



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA DE QUÍMICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**AVALIAÇÃO DE FATORES HUMANOS VIA
MODELO DO QUEIJO SUÍÇO: ESTUDOS
DE CASO**

FERNANDA AZEVEDO RIBEIRO

Monografia em Engenharia Química

Orientador

Prof. Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

Março de 2022

**AVALIAÇÃO DE FATORES HUMANOS VIA MODELO DO
QUEIJO SUÍÇO: ESTUDOS DE CASO**

Fernanda Azevedo Ribeiro

Monografia em Engenharia Química submetida ao Corpo docente da Escola de Química como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel.

Aprovado por:

Kese Pontes Freitas Alberton, D.Sc.

Fernanda Teodoro Magalhães, B.Sc.

Orientado por:

Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Março de 2022

Ribeiro, Fernanda Azevedo.

Avaliação de fatores humanos via modelo do queijo suíço: estudos de caso/ Fernanda Azevedo Ribeiro. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2022

vi, 82 p.; il.,

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2022.

Orientador: Carlos André Vaz Junior

1. Fatores humanos. 2. Segurança de Processos. 3. Acidentes industriais. 4. Monografia. (Graduação UFRJ/EQ). 5. Carlos André Vaz Junior. I. Título

AGRADECIMENTOS

Na Universidade Federal do Rio de Janeiro, pude me desenvolver tanto profissionalmente como pessoalmente. Foram 12 períodos, 3645 horas, 209 créditos, além de monitoria de cálculo, iniciação científica e empresa júnior. Preciso citar também o intereng, as booms, os momentos no DAEQ, no quilowatts, no yakisoba e as pessoas que eu pude conhecer e que desejo levar para a vida.

Dedico esse trabalho aos meus pais, Adriana e Alexandre, pelo incentivo aos estudos e cujos esforços me permitiram ingressar em uma universidade federal. O apoio de vocês e da minha irmã, Gabriela, foi fundamental para que eu pudesse superar mais este desafio.

Agradeço a minha amiga e irmã de coração, Karen, pelo companheirismo e por sempre me ajudar, tanto na vida pessoal quando na profissional;

Aos meus amigos do SAN: Amanda, Beatriz, João e Thiago. Meus dias no Fundão se tornaram bem mais agradáveis e divertidos com a presença de vocês;

Ao meu orientador do trabalho de conclusão de curso, Carlos André pelo incentivo e suporte no desenvolvimento da minha monografia, cujo apoio foi fundamental.

Agradeço também à Roche, por todas as oportunidades e aprendizados que o meu primeiro estágio e emprego me proporcionaram. Lá pude ter meu primeiro contato com gerenciamento de riscos, investigação de desvios e análise da robustez dos processos na prática. Um agradecimento especial à Tatiana, Karolina e Marina.

Resumo da Monografia apresentada à Escolha de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Química.

AVALIAÇÃO DE FATORES HUMANOS VIA MODELO DO QUEIJO SUÍÇO: ESTUDOS DE CASO

Fernanda Azevedo Ribeiro

Março, 2022

Orientador: Prof. Carlos André Vaz Junior

Entender os fatores humanos e como eles influenciam a segurança de processos é importante para um gerenciamento de riscos eficaz e aprender a partir de eventos passados é necessário para que os mesmos erros não sejam cometidos novamente. Neste trabalho, foram feitos dois estudos de caso de acidentes industriais a partir dos relatórios de investigação e utilizou-se o modelo de Queijo Suíço de Reason para analisar a trajetória das falhas que culminaram nos eventos. O primeiro acidente estudado foi a explosão de óxido de etileno utilizado para esterilizar materiais médico hospitalares na empresa Sterigenics em Ontario, Califórnia em 2004. No dia do ocorrido, uma das etapas descrita no procedimento não foi realizada, fazendo com que uma corrente com concentração explosiva de óxido de etileno chegasse ao queimador. Como consequência, esse gás sofreu ignição e a câmara de esterilização explodiu. O segundo estudo de caso foi sobre a explosão ocorrida na refinaria de óleo da BP em 2005, na Cidade do Texas, Texas. Na época do acidente, diversos equipamentos não estavam funcionando da maneira adequada e era costume dos funcionários realizar uma série de violações aos procedimentos. No entanto, os mesmos não eram questionados por essas atitudes e havia tolerância a desvios. Uma sucessão de erros fez com que uma nuvem de hidrocarbonetos fosse liberada pela atmosfera pelo tambor de purga e descarte após horas do início do processo de partida da unidade de isomeração. Em seguida, essa nuvem, levada pelo vento, sofreu ignição após alcançar uma caminhonete com o motor ligado. Também foram analisados outros acidentes, como o ocorrido durante uma apresentação experimental de um tornado de fogo no museu The Discovery em 2014 em Reno, Nevada e o maior acidente aéreo, em 1977 em Tenerife, no arquipélago das Ilhas Canárias. Apesar das atividades laborais serem diferentes, notou-se diversos pontos em comum na sequência de erros que levaram aos acidentes citados. Observou-se similaridades nas condições latentes e pré existentes nas organizações, como falhas no mapeamento de riscos e perigos e a inexistência de uma cultura organizacional em que a segurança de processos fosse priorizada. Ademais, fatores humanos relacionados a falhas ativas por atos inseguros também foram levantados pelas investigações. De modo geral, esses erros estavam relacionados à falta de conhecimento dos funcionários e não a atitudes voltadas para a sabotagem ou violações com intenção de gerar danos.

Palavras-Chaves: Fatores humanos; Segurança de Processos; Acidentes industriais.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 GESTÃO DE SEGURANÇA DE PROCESSOS.....	12
2.1 COMPROMETIMENTO COM SEGURANÇA DE PROCESSO	15
2.2 ENTENDIMENTO DE PERIGOS E RISCOS	16
2.2.1 Análise de <i>Bow Tie</i> (BTA)	17
2.2.2 Modelo “Queijo Suíço”	18
2.3 GESTÃO DE RISCOS.....	22
2.4 APRENDIZADO COM A EXPERIÊNCIA	23
2.5 COMPORTAMENTOS HUMANOS	24
2.5.1 Atos inseguros	27
2.5.2 Precondições para atos inseguros	28
2.5.3 Supervisão insegura	29
2.5.4 Influências organizacionais.....	29
3 ESTUDO DE CASO: ACIDENTE CAUSADO PELA EXPLOSÃO DE ÓXIDO DE ETILENO NA EMPRESA STERIGENICS	31
3.1 INTRODUÇÃO AO ACIDENTE	31
3.2 CARACTERÍSTICAS DO ÓXIDO DE ETILENO.....	32
3.2.1 Toxicidade.....	33
3.2.2 Inflamabilidade	34
3.3 CICLO DE ESTERILIZAÇÃO UTILIZANDO ÓXIDO DE ETILENO NA STERIGENICS	34
3.3.1 Pré acondicionamento	36
3.3.2 Esterilização	36
3.4 DESCRIÇÃO DO ACIDENTE.....	38
3.5 ANÁLISE DOS FATORES HUMANOS NO ACIDENTE DA STERIGENICS	43
3.5.1 O interesse de liberar a câmara para a continuidade da operação.....	45
3.5.2 Entendimento dos colaboradores sobre o processo.....	46

3.5.3 Compartilhamento de senha	47
3.5.4 Similaridades com outros eventos	48
4 ESTUDO DE CASO: ACIDENTE NA REFINARIA DA BP NA CIDADE DO TEXAS	53
4.1 A EMPRESA E INTRODUÇÃO AO ACIDENTE.....	53
4.2 O PROCESSO DA UNIDADE DE ISOMERIZAÇÃO	54
4.2.1 Seção fracionadora de refinado.....	54
4.3 DESCRIÇÃO DO ACIDENTE.....	59
4.4 ANÁLISE DOS FATORES HUMANOS NO ACIDENTE DA REFINARIA DA BP..	66
4.4.1 Existência de normas regulamentadoras.....	67
4.4.2 Mapeamento de perigos	68
4.4.3 Existência de indicadores e alarmes	70
4.4.4 Processo consolidado	71
4.4.5 Equipe capacitada.....	73
4.4.6 Cultura organizacional.....	74
4.4.7 Fadiga dos funcionários	76
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

1 INTRODUÇÃO

A indústria química está presente na maioria dos países fornecendo produtos para grande parte dos setores industriais e gera milhões de empregos. Além da sua notória importância para a sociedade, sabe-se que os processos químicos também apresentam perigos. Isso faz com que não só os funcionários dessas empresas, mas também a população e o meio ambiente vizinhos a essas instalações possam ser impactados caso eventos não planejados ocorram.

Um dos acidentes de grandes proporções da indústria química foi o ocorrido em uma planta industrial produtora de triclorofenol em Seveso, Itália em 1976. Nessa tragédia, uma falha em um dispositivo de segurança de um reator ocasionou a emissão de uma extensa nuvem tóxica na atmosfera, que se espalhou por uma vasta área e contaminou pessoas, animais e o solo na vizinhança da unidade industrial. As investigações sobre o evento indicaram que a ausência de um sistema de resfriamento automático foi um dos fatores contribuintes para a continuação do vazamento de gás. (CETESB, 2020) No total, 1.807 hectares foram afetados e toda a vegetação nas proximidades da planta morreu rapidamente em consequência do contato com os compostos clorados. Mais de setecentas pessoas foram evacuadas da região e centenas delas perderam as suas casas devido ao nível de contaminação da área, que foi mantida isolada por anos. Ademais, centenas de indivíduos apresentaram uma doença de pele chamada cloroacne e os efeitos à saúde a longo prazo ainda são acompanhados. (CETESB, 2020) Na Figura 1 é possível observar pessoas com os equipamentos de segurança individual para transitar pela região.

Figura 1 – Pessoas transitando na região próxima ao acidente em Seveso, na Itália



Fonte: Corriere della Sera, 2013

Já em dezembro de 1984, aconteceu um dos maiores acidentes da indústria química em Bhopal, Índia. Nessa tragédia, houve o vazamento de trinta toneladas de um gás tóxico de uma fábrica de defensivos agrícolas da empresa Union Carbide. Como consequência, milhares de pessoas morreram na mesma semana do evento e o número acumulado de mortes desse acidente é considerado muito maior. (BAHIA, 2006) A Figura 2 mostra grande nuvem tóxica liberada para a atmosfera.

Figura 2 - Acidente em Bhopal, na Índia



Fonte: Federação Nacional dos Petroleiros, 2020

Após meses de análises feitas não só pela Union Carbide, mas também por instituições associadas ao governo indiano, constatou-se que a causa do acidente foi a adição de um grande volume de água em um dos tanques contendo isocianato de metila. Isso ocasionou uma reação química que forçou a abertura da válvula de alívio presente na planta, permitindo o vazamento de gás. (UNION CARBIDE CORPORATION, 2019)

As diversas investigações sobre o desastre apontaram que os dispositivos de segurança da planta que poderiam ter funcionado como barreiras preventivas ou mitigadoras contra o acidente estavam inoperantes no momento do evento. Havia também falta de integridade em sensores, que indicavam leituras incorretas das informações. Além disso, uma série de erros humanos foram cometidos no planejamento e projeto de equipamentos de segurança, no manuseio e na manutenção dos mesmos.

Devido aos graves danos aos funcionários da empresa, à comunidade do entorno e, ainda, a todo o ecossistema próximo, houve grande insatisfação popular, que passou a reivindicar medidas de segurança mais eficazes na indústria química. A Figura 3 é uma ilustração de uma das manifestações.

Figura 3 - Manifestações populares na Índia pós acidente em Bhopal



Fonte: Firstpost, 2014

Além das consequências a nível local, o desastre em Bhopal gerou também grande repercussão na indústria química a nível mundial. Isso porque, além da

proprietária da fábrica ser estadunidense, a Union Carbide era uma das principais empresas do ramo no mundo.

Os dois acidentes citados e outros de grandes proporções na indústria química aumentaram a discussão sobre a segurança de processos, que evoluiu consideravelmente. Após o ocorrido em Seveso, foi criado e desenvolvido o *Directive on Major Accident Hazards of Certain Industrial Activities* em 1982, atualmente conhecida como a Diretiva de Seveso I. (MANNAN, 2012 apud MOREIRA, 2017) Essa diretiva impõe que os países membros da União Europeia identifiquem as zonas industriais que apresentem riscos de acidentes graves a fim de evita-los para aumentar o nível de proteção do ser humano e do meio ambiente.

