, 2016

A fato de análises de risco terem sido realizadas sob falsas premissas também se faz presente na PHA de 2011. Os responsáveis pela identificação de riscos se basearam na documentação da Williams, que indicava ao menos uma das válvulas associadas a cada refervedor travada em posição aberta – tendo em vista que a recomendação de travamento dessas válvulas da PHA de 2006 estava marcada como “completa”. Eles, então, apontaram, incorretamente, que salvaguardas contra o risco de sobrepessão já haviam sido aplicadas e não recomendaram nenhuma mudança adicional para mitigá-lo.

Outro fator que demonstra uma deficiência em relação a esse elemento do RBPS era o processo de resolução de recomendações propostas por uma PHA. Antes do acidente, era

suficiente comunicar ao coordenador do sistema de gestão de segurança que o item já havia sido implementado para que a ação fosse considerada concluída. É também possível observar que o tempo necessário para a conclusão de uma recomendação não era devidamente analisado e a implementação de itens essenciais para a segurança do processo, como a aplicação de salvaguardas, poderia se estender por anos. Uma gestão de segurança que valoriza as ferramentas de identificação e análise de risco deve buscar efetividade na resolução de recomendações de PHA, priorizando as que possuem maior potencial de redução de riscos. Ainda, é essencial que as organizações verifiquem e acompanhem a implementação – ou não implementação – das recomendações, para assegurar a qualidade de seus mecanismos de identificação de perigos e análise de riscos (HE; CARTER, 2020).

Após o acidente, a Williams alterou o processo de PHA e de resolução de recomendações provenientes das análises de riscos. Em primeiro lugar, a Williams padronizou e documentou o procedimento que deveria ser seguido caso uma recomendação proveniente de uma PHA fosse negada ou precisasse ser implementada de maneira distinta da indicada. Dessa forma, tornou-se necessário a documentação do racional que justificasse a não implementação completa da recomendação de uma PHA. Ademais, alterou-se os procedimentos para a resolução de recomendações, passando a ser necessário a realização e documentação de MOCs e PSSRs associados as diferentes sugestões, antes de considerá-las concluídas. Por fim, a Williams também estabeleceu a realização de verificações de campos antes da realização de uma PHA para garantir a acuracidade da documentação utilizada na análise.

5.5 FALHAS EM RELAÇÃO A “PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS”

De acordo com a CSB (2016), a Williams não implementava, de maneira extensiva, rotinas a serem seguidas pelos trabalhadores durante a operação na unidade de Geismar. Conseqüentemente, é possível identificar fatores relacionados ao elemento de procedimentos operacionais que contribuíram para a ocorrência da explosão em 2013.

Como descrito no capítulo 3, devido a configuração da planta de produção de olefinas da Williams, a incrustação em equipamentos da seção de *quench* da planta era um fenômeno comum e conhecido pela força de trabalho. Assim, de acordo com o elemento de procedimentos operacionais do RBPS, esperava-se que a organização tivesse desenvolvido protocolos específicos para a identificação e limpeza dessa incrustação, além de protocolos de entrada em operação do refervedor inoperante. Contudo, tais protocolos não foram desenvolvidos (CSB, 2016). A presença desses procedimentos poderia reduzir a probabilidade de alteração no fluxo

de água do acidente devido a incrustação ou garantir que a partida do refervedor inoperante ocorresse com segurança.

O elemento de procedimentos operacionais também diz respeito aos protocolos de resolução de problemas (*troubleshooting*) de uma organização. De acordo com a CSB (2016), a força de trabalho da Williams não dispunha de procedimentos apropriados e, no dia do acidente, baseava-se exclusivamente nas análises de campo do supervisor. Sem a presença de protocolos adequados, o supervisor decidiu por conta própria analisar o sistema de resfriamento da unidade e colocar em operação o refervedor EA-425B do fracionador de propeno.

Buscando corrigir falhas relacionadas a esse elemento do RBPS, a Williams promoveu mudanças em relação ao sistema de suporte de resolução de problemas. Assim, após o acidente, a Williams instalou um sistema de alarmes para detectar alterações na planta. Quando um alarme fosse acionado no sistema de controle os funcionários poderiam obter diretrizes sobre como agir diretamente no próprio sistema. As diretrizes não só incluem o que os funcionários devem verificar no campo, como também apontam quais são as possíveis consequências – em termos de segurança – relacionadas ao equipamento responsável pelo acionamento do alarme. A recomendação também tangencia melhorias nos elementos de (i) “Identificação de perigos e análise de riscos”, ao facilitar a detecção de perigos durante a operação, de (ii) “Disciplina operacional” ao estabelecer procedimentos visando aprimorar a excelência na execução de tarefas e de (iii) “Gestão da emergência”, em casos em que o alarme é acionado devido a um evento de segurança.

5.6 FALHAS EM RELAÇÃO A “INTEGRIDADE E CONFIABILIDADE DOS EQUIPAMENTOS”

O elemento de integridade e confiabilidade dos equipamentos visa garantir que esses estejam devidamente adequados para o seu propósito. Ao analisar as condições que antecederam o acidente é possível observar fatores que indicam falhas relacionadas a esse elemento do RBPS.

Um primeiro fator relacionado a esse elemento é a ausência de um procedimento de manutenção para o controle da incrustação em equipamentos conectados ao sistema de resfriamento da unidade. Esse fator também tangencia o elemento de “Procedimentos operacionais”, ao passo que uma rotina de manutenção poderia incluir atividades do último (como limpezas periódicas). A ausência de uma rotina de manutenção impedia que o sistema de refervedores do fracionador de propeno, por exemplo, estivesse adequado para o uso a todo

momento da operação. Caso a Williams tivesse seguido as diretrizes de tal elemento do sistema de gestão, ela deveria desenvolver procedimentos formais de manutenção preventivas ou corretivas, os quais buscariam reduzir e controlar o fenômeno de incrustação. Ao estabelecer tais procedimentos a Williams poderia assegurar a troca do refeedor em operação de maneira segura.