Já após da tragédia de Bhopal ocorrida em 1984, foi fundado o *Center for Chemical Process Safety* (CCPS), em português, Centro de Segurança de Processos Químicos, filiado ao *American Institute of Chemical Engineers* (AIChE) em 1985. Essa organização também tem como objetivo aumentar a segurança de processos na indústria química.

Diante do exposto, é notório que a segurança nas indústrias e o entendimento dos comportamentos humanos que contribuem para acidentes é de grande importância para a redução de riscos inerentes aos processos químicos. Além da manutenção de um ambiente seguro, o gerenciamento de riscos também apresenta outros pontos positivos para as empresas, como a melhoria contínua das atividades. Nesse contexto, o presente trabalho tem como foco a segurança de processos em indústrias químicas, mais especificamente a análise da influência dos fatores humanos nesse tema.

No capítulo dois é abordado o sistema de gerenciamento *Risk Based Process Safety* (RBPS) ou Segurança de Processos Baseada em Risco, criado pelo CCPS. Nele também são apresentadas duas análises qualitativas que são utilizadas para avaliar os riscos de uma instalação, estudando cenários de acidente: Análise de *Bow Tie* (BTA) e o modelo “Queijo Suíço”. Ademais, também são levantados os comportamentos humanos que influenciam a segurança de processos.

Em seguida, o capítulo três consiste em um estudo de caso da explosão de óxido de etileno na empresa Sterigenics na Califórnia em 2006. Nele há a explicação

da tragédia, a discussão de quais comportamentos humanos o influenciaram e uma breve análise de um acidente aéreo e de outro ocorrido em um museu em que são observados pontos em comum com o industrial.

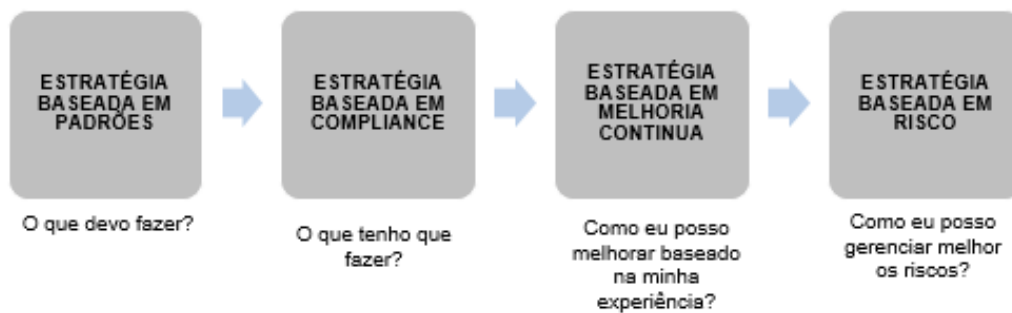
Já o capítulo quatro traz o segundo estudo de caso, sobre o acidente em uma refinaria da BP no Texas em 2007, em que foram cometidos uma série de desvios de segurança. Nele também são discutidos os fatores humanos que influenciaram o ocorrido e as semelhanças de falhas de gestão de segurança com o acidente da Sterigenics.

Por fim, o capítulo cinco é a conclusão do que foi abordado, com os pontos principais e as considerações finais sobre o trabalho.

2 GESTÃO DE SEGURANÇA DE PROCESSOS

O objetivo principal da criação do CCPS em 1985 pelo AIChE é suportar a indústria na prevenção ou mitigação de acidentes de processos e auxiliar a gerenciar efetivamente os riscos de segurança de processos. Segundo o CCPS, com o passar dos anos, as estratégias para aumentar a segurança e diminuir as perdas foram evoluindo (Figura 4). Cada organização está em um nível diferente nesse processo e mais de um método pode ser adotado pela mesma empresa.

Figura 4 - Evolução das estratégias de segurança de processos



Fonte: CCPS, 2014 (Adaptado)

Na estratégia baseada em padrões, a segurança de processos e a prevenção de perdas são fundamentadas apenas na experiência e em práticas amplamente comprovadas tanto pela companhia como por instituições externas a ela. Exemplos dessas normas externas são as do *American National Standards Institute* (ANSI) e do *American Petroleum Institute* (API). Nela, a empresa baseia-se em práticas operacionais conhecidas que evoluíram depois de anos de lições aprendidas por acidentes ou eventos de perda e essa estratégia de gestão perdurou durante um longo período na indústria.

Apesar dessa estratégia ser facilmente aplicada, incidentes de segurança de processos são relativamente raros e basear-se apenas na experiência e em padrões preestabelecidos não alertam as empresas de forma adequada para prevenir acidentes futuros. Além disso, problemas descobertos recentemente podem não estar mapeados pela organização. Assim, a performance da planta pode ser afetada. (CCPS, 2007)

Na gestão da segurança de processo baseada em *compliance*, as agências governamentais começaram a estabelecer regulamentações com requisitos mínimos de atividades de prevenção de acidentes. O objetivo era proteger os trabalhadores, a população e o meio ambiente frente aos potenciais acidentes na indústria química. Na União Europeia, temos como exemplo de normas a Diretiva de Seveso II e, nos Estados Unidos, a *Process Safety Management (PSM)*, em português, Gestão de Segurança de Processo, da *Occupational Safety and Health Administration (OSHA)*. Ambas são baseadas em performance e permitem a manutenção das atividades de segurança de processos das companhias em um nível aceitável de risco.

As regulamentações determinam níveis mínimos de atividades focadas em segurança de processos, que podem não ser suficientes para gerir adequadamente os riscos enquanto que, em outros casos, podem forçar as empresas a dar atenção em excesso nas mesmas. (CCPS, 2007) Por exemplo, instalações que contenham quantidades de uma substância perigosa abaixo da quantidade limite estabelecida no regulamento não são obrigadas a cumprir as normas de segurança de processo, embora ainda existam riscos para estas companhias. Assim, apesar desse tipo de gestão ter catalisado muitos resultados positivos, ele contribuiu para a adoção de uma mentalidade focada apenas em *compliance* em algumas empresas.

Em relação à terceira estratégia, gestão da segurança de processos baseada em melhoria contínua, é notório que apenas manter o *status quo* na prevenção de acidentes químicos não é suficientemente bom por três motivos. Primeiro, não fazer progressos na segurança de processos pode levar a um desempenho decrescente. Segundo, a competitividade global exige que as companhias procurem melhorar a qualidade e reduzir os custos. O terceiro motivo está relacionado às expectativas da sociedade em relação à segurança, que aumentam constantemente. A fim de cumprir essas expectativas, a melhoria contínua começou a ser aplicada também nas políticas ambientais, de segurança e de saúde de muitas empresas, abordagem que já era adotada em sistemas de gestão da qualidade. (CCPS, 2007)

Uma estratégia tradicional baseada na melhoria contínua utiliza indicadores reativos para definir o desempenho histórico e para ajudar a orientar as mudanças do sistema de gestão com base no feedback. Este modelo funciona bem quando existe uma relação altamente efetiva entre um processo e um ou mais indicadores. Contudo,

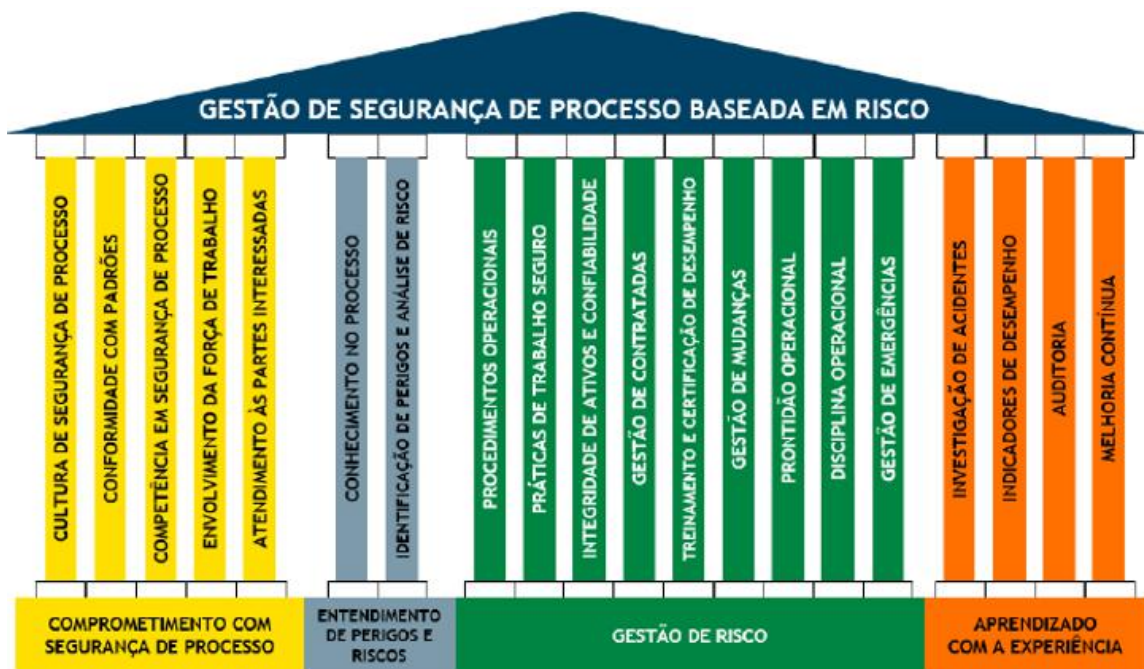
esta estratégia é suscetível a falhas quando os indicadores reativos são eventos de baixa frequência e alta consequência, tais como acidentes catastróficos. A ausência de eventos com perdas não indica de forma confiável que um sistema de gestão da segurança do processo esteja funcionando bem e sendo efetivo.

A quarta estratégia de segurança de processos tem como foco melhorar o gerenciamento de riscos. Segundo o CCPS (2014), o entendimento dos riscos relacionados a uma atividade está condicionado à avaliação do risco e à classificação da falha ou o acidente, da severidade do dano e da frequência do evento. A partir dessas informações, é possível decidir os planos de ação a serem tomados.

A partir disso, o CCPS desenvolveu um modelo chamado Segurança de Processos Baseada em Risco (RBPS), que combina as estratégias anteriores: segue as normas regulatórias, traz o aprendizado com a experiência e usa indicadores de desempenho para fomentar a segurança de processos. Ademais, essa abordagem tem como objetivo principal ser um guia para as organizações de como construir e operar um sistema de gerenciamento de riscos eficiente.

O sistema de gerenciamento RBPS reconhece que é necessário haver diferentes níveis de rigor e de detalhamento dos riscos e que mais recursos devem ser alocados para os maiores perigos e riscos. Essa abordagem é formada por quatro blocos de pilares de prevenção de acidentes (Figura 5).

Figura 5 - Os pilares e elementos do RBPS



Fonte: CCPS, 2014 (Adaptado)

2.1 COMPROMETIMENTO COM SEGURANÇA DE PROCESSO

O primeiro pilar está relacionado ao comprometimento real com a segurança de processos. A evolução do gerenciamento de riscos nas organizações está relacionada diretamente ao comprometimento sólido da força de trabalho e uma liderança forte é essencial para isso.

A partir do momento que a segurança de processos é vista e tratada como um valor essencial, os colaboradores terão a tendência de fazer o certo, de forma adequada e no momento correto, mesmo quando ninguém está olhando. Esse comportamento deve ser celebrado e reconhecido em toda a organização. (CCPS, 2014)

2.2 ENTENDIMENTO DE PERIGOS E RISCOS

O segundo pilar é a base de uma abordagem baseada em risco, organizações que entendem riscos e perigos podem usar as informações para alocar recursos limitados de forma mais eficaz. A fim de entender os riscos e perigos, as organizações devem se concentrar em recolher, documentar e manter as informações de segurança de processo, além de realizar estudos de identificação de perigos e análise de riscos. (CCPS, 2014)

A identificação de perigos e análise de riscos é um diferencial dessa estratégia de gestão de segurança de processos e sabe-se que muitos acidentes tiveram lacunas nessa etapa de identificação como fatores contribuintes. Dessa forma, é válido se aprofundar mais nesse segundo bloco do sistema de gerenciamento RBPS e em seus elementos: conhecimento no processo e identificação de perigos e análise de risco.

O elemento de conhecimento no processo consiste em “criar, documentar e manter o conhecimento dos processos”. (RAIMUNDI, 2021) Para que um processo seja completamente compreendido, é importante que seu funcionamento seja entendido por todos os colaboradores da equipe. Além disso, faz-se necessário o conhecimento também na execução dos procedimentos e nos principais riscos e perigos associados à atividade.

Esse gerenciamento de conhecimento abrange documentos e especificações técnicas, desenhos e cálculos de engenharia, especificações para dimensionamento, fabricação e instalação de equipamentos de processo e fichas de informações de segurança de produtos químicos (FISPQs). (RAIMUNDI, 2021) O conhecimento sólido no processo e em suas especificações é fundamental para a identificação de perigos e para a análise de risco de forma adequada e o entendimento desses conceitos é de grande importância.

Segundo Raimundi, 2021 a definição de risco é a “combinação da probabilidade de ocorrência e da(s) consequência(s) de um determinado evento perigoso”. Já perigo é uma “característica inerente física e/ou química que tem o potencial de causar danos

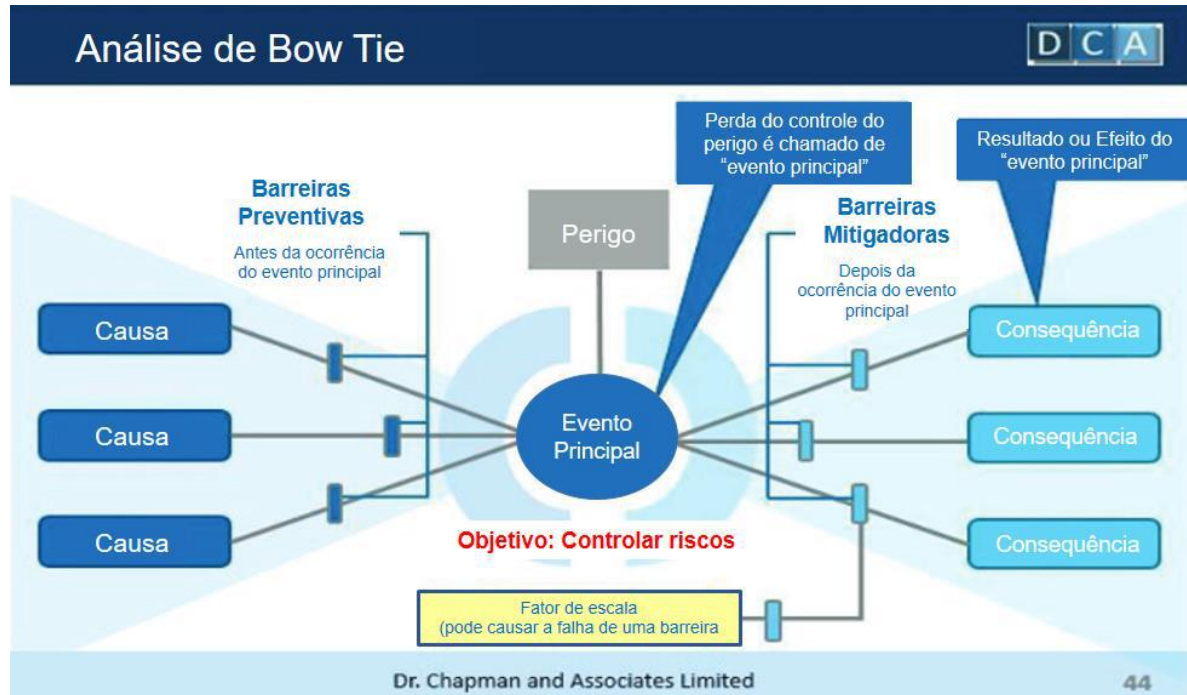
para pessoas, instalações ou meio ambiente.” (CCPS AIChE, 1992, Guidelines for Hazard Evaluation Procedures apud RAIMUNDI, 2021).

A análise de riscos consiste em estimar de forma qualitativa, semi quantitativa ou quantitativa o risco de uma instalação utilizando técnicas específicas para identificar os cenários de acidente, a frequência de cada um e para avaliar a magnitude dos danos gerados por cada cenário mapeado. (CCPS AIChE, 1992, Guidelines for Hazard Evaluation Procedures apud RAIMUNDI, 2021) Duas metodologias qualitativas utilizadas são a análise de *Bow Tie* (BTA) e o modelo “Queijo Suíço”, ambas são formas gráficas para representação de cenários.

2.2.1 Análise de *Bow Tie* (BTA)

O diagrama Bow Tie “mostra como várias ameaças podem levar à perda de controle de um risco e permitir que essa condição insegura se transforme em um número de consequências indesejáveis” (CCPS, 2018, p. xvi apud DE SOUZA, J. T.; SOUZA, J. A, 2021). Essa metodologia permite uma visão geral de diferentes cenários e uma rápida análise e descrição dos caminhos que levam a um risco, aos seus resultados e à revisão dos controles.

A aplicação dessa análise é feita utilizando um diagrama no formato de uma gravata borboleta, em que causas e consequências de um acidente são claramente identificadas. A Figura 5 representa esse modelo, em que é possível notar os principais elementos de análise: o evento no centro, como um perigo, as causas dele à esquerda com as barreiras preventivas e as consequências, com as barreiras mitigadoras à direita. Devido a sua estrutura gráfica de fácil visualização, interpretação e divulgação de resultados, pode ser compreendida tanto por especialistas em segurança de processos como por não especialistas.

Figura 6 - Diagrama *Bow Tie*

Fonte: CHAPMAN, 2016, apud DE SOUZA, J. T.; SOUZA, J. A, 2021 (Adaptado)

Outra abordagem de análise que estuda as barreiras preventivas e mitigadoras de cenários é o modelo “Queijo Suíço”.

2.2.2 Modelo “Queijo Suíço”

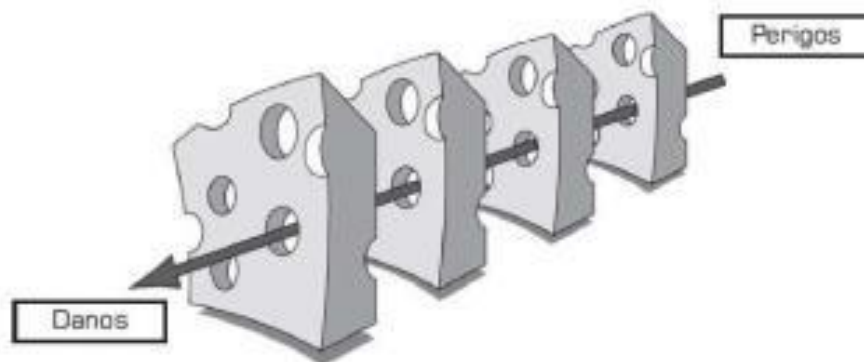
O Modelo “Queijo Suíço”, proposto por Reason, 1990, prevê que acidentes em sistemas complexos ocorrem em decorrência da soma de múltiplos fatores e falhas. Sistemas de alta tecnologia possuem barreiras defensivas, sendo algumas de engenharia, como barreiras físicas e desligamentos automáticos. Ademais, também há outras defesas, que estão relacionadas ao comportamento e atitudes das pessoas, aos procedimentos e aos controles administrativos. (CORREA; CARDOSO JÚNIOR, 2007)

Em relação às barreiras defensivas há dois tipos: preventivas e mitigadoras. As barreiras preventivas funcionam antes de uma situação específica acontecer, como uma forma de prevenção. O objetivo das mesmas é assegurar que o acidente não

aconteça ou retardar a evolução de eventos que possam resultar em um acidente. Já as mitigadoras minimizam a consequência de um acidente, a sua função é a de proteger os indivíduos e/ou o ambiente, impedindo ou reduzindo os danos.

Como todo sistema, a maioria das barreiras também possui fraquezas e essas regiões em que elas não estão íntegras podem ser vistas como buracos em uma fatia de queijo suíço. Essa metáfora sugere que quando um alinhamento entre essas falhas ocorre, um perigo pode atravessá-las e acarretar na possibilidade de danos (Figura 7).

Figura 7 - Modelo “Queijo Suíço”



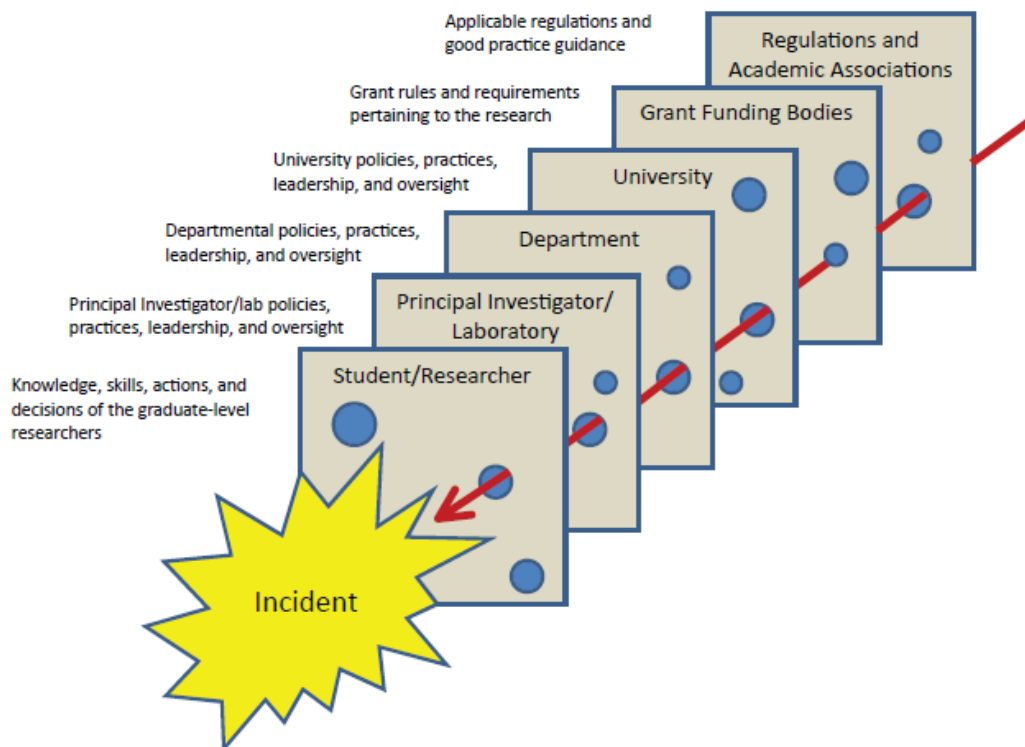
Fonte: Reason, 2000, apud CORREA; CARDOSO JÚNIOR, 2007, P 191

Esse modelo se baseia na ideia de que os acidentes são o resultado de uma sequência de causa-efeito de eventos somada a falhas nas barreiras de defesa do sistema. As deficiências nas defesas surgem por duas razões: falhas ativas e condições latentes. As falhas ativas são representadas pelas atitudes das pessoas em atos inseguros como deslizes, lapsos, perdas, erros e violações de procedimento. (CORREA; CARDOSO JÚNIOR, 2007) Já as condições latentes surgem a partir das decisões dos projetistas, construtores, elaboradores de procedimentos e do nível gerencial mais alto. Essas condições podem contribuir para erros pelo aumento da pressão devido a prazos curtos, sobrecarga de trabalho, equipamentos e/ou layout inadequados, fadiga e inexperiência. Além disso, podem criar fraquezas duradouras nas defesas, como alarmes e indicadores não confiáveis, procedimentos não executáveis, deficiências de projetos e nas construções, dentre outros. (CORREA; CARDOSO JÚNIOR, 2007)

Um exemplo de análise de cenário utilizando o “Queijo Suíço” de Reason é a que foi feita após o acidente em um dos laboratórios da *Texas Tech University* em janeiro de 2010. Nesse evento, um estudante se feriu após a detonação de um composto explosivo e a teoria dos fatores contribuintes para o evento foi ilustrada utilizando esse modelo. A Figura 8 traz as seis camadas analisadas, que são as barreiras preventivas.

Um mês antes do ocorrido, dois acadêmicos da *Texas Tech University* começaram a sintetizar perclorato de hidrazina níquel (NHP). As restrições de segurança do laboratório estabeleciam um limite de síntese de 100 miligramas, mas essa informação não estava documentada formalmente. Na realidade, os estudantes acreditavam que deveriam trabalhar com pequenas quantidades, mais especificamente na ordem de 200 a 300 miligramas. A produção usual de NHP pelos alunos estava na faixa de 50 a 300 miligramas e era utilizada para realizar testes analíticos. No dia do acidente, com o objetivo de caracterizar a substância por completo, foi decidido sintetizar uma quantidade maior, de 10 gramas. Em seguida, enquanto um dos estudantes agitava o composto, o mesmo explodiu.