A alta disponibilidade de sistemas de segurança de mitigação de riscos é um dos principais fundamentos do elemento de integridade do RBPS. Para os refeedores do fracionador de propeno, a Williams optou por adotar um controle administrativo – cadeados – como salvaguarda contra o evento de sobrepressão. De acordo com o CCPS (2015), a disponibilidade desse tipo de medida é de apenas 90%, enquanto para medidas como válvulas de alívio de pressão é de 99%. Vale ressaltar que a norma da API 521-2007, permitia a instalação de medidas de controle administrativas como salvaguardas, bem como o código de refeedores da ASME explicitava a necessidade de medidas de controle administrativas, e não necessariamente de válvulas de alívio diretamente instaladas nos vasos. Contudo, tivesse a Williams almejado maximizar a disponibilidade dos sistemas de proteção, nos anos que antecederam ao acidente, poderia se esperar que medidas de hierarquia maior tivessem sido implementadas na planta e auxiliado a reduzir as chances de ocorrência do acidente.

Outro fator que exemplifica deficiências em relação a integridade e confiabilidade dos equipamentos é a ausência de mecanismos de prevenção de entrada da mistura líquida rica em propano no refeedor inoperante. Válvulas, como as localizadas na entrada e na saída do lado da casca dos refeedores, podem vaziar permitindo a entrada de propano no equipamento (CSB, 2016). O refeedor EA-425B havia sido submetido a uma última manutenção há mais de um ano antes do acidente. Durante esse período, a mistura rica em propano proveniente do processo entrou no equipamento, seja por vazamento, seja por uma abertura indevida dessas válvulas (CSB, 2016). De acordo com esse elemento do RBPS, a Williams deveria estabelecer atividades para prevenir a liberação repentina de energia. Para o processo em questão, isso pode significar o isolamento de equipamentos inoperantes da corrente pressurizada e rica em propano, impedindo o acúmulo de líquido inflamável em seu interior. A organização poderia ter estabelecido mecanismos de bloqueios mais eficazes, como raquetes.

Por fim, outro fator relacionado ao elemento de integridade e confiabilidade dos equipamentos diz respeito a ausência de um detector de propano no refeedor. Um detector de propano instalado no trocador de calor seria capaz de verificar a presença de fluido de processo no refeedor. A CSB (2016) argumenta que um manômetro também seria capaz de ter alertado o supervisor sobre a presença de propano. Isso porque, durante a última

manutenção o refeedor havia sido preenchido com nitrogênio a 50 psig. Como a investigação (CSB, 2016) calculou que 65,5% do volume do vaso inoperante estava ocupado por propano líquido, espera-se que a pressão do refeedor B era de ao menos 124 psig – a pressão de vapor a temperatura ambiente do fluido de processo. Assim, o manômetro seria capaz de apontar um aumento de pressão e, conseqüentemente, a presença de propano líquido no refeedor.

Após o acidente, visando garantir aos equipamentos da unidade mecanismos de segurança mais confiáveis, a Williams promoveu alterações no desenho da planta. As alterações consistiram na instalação de válvulas de alívio de pressão nos refeedores ligados ao fracionador de propano. Tais válvulas foram instaladas diretamente na parte da casca de ambos os trocadores de calor.

5.7 FALHAS EM RELAÇÃO A “GESTÃO DA MUDANÇA (MANAGEMENT OF CHANGE - MOC)”

A gestão de mudança é mais um elemento que apresentou deficiências em sua implementação por parte do sistema de gestão de segurança da Williams. A ausência de comprometimento por parte da organização em relação a esse elemento pode ser verificada em diversos fatores que antecederam o acidente.

Em primeiro lugar, a realização do MOC referente a instalação das válvulas de 2001 ocorreu apenas após a alteração ter sido concluída. Esse fator também constitui uma falha referente ao elemento de “Conformidade com padrões e normas”. Para além dessa falha, esse evento é uma desvirtuação dos objetivos e dos princípios chaves do elemento de MOC do RBPS. O MOC visa revisar os aspectos relacionados a segurança de processos mudanças propostas, decidindo se permitirá ou não a sua ocorrência (CCPS, 2007). Por isso, é imprescindível que, para sua correta realização, tal revisão seja feita, por óbvio, anteriormente a própria modificação.

O segundo fator que demonstra a deficiência em relação ao elemento de MOC está relacionado com o próprio comprometimento da força de trabalho na realização dessa revisão. Os operadores da Williams não depositavam a devida importância nessa ferramenta presente no RBPS. O MOC era uma “checklist” de questões de “sim”, “não” ou “não aplicável”, eventualmente respondidas de maneira inadequada pela força de trabalho da Williams (CSB, 2016). Esse fato também está relacionado ao elemento de “Cultura de segurança de processos”, por tratar da seriedade com que as ferramentas de segurança eram abordadas pela organização. No questionário do MOC de 2001, o departamento de segurança da Williams indicou que não

seria necessária a realização de uma PHA para a mudança realizada, mesmo que a instalação da válvula alterasse significativamente as informações de segurança do processo. O objetivo do MOC também é garantir a verificação de que nenhum risco não previsto foi introduzido ao processo (FAULK; DA FONSECA, 2022). No caso da Williams, esse objetivo não foi alcançado.

Ainda vale ressaltar, que a confusão em relação ao status do refervedor inoperante também representa uma deficiência em relação ao presente elemento do RBPS. Isso porque devido a confusão entre os conceitos de *stand-by* e *out-of-service*, não era claro a necessidade de realização ou não de um MOC ou de uma análise de risco prévia a alteração do refervedor conectado ao fracionador de propeno em operação. Caso o trocador de calor inoperante estivesse em *stand-by*, a troca entre os equipamentos já deveria ter sido prevista a nível de projeto e, portanto, seria considerada parte da rotina de operação da planta e não demandaria a efetuação de um MOC. Contudo, caso o equipamento estivesse *out-of-service*, a realização do MOC seria necessária uma vez que modificaria a operação e suas informações de segurança.