Figura 8 - Exemplo de aplicação do modelo “Queijo Suíço”



O alinhamento das falhas presentes em cada camada de gestão de segurança da instituição culminou no acidente. Após as investigações feitas pela *U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board* (CSB) com revisão de registros, entrevistas e observações pós acidente, foram levantadas as seguintes deficiências: (CSB, 2011)

1. Os perigos da pesquisa sobre materiais energéticos que estava sendo realizada no laboratório à integridade física dos pesquisadores não foram avaliados de forma eficaz e controladas na universidade;
2. O programa de gestão de segurança do laboratório foi elaborado após o Padrão OSHA *Occupational Exposure to Hazardous Chemicals in Laboratories* Standard (29 CFR 1910.1450). No entanto, a norma não abordava os perigos físicos dos produtos químicos, mas sim os riscos para a saúde como resultado de exposições a produtos químicos;
3. Não existem normas detalhadas de avaliação de perigos para laboratórios de pesquisa;
4. As lições aprendidas e preventivas a partir de incidentes anteriores nesse laboratório nem sempre foram documentadas, rastreadas e formalmente comunicadas na universidade;
5. A agência de financiamento da pesquisa, DHS, não determinou medidas de segurança específicas para o estudo realizado na universidade, perdendo uma oportunidade para influenciar positivamente a segurança;
6. A responsabilidade pela segurança e supervisão pelo professor chefe do laboratório, o departamento e a administração da universidade eram insuficientes.

É possível notar que as falhas nas camadas de segurança levantadas pela CSB e que são apontadas como fatores contribuintes do acidente estão relacionadas às deficiências nas barreiras preventivas, como: gerenciamento de risco ineficaz, gestão de segurança no laboratório e normas para avaliação de perigos ineficientes, falta de aprendizado com a experiência, além de uma supervisão no laboratório insuficiente. Essas condições latentes poderiam ter sido identificadas e corrigidas antes do evento analisado. Existem também as falhas ativas, que são os atos inseguros relacionados diretamente aos erros humanos. Nesse cenário, pode-se citar o desvio do

procedimento feito pelos estudantes que realizavam o experimento, uma vez que ultrapassaram mais de trinta vezes o limite recomendado de síntese do composto. Esse conjunto de falhas são fatores humanos que influenciam em acidentes.

2.3 GESTÃO DE RISCOS

O terceiro pilar, gestão de riscos, foca em três pontos: Operar e manter com prudência os processos que oferecem risco; gerenciar mudanças nos processos para assegurar que o risco permaneça tolerável e preparar-se para responder e gerenciar os acidentes que ocorrerem. Implementar sistemas de gestão e procedimentos de segurança no local de trabalho ajuda a manter as operações a longo prazo livres de acidentes e lucrativas. (CCPS, 2014)

Os procedimentos operacionais são instruções com os padrões estabelecidos para iniciar, operar e encerrar processos - incluindo encerramentos de emergência - a fim de reduzir a incidência de erros. Isso porque se uma atividade é realizada sempre da mesma maneira, os riscos de segurança atrelados a ela também serão os mesmos. Nesse sentido, a forma correta de se realizar cada atividade é mapeada e procedimentada para que o trabalho seja padronizado e entregue o mesmo resultado independente da pessoa que execute a ação. Bons procedimentos também descrevem o processo, perigos, ferramentas, equipamentos de segurança e controles existentes. Ademais, é importante que os colaboradores possuam conhecimento sobre os equipamentos de segurança existentes e sobre as possíveis anomalias inerentes ao processo. (CCPS, 2014)

Práticas de trabalho seguro auxiliam no controle de perigos e na gestão de riscos associados a manutenção e a atividades fora da rotina. Os procedimentos para o trabalho seguro são a ligação entre os procedimentos operacionais relacionados a fabricação do produto e os procedimentos de manutenção, que envolvem testes, inspeções, calibrações e reparos nos equipamentos.

A integridade de ativos e confiabilidade dos equipamentos é um aspecto importante no pilar de gestão de riscos. Esse tópico tem relação com a garantia de

que os equipamentos são desenhados de forma adequada, instalados de acordo com as especificações e permaneçam utilizáveis até o momento de seu desligamento.

Esse elemento consiste na implementação sistemática de inspeções e testes necessários para assegurar que equipamentos importantes estejam aptos para uso. A frequência de revisões faz com que falhas, que poderiam ocasionar um acidente de processo, além de prejuízos financeiros, sejam detectadas antes que o equipamento seja danificado. Assim, atividades relacionadas a esse elemento focam em prevenir catástrofes e em garantir alta disponibilidade de sistemas de segurança que previnem ou mitigam os efeitos de um evento inesperado. (CCPS, 2014)

O treinamento de colaboradores e a garantia da confiabilidade nas suas performances em atividades críticas é um elemento importante no gerenciamento de riscos. Treinar os funcionários é ensinar instruções práticas nos requerimentos e métodos do trabalho a ser realizado e o seu objetivo é apresentar os padrões mínimos de performance para manter a proficiência ou para qualificar as pessoas que almejam mudar de cargo. Já assegurar a performance é a forma com a qual os colaboradores mostram que entenderam o treinamento e estão capacitados para realizar as atividades, isso pode ser feito com a aplicação de testes periódicos. Esse é um processo contínuo importante para garantir que os padrões de performance estão sendo atendidos e para identificar necessidades de treinamento. (CCPS, 2014)

A disciplina operacional consiste na criação e manutenção de padrões elevados na realização das operações. Esse elemento reforça a importância de executar as atividades de uma forma estruturada e está diretamente ligado à cultura organizacional. (CCPS, 2014) Esse rigor nas operações institucionaliza a busca pela excelência na performance de todas as tarefas e minimiza suas variações. Colaboradores em todos os níveis da companhia devem executar suas tarefas com discernimento, atenção, conhecimento, senso de responsabilidade e orgulho.

2.4 APRENDIZADO COM A EXPERIÊNCIA

O quarto pilar está relacionado ao monitoramento e atuação a partir das fontes de informação internas e externas. Mesmo com um bom gerenciamento de riscos,

imprevistos podem acontecer, assim, as organizações devem estar preparadas para transformar erros em oportunidades para melhorar a segurança de processos. Algumas formas de aprender com a experiência são: aplicar as melhores práticas para fazer o uso mais prudente dos recursos disponíveis; corrigir as deficiências expostas pelos incidentes internos e quase acidentes e implementar as lições aprendidas com outras organizações. (CCPS, 2014)

O primeiro elemento desse pilar, investigação de acidentes, consiste em reportar, acompanhar e analisar acidentes na organização. Isso deve englobar um processo formal de investigação de acidentes de segurança de processos. Além disso, a fim de acompanhar a recorrência de eventos, deve haver um monitoramento de tendências desses dados. É importante também gerenciar a resolução e a documentação das recomendações feitas pelos investigadores. (CCPS, 2014)

A auditoria consiste em avaliar o funcionamento dos sistemas de gestão. Esse elemento complementa outras atividades de controle e monitoramento do RBPS, principalmente os que fazem parte dos elementos de integridade dos ativos e de disciplina operacional. Seu objetivo é a realização de avaliações periódicas de todos os demais elementos do RBPS, analisando pontos como documentações e performance. Além disso, inclui também o fornecimento de formas de gestão para a resolução de falhas encontradas e ações corretivas geradas por essas avaliações. (CCPS, 2014)

Focar nesses quatro pilares auxilia a organização a aprimorar o gerenciamento de riscos, reduzir a frequência e severidade dos acidentes e melhorar a segurança a longo prazo. É importante salientar que para que essa gestão funcione corretamente, as empresas devem integrar tais práticas com outros sistemas de gestão, como qualidade do produto, confiabilidade humana e de equipamentos, saúde dos colaboradores e proteção ambiental. (CCPS, 2014)

2.5 COMPORTAMENTOS HUMANOS

É notório que os comportamentos humanos influenciam na segurança de processos. Segundo Moriarty (2015), todo acidente, incidente ou quase acidente

possui algum elemento humano envolvido na sequência de eventos que levou ao ocorrido. Mesmo quando é uma falha técnica em algum equipamento, ela se torna uma condição latente que deveria ter sido mapeada e corrigida anteriormente. Como o ser humano está no centro das operações e influencia toda a cadeia, otimizar a performance do mesmo é essencial para otimizar o sistema por completo. (MORIARTY, 2015)

Quando se fala em comportamentos humanos, é válido citar os erros que são cometidos. Segundo Reason (1990), erro é um termo genérico que se refere a todas as ocasiões em que uma sequência planejada de atividades mentais ou físicas não atinge os seus objetivos, sem que a falha tenha sido ao acaso. Em seguida, pode-se aprofundar nessa definição, mais especificamente nas duas formas que esse falha pode ocorrer: o planejamento está correto, mas a execução falhou ou o planejamento já estava errado, o que faz com que o objetivo não fosse alcançado mesmo com uma boa execução. (MORIARTY, 2015)

Além dos erros, há outro tipo de ato inseguro que pode influenciar a performance de um indivíduo, a violação. Ela ocorre quando há a intenção de não seguir um procedimento ou quando agem de forma oposta a ele e pode ser separada em três tipos: violações rotineiras, situacionais ou excepcionais. A primeira consiste em maus hábitos, que se tornaram comuns a ponto da pessoa não notar que está praticando um ato inseguro. A segunda ocorre quando realizar todas as atividades conforme o procedimento demoraria muito, geralmente são bem intencionadas e parecem ser necessárias devido à pressão de tempo. A terceira pode ocorrer quando a pessoa tem dificuldade em resolver o problema de outra maneira. (MORIARTY, 2015) Um exemplo de violação foi a decisão dos estudantes da Universidade *Texas Tech* de aumentar a síntese da substância de estudo. Nessa situação, os alunos desrespeitaram as recomendações feitas pelos professores responsáveis pelo laboratório em relação aos limites de fabricação.

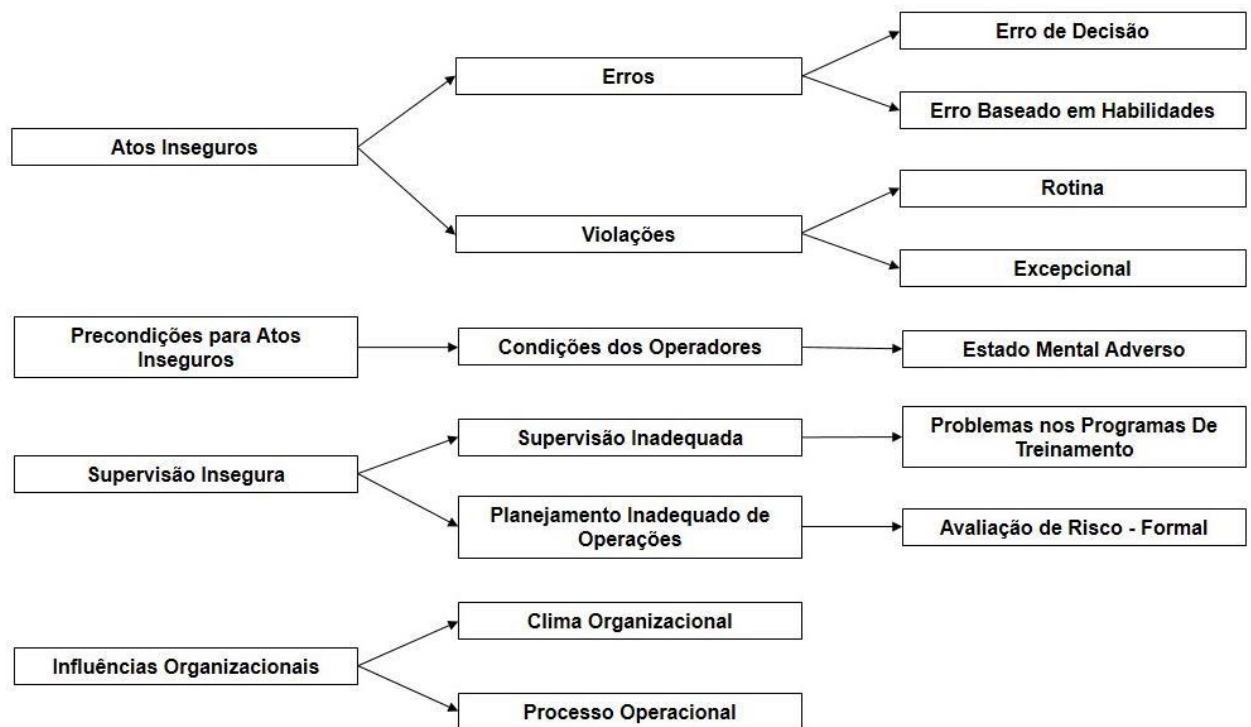
Na pesquisa “*An analysis of human factors in fifty controlled flight into terrain aviation accidents from 2007 to 2017*” ou, em tradução livre, “Uma análise dos fatores humanos em cinquenta acidentes de voo controlado contra o terreno de 2007 a 2017” foram analisados cinquenta acidentes na aviação. Esse estudo teve como foco os acidentes aéreos do tipo *Controlled Flight Into Terrain* (CFIT), em que falhas humanas

são fatores que estão significativamente relacionadas às suas ocorrências. Além disso, essa categoria é responsável por uma quantidade considerável de fatalidades quando comparado a outras classes de acidentes aéreos. (KELLY; EFTHYMIU, 2019)

Segundo as autoras do estudo, Kelly e Efthymiou (2019), fatores humanos contribuíram significativamente para os eventos analisados, sendo assim componentes principais nos mesmos. Elementos como distração, complacência e fadiga são apontados como contribuintes para acidentes por possivelmente estarem presentes na equipe. Apesar do foco da pesquisa ter sido acidentes do tipo CFIT na aviação, os resultados e conclusões da mesma podem ser usados também em outros cenários, como nas indústrias químicas.

O estudo foi feito utilizando o Sistema de Análise e Classificação de Fatores Humanos (HFACS), que serve como uma taxonomia prática que ajuda na identificação da contribuição humana em acidentes. O HFACS classifica o erro humano em quatro grandes categorias: atos inseguros, condições para atos inseguros, supervisão insegura e influências organizacionais. Essas categorias possuem subcategorias, em que são observados alguns comportamentos ou condições específicas para a ocorrência desses eventos. Alguns dos níveis e subníveis citados na pesquisa estão ilustrados na Figura 9.

Figura 9 - Níveis e subníveis selecionados da metodologia HFACS



Fonte: Elaboração da autora, 2022

2.5.1 Atos inseguros

Nesse nível de falha, elementos relacionados às subcategorias “Erro de Decisão” e “Erro Baseado em Habilidades” ocorreram em 98% dos cinquenta acidentes do tipo CFIT estudados. Desse número, os tipos mais comuns de erro de decisão foram a “avaliação de risco durante a operação” e “ignorar uma ação necessária”.

A primeira falha mais comum, “avaliação de risco durante a operação”, ocorre quando procedimentos para avaliação formal de riscos não são possíveis e as decisões apropriadas não são tomadas. Isso pode ocorrer por uma série de fatores, como pressão de tempo, distração, inexperiência, complacência e falta de conhecimento. (KELLY; EFTHYMIU, 2019) Já o elemento “ignorar uma ação necessária” é observado quando um alerta é percebido e compreendido pela tripulação, mas mesmo assim é ignorado, levando a uma situação insegura. Esse erro

influencia na tomada de decisão e é um fator relevante em acidentes, identificado em 40% dos relatórios analisados.

Em relação ao subnível “Erro Baseado em Habilidades”, pode-se citar erros processuais que incluem: cumprimento das atividades indicadas no procedimento na sequência incorreta, utilização da técnica errada para realizar a tarefa e seleção equivocada do controle a ser utilizado. (KELLY; EFTHYMIU, 2019)

Além dos atos inseguros relacionados a erros, também observou-se violações, que representam o descumprimento de instruções, e essa categoria foi evidente em menos de 50% dos relatórios estudados. É importante salientar que seguir os procedimentos é um fator de prevenção forte de acidentes, estimular e verificar que os colaboradores seguem os procedimentos de forma correta é uma barreira eficiente para evitar essas ocorrências. (CCPS, 2014)

2.5.2 Precondições para atos inseguros

Nessa categoria, pode-se citar o “Estado Mental Adverso”. Esse subnível refere-se à condição mental da equipe, que foi identificada como um fator em 92% dos casos analisados. Dois dos seus elementos apontados como importantes foram a pressão a qual os funcionários estavam submetidos e a complacência. (KELLY; EFTHYMIU, 2019)

A pressão, observada em 50% dos acidentes, pode fazer com que ações sejam tomadas sem que uma análise de cenário seja feita de maneira apropriada, levando a uma tomada de decisão equivocada. Já a complacência foi um fator quando um membro da equipe estava num estado reduzido de atenção consciente devido ao excesso de confiança pela sensação de que a situação está sob controle. Em mais da metade dos relatórios em que o gradiente de hierarquia era alto e um membro da tripulação era consideravelmente mais experiente do que o outro esse erro foi observado. Como consequência, as decisões não foram avaliadas ou questionadas de forma eficaz, o que inevitavelmente levou para uma série de eventos inseguros. (KELLY; EFTHYMIU, 2019)

2.5.3 Supervisão insegura

Sabe-se que a supervisão é um ponto importante em se tratando de segurança de processos e, caso seja insegura, pode desempenhar um papel chave em uma sequência de erros, uma vez que decisões e políticas tomadas por cargos mais altos afetam diretamente as operações, práticas, condições e ações de uma equipe. (KELLY; EFTHYMIOU, 2019) A supervisão insegura pode falhar na identificação de perigos, no reconhecimento e controle de riscos e em guiar, treinar e supervisionar a equipe. Nesse tópico, as subcategorias "Supervisão Inadequada" e "Planejamento Inadequado de Operações" são identificadas como fontes de erros.

A supervisão inadequada ocorre quando a disponibilidade, competência e qualidade da supervisão não atende aos requisitos do cargo, o que leva a um cenário de insegurança. (KELLY; EFTHYMIOU, 2019) Um subnível importante dessa subcategoria é "Problemas nos Programas de Treinamento", observado em 40% dos relatórios. Essa precondição ocorre quando os programas de treinamento, de revisão e de atualização locais são feitos de forma inadequada ou quando não estão disponíveis para as equipes. Capacitação é um elemento chave na eficiência e na segurança de processos.

Na subcategoria "Planejamento Inadequado de Operações" nota-se outra fonte de erro relevante, a "Avaliação de Risco - Formal", que é um fator quando a supervisão não realiza uma análise de riscos adequada. (KELLY; EFTHYMIOU, 2019) Essa avaliação nesse nível hierárquico pode desempenhar um papel chave como barreira preventiva para condições inseguras.

2.5.4 Influências organizacionais

Fatores relacionados à organização foram evidentes quando a gestão de nível hierárquico mais alto afetou as práticas dos demais funcionários e resultaram numa falha do sistema. (KELLY; EFTHYMIOU, 2019) Essa influência ocorre em todos os níveis da organização e pode ser afetada pela estratégia geral e processos

específicos. Nesse tópico estão incluídos as subcategorias “Clima Organizacional” e “Processo Operacional”.

O “Clima Organizacional” refere-se à atmosfera de trabalho, incluindo as políticas e as práticas da companhia, que influenciam as ações dos colaboradores. Quando a liderança permite que um ambiente inseguro exista, uma falha tem potencial de ocorrer. Já o “Processo Operacional” foi evidente quando operações e procedimentos influenciaram negativamente na performance e em resultados individuais. (KELLY; EFTHYMIOU, 2019)

3 ESTUDO DE CASO: ACIDENTE CAUSADO PELA EXPLOSÃO DE ÓXIDO DE ETILENO NA EMPRESA STERIGENICS

O primeiro estudo de caso é sobre o acidente causado pela explosão de óxido de etileno (ETO) em uma das câmaras de esterilização da empresa Sterigenics em 2006 em Ontario, Califórnia. Esse capítulo foi baseado nas informações obtidas a partir do relatório da investigação oficial do ocorrido elaborado pela CSB em 2006. Em seguida, serão analisados os fatores humanos que contribuíram para o acontecimento.

3.1 INTRODUÇÃO AO ACIDENTE

A Sterigenics é uma companhia líder global no fornecimento de soluções abrangentes de esterilização. A sua unidade em Ontario, Califórnia, realiza serviços para fabricantes de diversos produtos médicos, como seringas descartáveis, cateteres para o trato urinário e válvulas cardiovasculares. Nessa instalação, havia oito câmaras de esterilização que operavam 24 horas por dia e sete dias por semana, com aproximadamente trinta funcionários.

Por volta das 15h, horário local, do dia 19 de agosto de 2004, uma explosão ocorreu dentro de uma das câmaras de esterilização nas instalações da planta. Como consequência, quatro colaboradores sofreram ferimentos e a instalação foi severamente danificada, como é possível ver na Figura 10. Os vidros quebrados das janelas da sala de controle foram os responsáveis por todos os ferimentos dos funcionários. Após o acidente, a planta e a vizinhança foram evacuadas e as operações foram suspensas por nove meses.

Figura 10 - Danos na instalação de Ontario da empresa Sterigenics



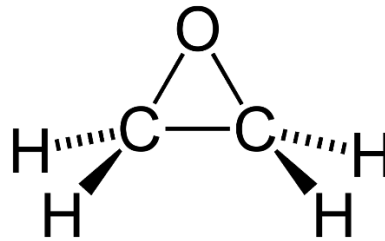
Fonte: CSB, 2006

3.2 CARACTERÍSTICAS DO ÓXIDO DE ETILENO

O óxido de etileno é muito utilizado nos processos de esterilização de artigos médico-hospitalares pela sua alta eficiência. Esse agente químico age em baixas temperaturas e possui uma alta capacidade de penetração nos materiais, sem ser corrosivo. (ROGERS, 2005; DALLAN, 2005; BROWN et al., 2002 apud SOUZA, 2010 p 20)

Esse óxido pertence ao grupo dos epóxidos e sua fórmula química é C_2H_4O , a estrutura da molécula é mostrada na Figura 11. Seu ponto de fusão é $-112,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto que seu ponto de ebulição é $10,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, assim, em temperatura e pressão ambientes, é um gás. Além disso, o óxido de etileno não possui coloração, é inflamável e produz vapores irritantes.

Figura 11 - Molécula de óxido de etileno



Fonte: Wikipedia, 2006

3.2.1 Toxicidade

A classificação das substâncias e misturas em categorias de perigo é baseada em “valores de corte/limites de concentração dos valores de toxicidade aguda oral, dérmica e inalatória, a DL₅₀ e CL₅₀, que são obtidos por meio de ensaios com mamíferos”. (ABNT, 2009, P. 4) A DL₅₀ representa a quantidade de uma substância química que causa efeito letal em 50% dos animais de uma população. Já a CL₅₀ refere-se à concentração no ar de um agente químico que provoca a morte em 50% das cobaias expostas à inalação.

O óxido de etileno se enquadra na categoria 3 de toxicidade aguda, considerando que a via de exposição é a inalação. (AIR LIQUIDE BRASIL LTDA, 2019) Nessa classificação o limite superior aproximado de DL₅₀/CL₅₀ é 2500 ppm, ou seja, nessa concentração e quantidade, esse agente químico é capaz de provocar morte em 50% dos animais expostos. (ABNT, 2009)

Em relação à mutagenicidade em células germinativas, o óxido de etileno se enquadra na categoria 1B. (AIR LIQUIDE BRASIL LTDA, 2019) Isso significa que esse gás é uma substância química considerada indutora de mutações hereditárias em células germinativas humanas, segundo essa classificação. (ABNT, 2009)

Sobre a toxicidade sistêmica para órgãos-alvo do óxido de etileno, considerando uma exposição única ele se enquadra na categoria 3, irritação do trato respiratório. (AIR LIQUIDE BRASIL LTDA, 2019) Nessa classificação estão as substâncias que provocam efeitos passageiros sobre o corpo humano. (ABNT, 2009)

3.2.2 Inflamabilidade

Em relação ao comportamento da substância com o fogo, o vapor do óxido de etileno é mais pesado do que o ar. Sofrendo ignição, a velocidade da chama em uma tubulação enriquecida com o gás pode chegar a valores altos, como 1770 m/s, e a taxa de aumento da pressão e de velocidade da chama aumentam perto do fim da tubulação, podendo causar explosão. (Thibault et al., 2000, apud CSB, 2006, p. 11) Além disso, caso haja contato do gás com uma fonte de ignição qualquer, poderá ocorrer o retrocesso da chama. Para diminuir os riscos de explosões, é possível diluir o óxido de etileno com outros gases, como o nitrogênio.