Por fim, a Williams não foi capaz de constatar a necessidade de realização de MOCs de maneira adequada. Um dos princípios chaves desse elemento do RBPS diz respeito a identificação de todos os potenciais cenários de modificação que exigirão um MOC (CCPS, 2007). Porém, organização não promoveu uma revisão para a instalação de cadeados para bloquear as válvulas em posição aberta – bloqueio que havia sido recomendado pela PHA de 2006. A modificação introduziu novos equipamentos no processo e alterou aspectos de segurança da planta. Consequentemente, uma revisão, anterior a mudança, seria requerida para avaliar os possíveis impactos e decidir se a alteração teria permissão para ocorrer ou não. Um MOC para a recomendação de 2006 seria uma ferramenta propícia para perceber que os responsáveis pela PHA daquele ano agiam sob premissas incorretas em relação ao processo da unidade de olefinas – fator relacionado ao item de “Identificação de perigos e análise de riscos”.

Após o acidente, em vista das deficiências relacionadas ao MOC, a Williams promoveu alterações no processo de gerenciamento da mudança. A organização estabeleceu uma equipe de revisão para MOCs, para avaliar de maneira coletiva quando um documento de revisão da mudança fosse elaborado. Com isso buscou-se estabelecer um maior comprometimento com tal ferramenta, garantindo que as perguntas sejam respondidas de maneira adequada pela força de trabalho. Essa alteração também foi responsável por aprimorar o elemento de “Envolvimento da força de trabalho”, ao promover um debate conjunto sobre uma das principais ferramentas de gestão de segurança. De acordo com a investigação da CSB (2016),

a Williams estabeleceu métodos para identificar quais são as alterações que necessitam de MOC e para garantir que a revisão seja concluída antes do início da instalação.

Ainda buscando endereçar falhas relacionadas ao sistema de gestão de segurança, a companhia desenvolveu definições claras sobre *stand-by* e *out-of-service* para a classificação dos equipamentos da planta. Essas definições endereçavam falhas tanto relacionadas ao elemento de MOC, quanto ao elemento de “Gestão do conhecimento do processo” e “Prontidão para operação”. A nova classificação era instruída em treinamentos e estava documentada em procedimentos operacionais. Ela sinalizava que somente os equipamentos *out-of-service* poderiam não apresentar salvaguardas de alívio de pressão, enquanto para os equipamentos *stand-by*, tais mecanismos eram necessários (CSB, 2016). Ademais, ela assinalava a necessidade da realização de um MOC apenas para introdução de um novo equipamento na operação da unidade. Ao documentar de maneira formal tais conceitos a Williams também contribuiu para melhoras em relação ao elemento de “Gestão do conhecimento do processo”.

A discussão a respeito de como endereçar equipamentos *out-of-service* se mantém relevante e atual. Após o acidente, a Williams indicou que os vasos da unidade nesse status não necessitavam de mecanismos de alívio de pressão. Porém, vale ressaltar que, em novembro de 2022, a CCPS (2022b), em sua publicação “Fora de serviço não significa seguro”, destacou a importância de continuar a monitorar os dados de processo e os alarmes de equipamentos *out-of-service*, além de tratá-los nas inspeções de campo como se estivessem em operação. No documento, destaca-se o incidente ocorrido em uma fábrica de tintas em Danvers, Massachusetts, Estados Unidos em 2006, onde, devido ao desligamento de equipamentos, vapores inflamáveis escaparam de um tanque e provocaram a explosão da unidade. A análise da publicação indica que, possivelmente, a definição da Williams dada para os equipamentos *out-of-service* não tenha sido a mais adequada. Para uma maior adequação, também deveria ter sido destacada a necessidade de um monitoramento dos dados provenientes desses – no caso do refeedor do fracionador de propeno, poder-se-ia esperar a obrigatoriedade do monitorar os níveis de propeno. A Figura 5.2, destaca os grandes danos provocados a unidade na fábrica de tintas pela explosão.

Figura 5.2 - Imagens da fábrica de tintas de Danvers, Massachusetts, Estados Unidos antes (esquerda) e depois (direita) da explosão de 2006



Fonte: Adaptado de CCPS, 2022b

5.8 FALHAS EM RELAÇÃO A “PRONTIDÃO PARA A OPERAÇÃO”

Ao analisar os eventos anteriores ao acidente pode-se observar exemplos que demonstram falhas na tentativa de garantir que, quando necessário, processos estejam prontos para serem religados, aspecto principal do elemento de prontidão para a operação. Em especial, pode-se destacar exemplos relacionados a disponibilidade do refervedor inoperante para entrar em operação e a revisão de pré-partida da operação. Como discutido no capítulo 2, elemento de prontidão da operação está associado ao elemento de “Gestão da mudança (MOC)”. Dessa forma, as falhas discutidas no presente elemento também podem tangenciar o último.

No que diz respeito ao refervedor inoperante, esse não estava preparado para a entrada imediata em operação. Como as válvulas manuais localizadas nas correntes de fluido de processo do trocador de calor estavam em posição fechada, a abertura da corrente de água para o refervedor provocou o aumento de sua pressão interna e a sua conseqüente ruptura. De acordo com a CCPS (2007), o objetivo do elemento de prontidão é garantir que os processos e equipamentos inoperantes estejam verificados para a entrada em operação, o que não é válido para esse caso. Vale destacar que essa deficiência é somente válida ao considerar o status do refervedor EA425- B como *stand-by*. Se estivesse *out-of-service* a discussão de prontidão seria incoerente, uma vez que, por definição, ele não estaria adequado para a entrada no processo.

A PSSR de 2001, realizada um mês após a instalação das válvulas no mesmo ano, foi respondida de maneira incompleta e incorreta. A fase de pré-início do processo, é uma fase crítica do projeto e uma oportunidade para identificar qualquer risco que tenha sido adicionado por uma mudança e que ainda não tenha sido sinalizado. A PSSR desse ano consistia em um questionário que não foi completamente respondido e, mesmo assim, aprovado pela gestão da planta, mostrando um baixo comprometimento com a elaboração dessa revisão. Esse fator

demonstra uma falha tanto em termos de prontidão da operação quanto em termos de “Cultura de segurança de processos”.

Outro fator que exemplifica as falhas em relação a atividades ligadas a esse elemento é a capacidade da força de trabalho de constatar a necessidade de realização de PSSRs. Assim como em relação ao MOCs, ao instalar os cadeados para o travamento das válvulas do refervedor operante em posição aberta era necessário a realização de uma PSSR. Isso porque a instalação alterava as informações de segurança relacionadas ao processo, ao estabelecer uma salvaguarda adicional ao sistema. Contudo, tal PSSR jamais foi realizada.

5.9 FALHAS EM RELAÇÃO A “DISCIPLINA OPERACIONAL”

O elemento de disciplina operacional é mais um elemento que apresentou falhas antes da ocorrência do acidente analisado. Tanto as ações no dia do acidente como a forma como eram conduzidas as ferramentas de segurança por parte da força de trabalho da Williams não demonstram um alto comprometimento em institucionalizar a excelência na execução de tarefas e de procedimentos.

O primeiro fator relacionado a falhas no elemento de condução da operação está atrelado a ação do supervisor no dia da operação. Devido a inexistência de procedimentos operacionais de resolução de problemas, a força de trabalho confiava exclusivamente no julgamento do supervisor. A investigação da CSB (2016) verificou que, de maneira geral, a força de trabalho possuía a autorização informal de analisar desvios do processo – no caso do acidente, desvios em relação a vazão de água – sem a presença de um procedimento escrito de atuação. Com isso, a Williams não garantia a devida formalidade na condução de tarefas e não garantia de forma sistemática uma execução segura, confiável e consistente.

Outro evento ocorrido no dia do acidente exemplifica deficiências em relação a disciplina operacional. Ele diz respeito ao fato de o supervisor não ter conseguido estabelecer a comunicação com o gerente de operações no dia do acidente. De acordo com a investigação da CSB (2016), essa era uma corrente típica de comunicação utilizada pela organização para a tomada de decisões. Em um cenário em que esse gerente estava inacessível, o supervisor agiu por conta própria e tomou a decisão de alteração do refervedor que estava em operação. Um dos aspectos principais da disciplina operacional está em garantir a comunicação confiável entre os diferentes trabalhadores da unidade para manter uma operação segura e controlada. Esse aspecto não foi observado no dia do acidente.

Klein (2009), considera o elemento de condução da operação do RBPS como sendo o comprometimento de cada membro na realização de sua tarefa da maneira apropriada. Assim, o caráter com que a força de trabalho implementava as ferramentas de segurança (PSSR, PHA e MOC) pode ser destacado como mais uma deficiência do elemento analisado. De maneira estrutural, não era garantida a excelência na condução de tais avaliações, tendo em vista que muitas dessas eram respondidas de maneira incompleta e com respostas incorretas.

5.10 FALHAS EM RELAÇÃO A “INVESTIGAÇÃO DE ACIDENTES”

Por fim, pode-se constatar que a investigação de acidentes é mais um elemento do sistema de gestão de segurança da Williams que apresentou deficiências. A avaliação de acidentes externos e sua aplicabilidade em relação aos processos da organização são atividades desse elemento. Uma investigação de acidentes externos adequada, que verificasse a sua aplicabilidade ao processo da planta de olefinas, poderia contribuir para que a Williams implementasse medidas de segurança adicionais contra o risco de sobrepressão.

Primeiramente, acidentes envolvendo vasos pressurizados são frequentes e amplamente divulgados por organismos de investigação, como a própria CSB. Investigações e relatórios de acidentes de vasos pressurizados sem acesso a um sistema de alívio de pressão como os ocorridas em Sonat Exploration Company de 1998 (CSB 2000), na D.D. Williamson & Co. de 2003 (CSB 2004) na Marcus Oil & Chemical 2004 (CSB 2009) são apenas alguns exemplos dessa categoria. Esses três acidentes demonstram que, sem acesso a proteções contra a sobrepressão, equipamentos pressurizados podem gerar acidentes catastróficos.

Além dos acidentes citados, destaca-se ao menos um acidente similar ao evento na unidade de Geismar em 2013, ocorrido menos de cinco anos antes. É o caso do acidente de 2008 da Goodyear Tire & Rubber Company (CSB 2011). Na unidade da Goodyear, um trocador de calor utilizava amônia líquida para resfriar os fluidos de processo. Em junho de 2008, operadores da Goodyear fecharam uma válvula localizada na corrente entre o trocador de calor e a sua válvula de alívio, para a manutenção da última. Contudo, após a operação a válvula fechada não foi reaberta. No dia seguinte, um operador fechou a outra válvula que conectava o trocador de calor ao controle de pressão de amônia e, em seguida, introduziu vapor ao sistema para limpeza do equipamento. O vapor transferiu calor à amônia presente no equipamento, provocando o aumento de pressão e a sua conseqüente explosão. O acidente da Goodyear demonstrava a importância de garantir o acesso a mecanismos de alívio de pressão aos equipamentos pressurizados de uma unidade. O relatório da investigação da CSB (2011)

foi concluído apenas dois anos antes do acidente em Geismar. A presença do acidente da Goodyear e a disponibilidade do relatório de investigação, poucos anos antes do ocorrido em Geismar em 2013, não foram suficientes para provocar uma mudança no sistema de salvaguardas da Williams e demonstram uma falha na conformidade do elemento de investigação de acidentes.

5.11 RESUMO DAS FALHAS RELACIONADAS AO MODELO DE RBPS

O Quadro 5.1 resume os exemplos de elementos do RBPS que falharam, os associando com os fatores contribuintes para o acidente da Williams Geismar em 2003.

Quadro 5.1 - Elementos do RBPS e fatores relacionados a cada elemento e contribuintes ao acidente.