A faixa de inflamabilidade do óxido de etileno em misturas ETO/ar é de 2,6 – 100%. (AIR LIQUIDE BRASIL LTDA, 2019) Durante o processo de esterilização, a concentração de óxido de etileno nas câmaras é 400.000 ppm, ou 40%, uma concentração explosiva.

Segundo os critérios para classificação de substâncias, misturas ou artigos explosivos, o óxido de etileno se enquadra na categoria 1. (AIR LIQUIDE BRASIL LTDA, 2019) Nela, constam os gases que, a 20°C e a pressão atmosférica (101,3 kPa), são inflamáveis em misturas com o ar a 13% (volume/volume) ou menos, ou têm um poder de inflamabilidade em misturas com o ar em pelo menos 12%, independente do limite inferior de inflamabilidade (LII). (ABNT, 2009)

3.3 CICLO DE ESTERILIZAÇÃO UTILIZANDO ÓXIDO DE ETILENO NA STERIGENICS

As indústrias químicas que realizam a esterilização por óxido de etileno devem ter um procedimento validado para cada tipo de produto que passa pelo processo devido a diversificação de suas características e embalagens. (CSB, 2006) Cada ciclo de esterilização deve ter parâmetros bem especificados, como concentração gasosa, tempo de exposição, temperatura, umidade relativa e vácuo aplicado, além da lavagem e aeração para diminuir os traços de óxido utilizado durante o processo. Para garantir o cumprimento das normas, indicadores biológicos são utilizados para medir

a concentração de óxido de etileno residual, que deve estar na faixa segura permitida. (CSB, 2006) Nos Estados Unidos, a *U.S. Food and Drug Administration* (FDA) é o órgão responsável por determinar os níveis microbianos e traços de óxido de etileno seguros nos produtos médicos esterilizados comercialmente. No Brasil, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) é a responsável por estabelecer essas normas.

Os Ministros de Estado da Saúde e do Trabalho e Emprego, no uso das atribuições que lhes confere o artigo 87, item II, da Constituição e tendo em vista o disposto na Lei N° 8.080, de 19 de setembro de 1990, que instituiu o Sistema Único de Saúde e o disposto no artigo 200 da Consolidação das Leis do Trabalho - CLT, e Considerando o uso difundido do gás óxido de etileno como agente esterilizante de materiais médico-hospitalares, especialmente para materiais e artigos termossensíveis, e a evolução das tecnologias para o seu emprego. (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1999)

Art. 2º - Adequar os procedimentos de registro na Secretaria de Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde para o acompanhamento das ações no uso do gás óxido de etileno e de seus respectivos agentes esterilizantes para o acompanhamento das ações no uso em esterilização, reesterilização e reprocessamento de materiais e artigos médico-hospitalares, elaboração e controle de estatísticas e desenvolvimento de atividades pertinentes. (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1999)

No ciclo de esterilização realizado pela Sterigenics na unidade de Ontario, a maior parte dos produtos é pré-acondicionada, esterilizada e posteriormente aerada, como mostra a Figura 12.

Figura 12 - Visão geral do Ciclo de Esterilização



Fonte: CSB, 2006 (Adaptado)

3.3.1 Pré-acondicionamento

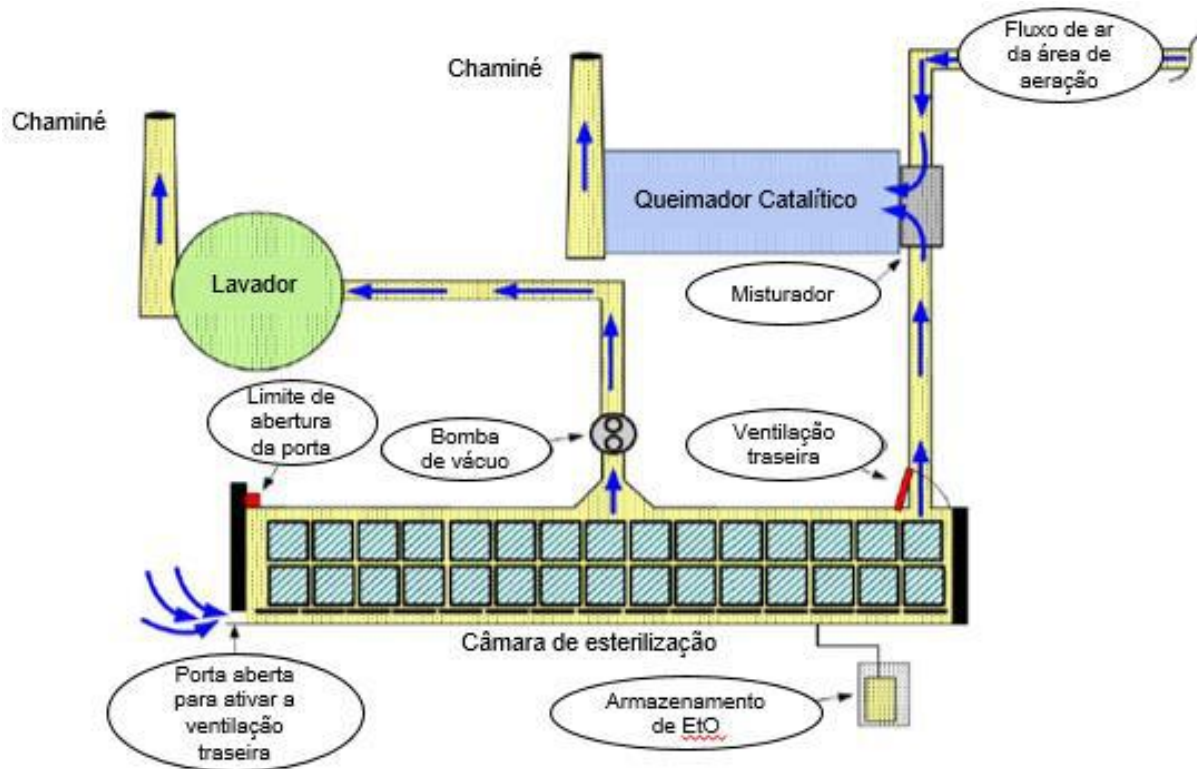
A primeira etapa do processo de esterilização consiste em manter os produtos a níveis altos de umidade e temperatura entre 27°C e 49°C durante 6 a 24 horas, parâmetros que dependem do produto a ser acondicionado. A eficácia da esterilização por óxido de etileno depende da difusão do gás através da embalagem e do produto, logo, a importância dessa etapa é a de assegurar essa penetração efetiva de ETO e de aquecer o produto para a etapa de esterilização.

O pré-acondicionamento é formado por quatro recintos com níveis ambientalmente controlados localizados na parede norte da instalação industrial.

3.3.2 Esterilização

Após o pré acondicionamento, os produtos são levados em pallets para a câmara de esterilização pelos operadores. Em seguida, as câmaras de aço inoxidável são fechadas e preparadas para o início do processo. O tempo para que o ciclo seja feito depende do tipo de produto, mas a faixa de duração é de 6 a 15 horas. Na Figura 13 é possível ver os principais equipamentos envolvidos no processo de esterilização.

Figura 13 – Sistemas de controle de emissão de gases da unidade de Ontario



Fonte: CSB, 2006 (Adaptado)

O ciclo inicia estabelecendo-se vácuo na câmara por meio da bomba de vácuo e injetando vapor para manter o acondicionamento dos produtos. Em seguida, o óxido de etileno é adicionado a partir de cilindros pressurizados posicionados ao longo de cada câmara até a sua concentração alcançar 400.000 ppm. Nessa concentração, o óxido elimina microrganismos viáveis destruindo o DNA. (CSB, 2006)

Os produtos são expostos ao óxido de etileno e a nitrogênio e são mantidos sob pressão negativa durante um período predeterminado. Ao final dessa fase, a mistura de gás da câmara é evacuada para o lavador ácido que remove ETO. Aproximadamente 60% de ETO é retirado da câmara durante essa fase do ciclo. Em seguida, a câmara passa por uma série de lavagens com nitrogênio e/ou ar para a retirada do óxido de etileno remanescente e essas misturas também seguem para o lavador ácido. Esse equipamento não utiliza fontes de calor, mas sim uma solução de ácido sulfúrico que reage com a mistura de gás e converte o óxido de etileno em uma solução de etileno glicol, que segue para o tratamento de resíduos.

Após essas etapas essenciais de lavagem de gás para a redução da concentração de óxido de etileno para níveis não explosivos, ainda há traços do gás na câmara. Por conta da sua toxicidade, o ETO deve ser removido antes dos operadores entrarem e retirarem os produtos já esterilizados. Assim, a porta frontal do esterilizador é ligeiramente aberta em aproximadamente 15 cm para purgar o óxido de etileno remanescente. Automaticamente a tubulação para ventilação localizada na parte de trás da câmara também abre e esse fluxo de ar segue para o misturador. Depois que a câmara é ventilada por um período predeterminado de tempo, os operadores podem retirar os produtos de seu interior de maneira segura.

Em seguida, o ar utilizado para a ventilação é misturado ao fluxo de ar proveniente da aeração, no misturador. Uma série de espirais de aço transportam esse fluxo de ar misturado para o queimador catalítico, onde ocorre queima com chama direta. Um trocador de calor e uma câmara de combustão a gás natural aquecem o ar até aproximadamente 150 °C, temperatura necessária para iniciar a reação entre o óxido de etileno e o leito catalítico com liga metálica como objetivo de destruir o ETO. Após a queima, o ETO residual é removido da corrente de ar.

O ciclo de esterilização é controlado e monitorado pelos operadores por meio do Sistema Antares, sistema informatizado de controle de processo, localizado numa sala de controle, no lado oeste da instalação.

3.4 DESCRIÇÃO DO ACIDENTE

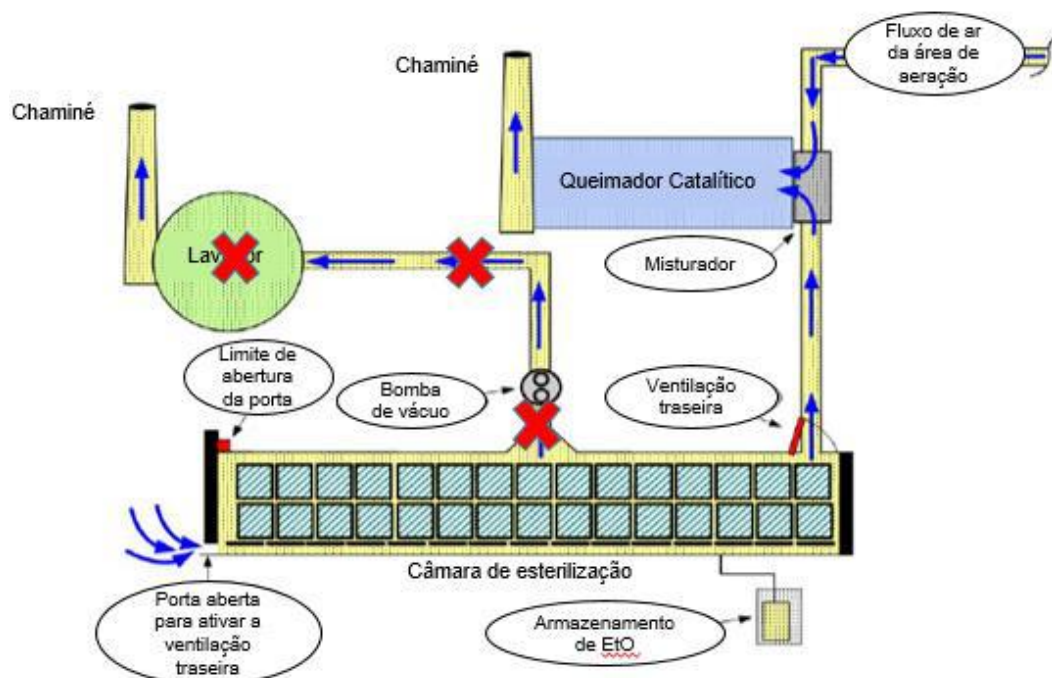
Na madrugada do dia 19 de agosto, por volta das 1h30, horário local, o sistema de controle Antares indicou uma falha na injeção de óxido de etileno durante um ciclo de esterilização na câmara 7. Os operadores realizaram diversos procedimentos na sala de controle para verificar se a falha realmente havia ocorrido e qual foi o motivo do problema acontecer. Em seguida, o operador chefe foi chamado e, em conjunto, foi decidido cancelar o ciclo. Após o cancelamento, os materiais que estavam no interior da câmara foram retirados e levados para uma sala de aeração. A câmara foi deixada aberta para que os responsáveis pela manutenção pudessem investigar a falha.

Por volta das 7h30, o supervisor da manutenção chegou à instalação e direcionou dois técnicos para que a falha na injeção de óxido de etileno fosse verificada. Diversos testes foram feitos, inclusive um que consistia em um ciclo de esterilização mais curto, em que aproximadamente 1,8 kg de ETO foram injetados na câmara. Esse processo foi bem sucedido e os técnicos não identificaram o problema.

Antes da liberação do equipamento para a linha, mais 113,40 kg foram injetados para um ciclo de calibração. Como não houve problemas com a injeção de óxido de etileno, os técnicos assumiram que não havia falhas nesse sistema. Com o intuito de retornar a câmara para a produção, os técnicos pediram permissão ao supervisor da manutenção para não realizar a etapa de lavagem de gases e adiantar a conclusão do ciclo.

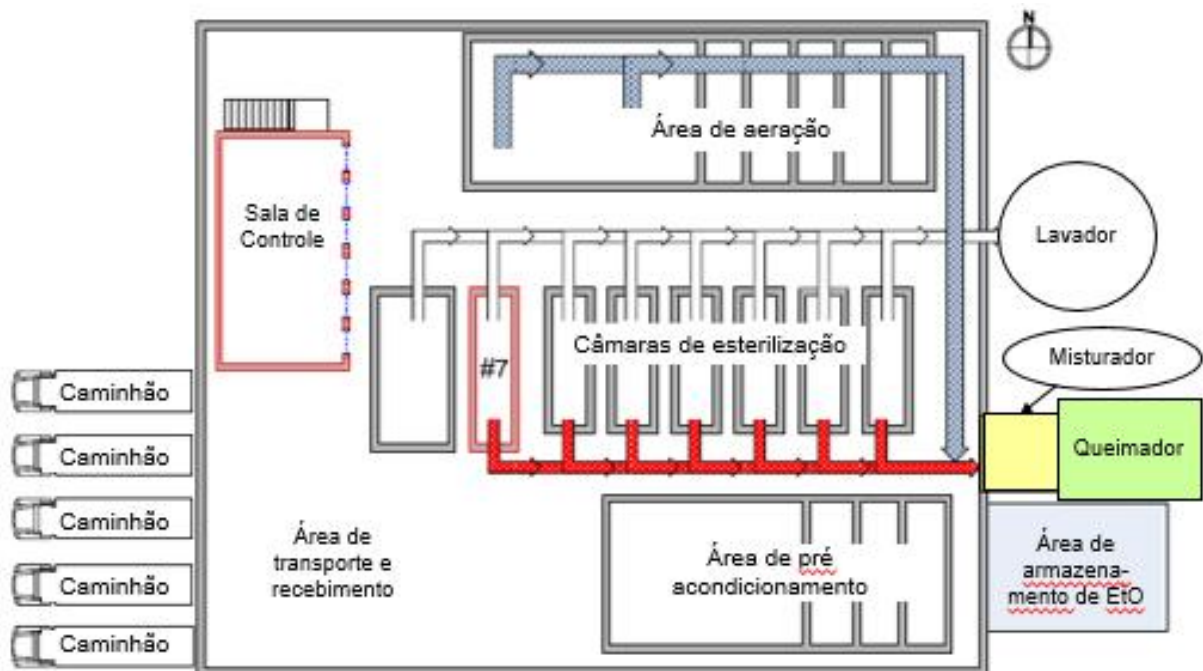
O supervisor concordou com os técnicos e permitiu o adiantamento da conclusão do ciclo. Assim, o técnico de manutenção usou a senha que o supervisor lhe passou oralmente para pular a etapa de lavagem de gases no sistema Antares. Minutos depois, a porta localizada na parte frontal da câmara foi aberta e automaticamente a tubulação para a ventilação traseira também. A Figura 14 mostra a modificação feita pelo funcionário, em vermelho.

Figura 14 - Sistemas de controle de emissão de gases da unidade de Ontario modificados



Logo depois da abertura da porta frontal, parte do óxido de etileno vazou da câmara para a instalação onde os equipamentos de esterilização estavam. Como a concentração era explosiva, os indicadores de limite inferior de explosividade (LIE) do prédio alarmaram, mas não permitiram tempo hábil para desligar a queima de gases ou evacuar o prédio. Em seguida, aproximadamente 22,7 kg de ETO seguiram para a ventilação tendo como destino a queima de gases, como é possível ver na Figura 15. Em vermelho é indicado o caminho feito pela mistura de gás após a abertura da porta da câmara e a liberação da tubulação para ventilação traseira.

Figura 15 - Planta da unidade de Ontario



Fonte: CSB, 2006 (Adaptado)

Assim que a mistura com concentração inflamável de óxido de etileno chegou ao queimador, ocorreu a ignição e, em seguida, houve retrocesso das chamas pela tubulação de ventilação até a câmara, onde o restante de ETO foi queimado, causando uma grande explosão, aproximadamente às 14h do mesmo dia.

A explosão fez com que as janelas de vidro da sala de controle quebrassem (Figura 16), causando cortes e lacerações em quatro colaboradores. Três deles foram levados ao hospital para tratar os ferimentos leves e foram liberados no mesmo dia. Geralmente, durante um turno normal, há de três a sete empregados na área de

esterilização, entre operadores e técnicos da manutenção. No entanto, felizmente, não havia empregados na área das câmaras no momento da explosão.

Figura 16 - Janelas de vidro da sala de controle quebradas com o impacto



Fonte: CSB, 2006

Segundo o relatório de investigação do acidente, os danos na sétima câmara e na tubulação de ventilação sugerem que o ar rico em ETO foi transportado para a oxidação de gases, onde ocorreu a ignição. Grande parte da tubulação de entrada da queima de gases que a conectava à câmara 7 explodiu, o que indica que houve uma alta pressão dentro do queimador, que também foi danificado (Figura 17).

Após a ignição da corrente de ar com concentrações inflamáveis de óxido de etileno, houve o retrocesso da chama até a câmara 7, que ainda continha aproximadamente 18,1 kg do gás explosivo, onde ocorreu a explosão. A Figura 18 mostra o estado da câmara pós acidente.

Figura 17 - Danos no queimador pós explosão



Fonte: CSB, 2006

Figura 18 - Danos na sétima câmara de esterilização pós explosão



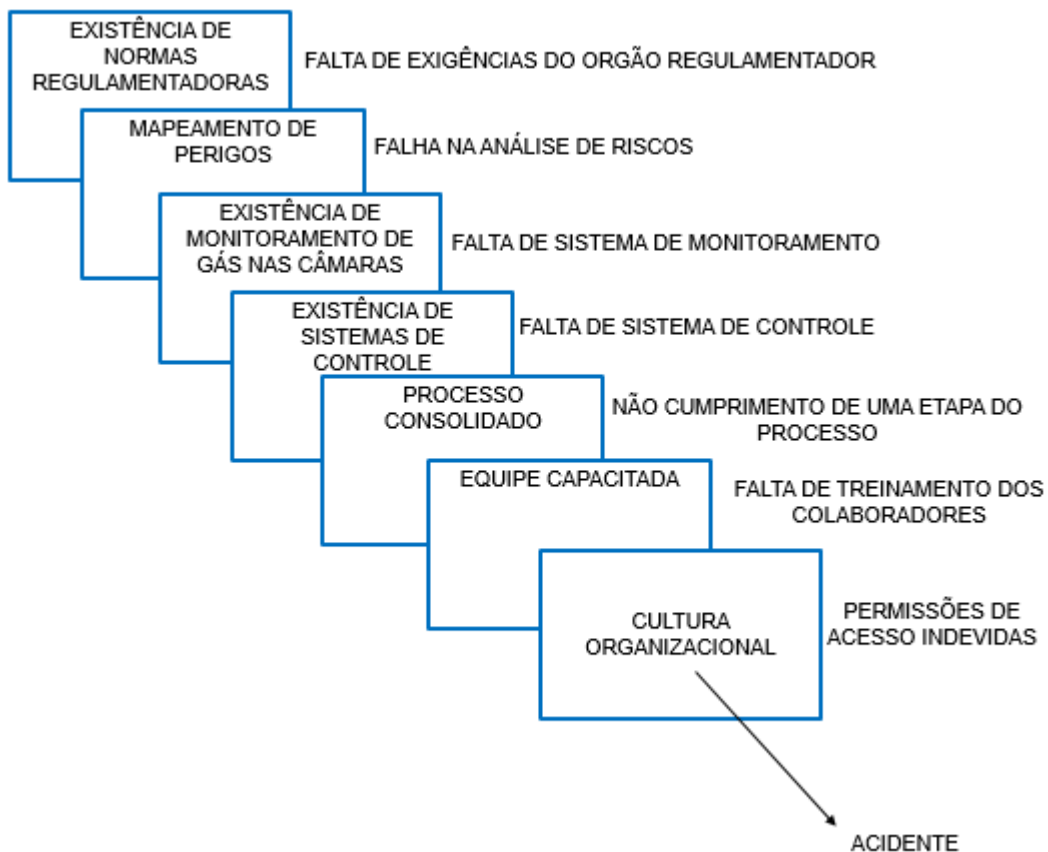
Fonte: CSB, 2006

A força da explosão causou deformação à estrutura da câmara e fez com que as suas duas portas fossem arremessadas. A porta de carregamento foi encontrada a aproximadamente 4,6 m de distância, depois de colidir e danificar uma coluna de aço. Já a porta de descarregamento estava a 22,9 m, após colidir com a parede sul do prédio.

3.5 ANÁLISE DOS FATORES HUMANOS NO ACIDENTE DA STERIGENICS

Após a investigação, observou-se que uma série de fatores humanos contribuiu para o ocorrido, tanto em relação a barreiras humanas preventivas como a falhas ativas associadas a atos inseguros. Com o intuito de analisar as causas raízes e os fatores levantados pela CSB, é possível usar o modelo “Queijo Suíço”. Um esquema em que é mostrada a trajetória das oportunidades para a ocorrência do acidente, com as barreiras e as falhas em cada uma delas está representado na Figura 19.

Figura 19 - Representação da trajetória do acidente na Sterigenics utilizando o modelo “Queijo Suíço”



Fonte: Elaboração da autora, 2021

Em relação às barreiras defensivas de engenharia, como alarmes e sensores, e às falhas relacionadas a elas, pode-se citar dois fatores:

1. A câmara de esterilização não era equipada com um sistema de monitoramento de concentração de gás. Assim, quando o ciclo foi interrompido, os funcionários não eram capazes de determinar a

concentração exata de óxido de etileno na câmara, apenas poderiam estima-la com base na injeção de gás feita;

2. Não havia controles de engenharia para detectar, prevenir ou mitigar que uma corrente com concentração explosiva de óxido de etileno chegasse ao queimador.

Já sobre a barreiras defensivas relacionadas a procedimentos e controles administrativos e a atos inseguros, observam-se mais cinco influenciadores:

1. Sobre a existência de normas regulamentadoras, a *California Air Resources Board* (CARB) não exigiu que as instalações de esterilização abrangidas pela sua regra de tratamento de emissões de óxido de etileno fossem projetadas e operassem a fim de evitar explosões;
2. O programa de análise de perigos na unidade de Ontario não identificou nem avaliou os perigos associados a uma concentração explosiva de óxido de etileno chegar ao queimador;
3. Existia um procedimento para esvaziamento da câmara e eliminação de óxido de etileno. No entanto, uma etapa do processo não foi cumprida;
4. Os técnicos da manutenção foram treinados pela última vez sobre a necessidade da lavagem de gases em 1997, sete anos antes do acidente. Além disso, o supervisor da manutenção foi contratado após 1997 e nunca recebeu o treinamento, assim, ele não entendia os perigos associados ao processo. Essa falha está diretamente relacionada à capacitação dos funcionários da empresa.
5. Permissões de acesso ao sistema indevidas. Apesar dos materiais de treinamento utilizados na unidade de Ontario deixarem claro que apenas gerentes poderiam modificar a sequência de um ciclo de esterilização, o supervisor de manutenção possuía a senha que permitia tal modificação. Esse acesso ao sistema pode se tratar de um problema cultural da organização e será discutido posteriormente.