Elemento do RBPS	Fatores relacionados
Cultura de Segurança de processos	<ul style="list-style-type: none"> • Multiplicidade de falhas contribuintes para o acidente • Mais de três anos para a resolução de recomendações de PHA de 2006 • Preenchimento parcial, com respostas incorretas, da PSSR de 2001 • Não aplicação de recomendações da engenheira de válvula de alívio • Percepção de baixo risco para operações que podem ter altas consequências
Conformidade com padrões e normas	<ul style="list-style-type: none"> • Desacordo com o código de refervedores e vasos pressurizados da ASME adotado pela Williams • Não realização do MOC antes da instalação de novos equipamentos, como determinado pela OSHA e EPA • Não realização de PSSR da instalação de novos equipamentos, como determinado pela OSHA e EPA
Gestão do conhecimento do processo	<ul style="list-style-type: none"> • Não documentação do status do refervedor inoperante (<i>stand-by</i> ou <i>out-of-service</i>) • Presença de um único documento para dar início aos diferentes refervedores • Não atualização frequente de diagramas P&ID
Identificação de perigos e análise de riscos	<ul style="list-style-type: none"> • Não identificação do risco de sobrepressão na PHA de 2001 • Realização da PHA de 2006 e de 2011 com base em premissas incorretas • Mais de três anos para a resolução de recomendações da PHA de 2006

Elemento do RBPS	Fatores relacionados
Procedimentos Operacionais	<ul style="list-style-type: none"> • Ausência de procedimentos de identificação de incrustação • Ausência de procedimentos operacionais formais de "troubleshooting"
Integridade e confiabilidade dos equipamentos	<ul style="list-style-type: none"> • Ausência de procedimentos de identificação de incrustação e de entrada em operação do refervedor inoperante • Adoção de salvaguardas de menor hierarquia de controle para eventos de maior risco (ex. sobrepressão) • Ausência de mecanismos de prevenção de vazamentos de válvulas e sua abertura inadvertida • Ausência de um detector de propano no refervedor do fracionador de propeno
Gestão da mudança (MOC)	<ul style="list-style-type: none"> • Não realização do MOC antes da instalação de novos equipamentos, como determinado pela OSHA e EPA • MOC referente a instalação das válvulas de 2001 com respostas incorretas • Confusão a respeito do status do refervedor inoperante (<i>stand-by</i> ou <i>out-of-service</i>) • Dificuldade em constatar a necessidade de realização de MOCs para modificações realizadas na planta
Prontidão da operação	<ul style="list-style-type: none"> • Refervedor inoperante despreparado para a entrada em operação • Preenchimento parcial, com respostas incorretas, da PSSR de 2001 • Não realização de PSSR da instalação de novos equipamentos, como determinado pela OSHA e EPA
Disciplina Operacional	<ul style="list-style-type: none"> • Utilização do julgamento do supervisor como procedimento de <i>troubleshooting</i> • Ação do supervisor sem o estabelecimento de uma comunicação adequada com superiores • PSSR, PHA e MOCs respondidos de maneira incompleta, incorreta e eventualmente não identificando riscos do processo
Investigação de acidentes	<ul style="list-style-type: none"> • Presença de múltiplas investigações da CSB sobre acidentes relacionados a vasos pressurizados sem acesso a mecanismos de alívio de pressão • Presença de acidente similar (Goodyear 2008) menos de cinco anos antes do acidente

Fonte: Elaboração própria

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho exposto tem por objetivo analisar o acidente catastrófico ocorrido na planta da Williams Geismar, Louisiana, nos Estados Unidos em 2013, sob a ótica das diretrizes do RBPS. A finalidade do trabalho consiste em demonstrar que a aplicação adequada dos elementos propostos pelas diretrizes reduziria a probabilidade de ocorrência do evento.

Um sistema de gestão de segurança eficaz é essencial para a mitigação de riscos em uma unidade química. Com o aumento da complexidade de processos e a consequente emergência de grandes acidentes no século XX, a segurança de processos, juntamente com suas ferramentas de gestão, passaram a ganhar um papel cada vez mais de destaque na indústria. Em diferentes partes do mundo foram criadas organizações especializadas, como a OSHA, HSE e a WSO, e foram elaboradas diretrizes e leis, como a “Seveso directive”, para disseminar a importância de sistemas de gestão de segurança para mitigação de riscos. Visando aprimorar ainda mais tais ferramentas, por meio de uma abordagem de gerenciamento baseada em riscos, a CCPS (2007) estabeleceu as diretrizes do RBPS, acessíveis as organizações de todo o globo.

O RBPS é um *framework* que propõe iniciativas para melhorar a efetividade do sistema de gestão de segurança. Ele é composto por 20 elementos distintos agrupados em 4 pilares. Para cada elemento são propostos diretrizes, procedimentos e atividades a serem adotados para melhorar uma esfera específica da segurança de processos de uma companhia.

No presente trabalho, esse *framework* é utilizado para o estudo do acidente da planta da Williams de 2013. À época, uma explosão de um dos refeedores do fracionador de propeno da planta provocou a morte de dois funcionários e feriu outros 167. A explosão BLEVE se deu após a abertura inadvertida de uma corrente de água para um refeedor inoperante que continha mistura rica em propano. O calor cedido pela corrente de água provocou o aumento de pressão da mistura e a consequente ruptura do vaso pressurizado que a continha. A análise do acidente demonstra que múltiplos fatores contribuintes foram responsáveis por sua ocorrência, alguns remontando mais de 10 anos da ocorrência do evento.

A análise promovida pelo trabalho indica os elementos do RBPS que falharam e, portanto, contribuíram para o acidente. Caso a Williams tivesse implementado de maneira adequada as práticas propostas pelo sistema de gestão de segurança baseado em risco, as chances de ocorrência do acidente poderiam ter sido reduzidas. Dentre os 20 elementos totais do RBPS, foram destacados 10 que apresentaram deficiências notáveis, quais sejam: “Cultura de segurança de processos”, “Conformidade com padrões e normas”, “Gestão do conhecimento do processo”, “Identificação de perigos e análise de riscos”, “Procedimentos operacionais”,

“Integridade e confiabilidade dos equipamentos”, “Gestão da mudança (MOC)”, “Prontidão da operação”, “Disciplina operacional” e “Investigação de Acidentes”.

Ademais, vale ressaltar o papel de destaque do elemento “Cultura de segurança de processos” tanto para o RBPS, quanto para a ocorrência do acidente analisado. Antes do sistema de gestão proposto pelo CCPS, a cultura de segurança já havia sido apontada por diferentes autores como uma esfera chave para a melhoria dos sistemas de gestão de segurança existentes. Para o RBPS a cultura é um elemento central, tratado como o fator que determina a diligência e a efetividade com que todos os demais elementos serão implementados pela companhia. Contudo, como exemplifica o caso da Williams, muitas organizações ainda apresentam deficiências em relação a essa esfera da segurança de processos. A CSB em sua investigação (2016) do acidente destacou explicitamente problemas em relação a esse elemento como uma das causas principais do acidente. Falhas nesse elemento do RBPS, juntamente com não conformidade em relação aos demais elementos abordados no capítulo 5, contribuíram para a ocorrência do acidente catastrófico observado em Geismar 2013.

7 CONCLUSÃO

De acordo com os diferentes elementos e assuntos discutidos durante a realização deste trabalho, concluiu-se que:

- Sistemas de gestão de segurança são mecanismos relevantes de prevenção de acidente que vem ganhando notoriedade.
- O RBPS é um framework com atividade e métodos para sistemas de gestão de segurança proposto pelo CCPS visando aprimorar a eficiência de sistemas já existentes.
- O trabalho analisa a explosão ocorrida na planta de olefinas de Craqueamento a Vapor da Williams em Geismar, Louisiana, nos Estados Unidos em 2013.
- Os 10 elementos que apresentaram deficiências notáveis e que contribuíram para o acidente foram: “Cultura de segurança de processos”, “Conformidade com padrões e normas”, “Gestão do conhecimento do processo”, “Identificação de perigos e análise de riscos”, “Procedimentos operacionais”, “Integridade e confiabilidade dos equipamentos”, “Gestão da mudança (MOC)”, “Prontidão da operação”, “Disciplina operacional” e “Investigação de Acidentes”.
- A implementação adequada de um sistema de gestão de segurança com elementos como os apresentados no RBPS poderia ter contribuído para a prevenção desse evento de segurança.

8 REFERÊNCIAS

ABNT. Quem somos, c2022. Página Inicial. Disponível em: <https://www.abnt.org.br/institucional/sobre>. Acesso em: 01 set. 2022

ALDER, Andrew *et al.* **Examples of effective workforce involvement in health and safety in chemical industry.** Londres: HSE, 2000.

ANP. **Relatório de investigação do incidente de explosão ocorrido em 11/02/2015 no FPSO cidade de São Mateus.** [S.L.], [S.N.], 2015.

API. **API Standards: International Usage and Deployment.** Estados Unidos: [S.N.], 2020.

API. **API RP 754.** 3. ed. [S.L.]:[S.N.], 2021a.

API. About API, c2021b. Página Inicial. Disponível em: <https://www.api.org/about>. Acesso em: 25 de set. 2022

BATTAGIN, Inês L.d.S.. Norma não é lei, mas por força de lei é obrigatória. CREA-SC, 2014. Disponível em: <http://www.crea-sc.org.br/portal/index.php?cmd=artigos-detalle&id=3077#.YzGUJzTMI2w>. Acesso em: 19 out. de 2022.

BODIZS, L *et al.* Dynamic models for safety shutdown of distillation columns. **Chemical Engineering Research and Design**, [S.L.], v. 99, p. 208-214, jul. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2015.03.030>.

CCPS. **Guidelines for Risk Based Process Safety.** Hoboken, Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2007.

CCPS. **Guidelines for Process Safety Metrics.** Hoboken, Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2010.

CCPS. **Guidelines for Initiating Events and Independent Protection Layers in Layer of Protection Analysis.** Hoboken, Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2015.

CCPS. CCPS Process Safety Glossary, c2022a. Página Inicial. Disponível em: <https://www.aiche.org/ccps/resources/glossary?title=process+safety+management+system#views-exposed-form-glossary-page>. Acesso em: 01 set. 2022

CCPS. Fora de serviço não significa seguro. **Process Safety Beacon**, [S.L.], nov. 2022b. [S.N.].

CORNOT-GANDOLPHE, Sylvie. **The Impact of the Development of Shale Gas in the United States on Europa's Petrochemical Industries.** França: French Institute of International Relations (Ifri), 2013. Disponível em: <https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/versionengscg29nov.pdf> . Acesso em: 09 set. 2022.

COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. Council Directive of 24 June 1982 on the major-accident hazards of certain industrial activities. **Official Journal of the European**

Communities, [S.L.], v. 230, p. 1-18, ago. 1982.[S.I.]. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:31982L0501&from=EN>. Acesso em: 17 out. 2022

COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. Council Directive 96/82/EC of 9 December 1996 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances. **Official Journal of the European Communities**, [S.L.], v. 10, p. 13-33, jan. 1997.[S.I.]. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:31996L0082&from=EN>. Acesso em: 25 out. 2022

CSB. **Investigation Report Catastrophic Vessel Overpressurization**. Pitkin, Louisiana, 2000. Disponível em: <https://www.csb.gov/sonat-exploration-co-catastrophic-vessel-overpressurization/>. Acesso em: 25 set. 2022.

CSB. **Investigation Report Catastrophic Vessel Failure**. Louisville, Kentucky, 2004. Disponível em: <https://www.csb.gov/d-d-williamson-and-co-catastrophic-vessel-failure/>. Acesso em: 25 set. 2022.

CSB. **Case Study Polyethylene Wax Processing Facility Explosion and Fire**. Houston, Texas 2006. Disponível em: <https://www.csb.gov/marcus-oil-and-chemical-tank-explosion/>. Acesso em: 26 set. 2022.

CSB. **Investigation Report Refinery and Fire**. Texas City, Texas, 2007. Disponível em: <https://www.csb.gov/bp-america-refinery-explosion/>. Acesso em: 25 set. 2022.

CSB. **Case Study Heat exchanger rupture and ammonia release in Houston, Texas**. Houston, Texas 2011. Disponível em: <https://www.csb.gov/goodyear-heat-exchanger-rupture/>. Acesso em: 25 set. 2022.

CSB. **Williams Geismar Olefins Plant, Reboiler Rupture and Fire**. Geismar, Louisiana, 2016. Disponível em: <https://www.csb.gov/williams-olefins-plant-explosion-and-fire/>. Acesso em: 15 jul. 2022.

CSB. **Pressure Vessel Explosion at Loy-Lange Box Company**. St. Louis, Missouri, 2022. Disponível em <https://www.csb.gov/loy-lange-box-company-pressure-vessel-explosion/>. Acesso em: 25 set. 2022.

CROW, Daniel A.; LOUVAR, Joseph F.. **Chemical process safety: fundamentals with applications**. 2. ed. Upper Saddle River, Nova Jersey: Pearson Prentice Hal, 2002.

CULLEN, W. Douglas. **The public inquiry into the Piper Alpha disaster**. [S. L.]: [S. N.], 1990. v. 1. Disponível em: <https://www.hse.gov.uk/offshore/piper-alpha-public-inquiry-volume1.pdf>. Acesso em: 04 out. 2022

EMERSON PROCESS MANAGEMENT. **Ethylene Production**. Estados Unidos: [S.N.], 2010. Disponível em: <https://www.emerson.com/documents/automation/manuals-guides-chemical-sourcebook-chapter-1-2-ethylene-production-polysilicone-production-fisher-en-138242.pdf>. Acesso em: 12 aug. 2022.

EPA. **Appendix A: 40 CFR Part 68**. Estados Unidos: [S.N.], 1999. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2013-11/documents/w-arendab.pdf>. Acesso em: 03 aug. 2022.

FAKHROLESLAM, Mohammad; SADRAMELI, Seyed Mojtaba. Thermal/catalytic cracking of hydrocarbons for the production of olefins; a state-of-the-art review III: process modeling and simulation. **Fuel**, [S.L.], v. 252, p. 553-566, set. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.127>

FAKHROLESLAM, Mohammad; SADRAMELI, Seyed Mojtaba. Thermal Cracking of Hydrocarbons for the Production of Light Olefins; A Review on Optimal Process Design, Operation, and Control. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [S.L.], v. 59, n. 27, p. 12288-12303, 11 jun. 2020. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acs.iecr.0c00923>.

FAULK, Nancy; DA FONSECA, Camila C.. MOC 101 -Fundamentals for effective change management. *In: Global Congress on Process Safety, 18., 2022, Anais Eletrônicos [...]* Texas: American Institute of Chemical Engineers, 2022. Disponível em: <https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/prs.12388>. Acesso em: 29 jul. 2022.

FEDERICA, Di Vito. Pre-startup Safety Review Performance and Close-out Management for a New Licensed Petrochemical Plant. **Chemical Engineering Transactions**, [S.L.], v. 82, p. 25-30, out. 2020. AIDIC: Italian Association of Chemical Engineering. <http://dx.doi.org/10.3303/CET2082005>.

FRANK, W.L.. Process safety culture in the CCPS risk based process safety model. **Process Safety Progress**, [S.L.], v. 26, n. 3, p. 203-208, 2007. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/prs.10201>.

GHOLAMI, Zahra *et al.* A Review on the Production of Light Olefins Using Steam Cracking of Hydrocarbons. **Energies**, [S.L.], v. 14, n. 23, p. 8190, 6 dez. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en14238190>.

HALE, A.R. Culture's confusions. **Safety Science**, [S.L.], v. 34, n. 1-3, p. 1-14, fev. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0925-7535\(00\)00003-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0925-7535(00)00003-5).

HAMPARIAN, Alek; KAZARIANS, Mardy. Identifying Safety Culture Deficiencies in Facilities with the Potential for High Consequence/Low Probability Events. *In: Mary K O'Connor Process Safety Symposium, 20., 2017, Estados Unidos. Anais Eletrônicos [...]* [S.L.]:[S.N.], 2017. Disponível em: <https://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/193526/Hamparian%2c%20Alek.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 09 de out. 2022.

HE, Emma Q.; CARTER, Richard.. “We Must Be Safe, Right? We Had a PHA”: Effectively Crafting and Implementing PHA Recommendations. *In: Global Congress on Process Safety, 2020, Houston., Anais Eletrônicos [...]* [S.L.]:[S.N.], 2020. Disponível em: <https://www.acm.ca/sites/default/files/news-article-pdfs/Effectively%20Crafting%20and%20Implementing%20PHA%20Recommendations%20%28Final%29.pdf>. Acesso em: 15 out. 2022.

HENDERSHOT, Dennis C.. An overview of inherently safer design. *Process Safety Progress*, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 98-107, jun. 2006. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/prs.10121>.

HENDERSHOT, Dennis C.. Process safety management-You can't get it right without a good safety culture. *Process Safety Progress*, [S.L.], v. 31, n. 1, p. 2-5, 21 out. 2011. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/prs.10501>.

HOCHLEITNER, Monica; ROCHE, Eloise. Auditing management systems for safety controls, alarms, and interlocks: how effective are your instrumented protective systems?. *Process Safety Progress*, [S.L.], v. 36, n. 3, p. 301-306, 6 fev. 2017. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/prs.11875>.

ISO. Standards, c2022. Página Inicial. Disponível em: <https://www.iso.org/standards.html>. Acesso em: 10 set. 2022

JAYARAMAN, Siti N.B.F.R.; SHARIFF, Azmi M.; ZAINI, Dzulkarnain. Stakeholder outreach on process safety for process industry using risk based approaches. *Process Safety Progress*, [S.L.], v. 39, n. 1, p. 1-8, 26 dez. 2019. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/prs.12130>.

KASNIAK, Mark. Examining Organizational and Safety Culture Causes of the BP Texas City Refinery Explosion. *In: Case Studies to Maximize Compliance with Process Safety Management*, 2009, Filadelfia. Anais [...] [S.L.]:[S.N.], 2009.

KHAN, Faisal; RATHNAYAKA, Samith; AHMED, Salim. Methods and models in process safety and risk management: past, present and future. *Process Safety and Environmental Protection*, [S.L.], v. 98, p. 116-147, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2015.07.005>.

KHAN, Faisal *et al.* Dynamic risk management: a contemporary approach to process safety management. *Current Opinion In Chemical Engineering*, [S.L.], v. 14, p. 9-17, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coche.2016.07.006>.

KLEIN, James A.. Operational discipline in the workplace. *Process Safety Progress*, [S.L.], v. 24, n. 4, p. 228-235, dez. 2005. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/prs.10099>.

KLEIN, James A.; DHARMAVARAM, S.. Improving the performance of established PSM programs. *Process Safety Progress*, [S.L.], v. 31, n. 3, p. 261-265, maio 2012. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/prs.11494>.

KNEGTERING, B.; PASMANN, H.J.. Safety of the process industries in the 21st century: a changing need of process safety management for a changing industry. *Journal Of Loss Prevention In The Process Industries*, [S.L.], v. 22, n. 2, p. 162-168, mar. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2008.11.005>.

LADOKUN, Temilade; NABHANI, Farhad; ZAREI, Sara. Accidents in Pressure Vessels: Hazard Awareness. *In: World Congress on Engineering*, 2., 2010, Reino Unido. Anais [...] [S.L.]:[S.N.], 2010.

LI, Yuling; GULDENMUND, Frank W.. Safety management systems: a broad overview of the literature. *Safety Science*, [S.L.], v. 103, p. 94-123, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2017.11.016>.

MACZA, Murray. A Canadian Perspective of the History of Process Safety Management Legislation. *In: Internationale Symposium Programmable Electronic System in Safety-Related Applications*, 8., 2008, Cologne. *Anais eletrônicos [...] Cologne: [S.N.]*, 2008, p.1-12. Disponível em: <https://www.acm.ca/sites/default/files/news-article-pdfs/A%20Canadian%20Perspective%20of%20the%20History%20of%20PSM%20Legislation.pdf>. Acesso em: 01 out. 2022.

MAJID, Noor Diana Abdul; SHARIFF, Azmi Mohd; LOQMAN, Shahirah Mohamed. Ensuring emergency planning & response meet the minimum Process Safety Management (PSM) standards requirements. *Journal Of Loss Prevention In The Process Industries*, [S.L.], v. 40, p. 248-258, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2015.12.018>.

MARSZAL, Edward M.. You have safety instrumented system bypassed right now and don't know it. *Process Safety Progress*, [S.L.], v. 41, n. 1, p. 85-94, 13 ago. 2021. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/prs.12299>.

MECHHOUD, El-Arkam; ROUAINIA, Mounira; RODRIGUEZ, Manuel. A new tool for risk analysis and assessment in petrochemical plants. *Alexandria Engineering Journal*, [S.L.], v. 55, n. 3, p. 2919-2931, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2016.05.013>.

MELHEM, Georges A.. *Thermal Expansion Estimates*. Estados Unidos: IoMosaic Corporation, 2018.

MESSER GASES. *A Ficha de informações de segurança de produtos químicos – propano*. São Paulo: [S.N.], 2019.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA. **NR 33 – Segurança e Saúde nos Trabalhos em Espaços Confinado**. Brasília: Ministério do Trabalho e Previdência, 2006. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-33.pdf>. Acesso em: 11 set. de 2022.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA. **NR 35 – Trabalho em Altura**. Brasília: Ministério do Trabalho e Previdência, 2012. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-35.pdf>. Acesso em: 12 out. de 2022.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA. **NR 13 – Caldeiras, Vasos de Pressão, Tubulações e Tanques metálicos de armazenamento**. Brasília: Ministério do Trabalho e Previdência, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-13.pdf>. Acesso em: 04 out. de 2022.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA. *Normas Regulamentadoras – NR*, 2022.

Página Inicial. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/ctpp-nrs/normas-regulamentadoras-nrs>. Acesso em: 25 set. 2022

NIVOLIANITOU, Zoe; KONSTANDINIDOU, Myrto; MICHALIS, Christou. Statistical analysis of major accidents in petrochemical industry notified to the major accident reporting system (MARS). **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 137, n. 1, p. 1-7, set. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.12.042>.

NOVA CHEMICALS. Geismar, LA, USA, c2022. Página Inicial. Disponível em: <https://www.novachem.com/locations/geismar-la-usa/>. Acesso em: 25 set. 2022.

OSHA. **1910.119 - Process safety management of highly hazardous chemicals**. Estados Unidos: [S.N.], 2013. Disponível em: <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.119>. Acesso em: 03 set. 2022.

PARISHER, Roy A.; RHEA, Robert A.. **Pipe Drafting and Design**. 4. ed. Estados Unidos: Gulf Professional Publishing, 2021.

SADRAMELI, S.M.. Thermal/catalytic cracking of hydrocarbons for the production of olefins: a state-of-the-art review I: Thermal cracking review. **Fuel**, [S.L.], v. 140, p. 102-115, jan. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.034>.

SADRAMELI, S.M.. Thermal/catalytic cracking of liquid hydrocarbons for the production of olefins: a state-of-the-art review II: Catalytic cracking review. **Fuel**, [S.L.], v. 173, p. 285-297, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.01.047>

SCHEIN, Edgar H.. **Organizational culture and leadership**. 3. ed. São Francisco, Califórnia: Jossey-Bass, 2004.

SPEIGHT, James G.. **The Refinery of the Future**. 2. ed. Estados Unidos: Gulf Professional Publishing, 2000.

UIJT DE HAAG, P.A.M.; ALE, B.J.M.. **Guidelines for Quantitative Risk Assesment (Purple Book)**. Haia: Committee For The Prevention Of Disasters, 1999.

ZHAO, Zhitong; JIANG, Jingyang; WANG, Feng. An economic analysis of twenty light olefin production pathways. **Journal Of Energy Chemistry**, [S.L.], v. 56, p. 193-202, maio 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jechem.2020.04.021>.

WILLIAMS. Our Company, c2022. Página Inicial. Disponível em: <https://www.williams.com/our-company/>. Acesso em: 25 set. 2022

WILLIAMS. Williams Partners Agrees to Sell Its Interests in the Geismar Olefins Facility to NOVA Chemicals for \$2.1 Billion; Announces Long-Term Feedstock Supply and Transportation Agreements with NOVA Chemicals, 2017. Página Inicial. Disponível em: <https://investor.williams.com/press-releases/press-release-details/2017/Williams-Partners-Agrees-to-Sell-Its-Interests-in-the-Geismar-Olefins-Facility-to-NOVA-Chemicals-for-21-Billion-Announces-Long-Term-Feedstock-Supply-and-Transportation-Agreements-with-NOVA-Chemicals/default.aspx>. Acesso em: 25 set. 2022