Além dos fatores explicitados, em se tratando de barreira mitigadora, pode-se citar as janelas da sala de controle, que estava em uma área em que uma explosão

poderia ocorrer. Nesse cenário, as janelas deveriam ser de um material resistente, a prova de explosão e não de vidro. Além disso, seria válido averiguar a possibilidade da sala de controle não ter janelas ou até ser distante das câmaras de esterilização e o controle visual do processo ser feito por meio de câmeras de monitoramento. Apesar de não evitar que o acidente ocorresse, essas modificações poderiam mitigar os danos humanos causados, visto que todos os ferimentos foram causados pelos estilhaços dos vidros da sala após a explosão.

3.5.1 O interesse de liberar a câmara para a continuidade da operação

O processo de esterilização com óxido de etileno na Sterigenics foi desenvolvido de forma que o Sistema Antares era capaz de monitorar a pressão da câmara, a evacuação e a lavagem de gases, além de possuir um sistema de travas. Esse controle era imprescindível visto que era necessário garantir que misturas com concentrações inflamáveis de ETO não entrassem em contato com fontes de ignição, como o queimador. O único backup era o sistema de ventilação, projetado para diluir as misturas de gases da câmara antes da queima.

Os técnicos de manutenção desejavam disponibilizar a área de esterilização mais rápido e, como consequência, a etapa de lavagem ácida dos gases não foi realizada. Essa decisão fez com que a corrente gasosa com concentração de ETO explosiva chegasse à queima de gases e sofresse ignição. No relatório do acidente, os motivos que incentivaram a pressa em liberar a área não foram levantados, mas é possível analisar algumas possibilidades. Entre elas, a possível equipe reduzida, o não cumprimento dos procedimentos de operação e a experiência dos técnicos.

O primeiro fator é a possível equipe reduzida, que pode causar sobrecarga nos funcionários. Esse excesso de serviço sobre os colaboradores contribui para a ocorrência de erros humanos na área de trabalho. Isso porque as demandas devem ser feitas mais rapidamente ou de forma simultânea, para que não aconteçam atrasos na entrega do produto esterilizado. A pressão causada por esse tipo de cenário prejudica a tomada de decisão e, segundo Kelly e Efthymiou (2019), pode levar a acidentes.

O segundo fator está relacionado ao não cumprimento do procedimento de operação padrão. O Sistema Antares foi projetado para evitar que correntes de ar com concentrações inflamáveis de óxido de etileno chegassem na queima de gases. No entanto, o supervisor de manutenção optou por pular uma das etapas que o sistema estava pré programado a executar. Esse comportamento humano está associado a atos inseguros, visto que não houve o cumprimento da sequência de atividades como previstos em procedimento.

Ademais, é possível que esse tipo de desvio de processo fosse comum na unidade, embora não tenha sido relatado que um acidente tenha ocorrido previamente devido a essa prática. Sob essa ótica, essa infração não seria questionada por ser um hábito dos funcionários e apenas mais uma ocorrência da transgressão, caracterizando uma violação rotineira. Nesse sentido, nota-se também uma possível influência organizacional, mais especificamente na cultura organizacional, uma vez que é possível a existência de um ambiente inseguro pela tolerância a desvios.

Em relação ao terceiro fator, os técnicos de manutenção eram experientes e estavam na empresa há mais tempo do que o supervisor que autorizou a não realização da lavagem de gases. Isso pode ter sido permitido pela confiança do supervisor na experiência de seus colegas. Como ele não tinha sido treinado na empresa, não entendia o porquê da lavagem de gases ser essencial. Nesse cenário observa-se a complacência, comportamento humano em que, devido a um excesso de confiança, a atenção do funcionário está reduzida o que faz com que as decisões não sejam avaliadas da forma correta. (KELLY; EFTHYMIOU, 2019) Ademais, é possível identificar também a supervisão insegura, visto que esse funcionário não tinha conhecimento suficiente, ou seja, não era qualificado para o cargo.

3.5.2 Entendimento dos colaboradores sobre o processo

Em relação ao entendimento do processo, a maior parte dos treinamentos era voltada para os colaboradores assim que eram admitidos na empresa e também havia reciclagens. Esses operadores, já com conhecimento sobre o processo, eram frequentemente promovidos a técnicos de manutenção. Em contrapartida, não

aconteciam capacitações periódicas voltadas apenas para os funcionários da manutenção. Como consequência, os técnicos não eram atualizados regularmente sobre os procedimentos de operação.

Os investigadores da CSB analisaram os materiais de treinamento e verificaram diversas referências aos perigos de explosão em potencial associados a pular a etapa de lavagem de gases. Associado a isso, apenas os gerentes eram permitidos a modificar a sequência do ciclo de esterilização. O último treinamento aos operadores foi dado em 1997 e nele foi alertado que, após aplicação de vácuo, apenas 60% do óxido de etileno era removido e que a lavagem de gases era sempre necessária. No entanto, o treinamento nunca fez distinção entre câmara cheia e câmara vazia. Após o acidente, testemunhas informaram que os técnicos acreditavam que as concentrações de ETO não eram explosivas no fim do ciclo de evacuação feito, já que os testes para a verificação das falhas foram feitos com a câmara vazia, sem produtos sendo esterilizados. Dessa forma, a lavagem de gases não faria sentido porque acreditavam não haver óxido de etileno residual. O supervisor presente no dia do acidente foi contratado após 1997, nunca recebeu treinamento e também tinha o mesmo entendimento. Esse tipo de problema no programa de capacitação da equipe é um fator que contribui para cenários de insegurança.

É válido ressaltar que a importância da lavagem de gases é retirar o excesso de óxido de etileno na câmara após o processo de esterilização. Após o ciclo, a mistura de gases deveria seguir para essa etapa e em seguida também seriam feitas diversas lavagens na câmara utilizando-se ar e/ou nitrogênio a fim de diminuir a concentração de óxido de etileno para que só depois a mistura com apenas traços do óxido seguisse para o queimador.

3.5.3 Compartilhamento de senha

Em relação à autorização do cancelamento de uma das etapas, o supervisor de manutenção passou a senha oralmente para o técnico. Essa prática viola as boas práticas de fabricação no que se refere a integridade de dados. Senhas são confidenciais, compartilhá-las interfere na rastreabilidade das ações tomadas e

aprovações feitas. É importante se certificar de que as pessoas estão bem treinadas nos perigos do processo antes de autoriza-las a ignorar sistemas informatizados. Além disso, existe também o controle de acesso ineficaz, visto que apenas um gerente era autorizado a pular fases do ciclo de esterilização.

Sobre esse tópico é possível avaliar os fatores que podem ter motivado a decisão de ceder a senha mesmo essa atitude não sendo permitida. O primeiro fator é o constrangimento em não passar a senha para outra pessoa, o que pode ser confundido com falta de confiança no colega de trabalho. O segundo fator é a periodicidade que essa falha de segurança acontecia, talvez fosse uma violação rotineira que não era questionada e, assim, se tratar de uma falha na cultura organizacional.

3.5.4 Similaridades com outros eventos

Os fatores humanos citados que contribuíram para a explosão de óxido de etileno na planta da empresa Sterigenics também podem ser identificados em outros cenários, como acidentes na aviação e em laboratórios.

Em relação à influência da experiência do técnico sobre o supervisor da manutenção e à pressa para liberar a câmara de esterilização, é possível observar que esses fatores também podem estar presentes e podem interferir de forma semelhante na segurança de um voo, com as devidas adaptações. Como exemplo, pode-se citar o maior desastre aéreo da história ocorrido no dia 27 de março de 1977 no aeroporto de Los Rodeos localizado em Tenerife, no arquipélago das Ilhas Canárias. (MORIARTY, 2015) Sobre o acidente, durante a decolagem com baixa visibilidade, houve a colisão de dois Boeing 747, um da empresa KLM e outro da Pan American, na pista de decolagem (Figura 20). Como consequência, 583 pessoas morreram.

Figura 20 - Ilustração do acidente aéreo em Tenerife



Fonte: Air crash disasters, 2016

Após as investigações sobre o acidente aéreo, diversos fatores relacionados a erros humanos foram levantados como influenciadores da tragédia. Dentre eles pode-se citar a pressa do piloto da KLM em realizar a decolagem da aeronave o mais rápido possível e o excesso de confiança na experiência desse comandante.

Sobre o primeiro fator, a piora nas condições meteorológicas em Tenerife e o risco da tripulação ultrapassar o seu tempo limite de voo foram motivos para o aumento da pressão para decolar o mais rápido possível. (MORIARTY, 2015) Na Sterigenics, essa pressão estava relacionada à liberação da câmara de esterilização de volta para a operação, o que fez com que etapas cruciais não fossem realizadas. Nesse cenário, é notório que as decisões que foram tomadas, tanto no acidente na Sterigenics como no exemplo de Tenerife, estavam equivocadas e foram motivadas pela pressão de tempo. Além disso, a avaliação de risco durante a operação foi ineficaz ou inexistente.

Em se tratando de excesso de confiança, no momento em que o Boeing 747 da KLM iniciou o procedimento para decolagem, o copiloto alertou que a permissão para decolar não havia sido concedida pela torre de controle. O comandante então pediu para que o colega perguntasse aos controladores de tráfego aéreo se a decolagem estava autorizada. Apesar de não terem recebido a permissão de forma clara, o piloto iniciou o processo de voo, nesse momento, uma ação necessária foi ignorada, configurando um ato inseguro. Logo depois, o engenheiro de bordo levantou o questionamento da pista de decolagem não estar livre para a decolagem, por ter

ouvido a informação pelo rádio. No entanto, o piloto prosseguiu com a decolagem e o copiloto não interviu, colidindo treze segundos depois. (MORIARTY, 2015)

Nesse acidente, o status elevado do piloto pode ter desempenhado um papel importante no desastre. (AIR CRASH DISASTERS, 2016) Isso porque esse comandante era um funcionário muito experiente, apontado como um dos melhores pilotos da KLM, diretor de segurança de voo da companhia, chefe do departamento de treinamento de voo e também treinava novos pilotos na empresa por meio de simuladores. Nesse contexto, as decisões do comandante eram inquestionáveis e com esse tipo de autoridade era menos provável que alguém mais jovem, como o copiloto ou o engenheiro a bordo, questionasse qualquer atitude que ele tomasse. (AIR CRASH DISASTERS, 2016) Essa influência da experiência também é observada no acidente da Sterigenics, em que o técnico era um funcionário mais antigo do que o supervisor da manutenção.

Em relação a acidentes em laboratórios, pode-se citar o ocorrido no *Terry Lee Wells Nevada Discovery Museum ("The Discovery")* em Reno, Nevada no dia 03 de setembro de 2014. Nesse evento, durante a demonstração de um Tornado de Fogo, uma funcionária causou um incêndio ao adicionar metanol a uma bola de algodão em chamas. Como consequência, treze pessoas ficaram feridas, dentre elas, oito crianças e um adulto, que foi levado para o hospital. (CSB, 2014)

A prática laboratorial em questão foi a demonstração de um tornado de fogo e consistia em apoiar uma bola de algodão em um disco de vidro, adicionar metanol ou isopropanol, colocar um aditivo de cor, posicionar em um suporte giratório e, depois, atear fogo. Em seguida, o disco é coberto por um cesto de lixo metálico e é girado, criando um efeito similar ao de um tornado. No dia do acidente, a funcionária aproximou a fonte de calor do algodão, mas a chama esperada não apareceu. Após notar que o combustível ainda não tinha sido adicionado, a colaboradora usou um recipiente de 4,0 L para umedecer o algodão. Isso fez com que uma grande chama fosse gerada instantaneamente na borda do recipiente (Figura 21). Ela então deixou o galão cair e o metanol queimando espalhou-se em direção à audiência, constituída majoritariamente por crianças. Rapidamente dois outros funcionários conseguiram controlar o fogo, com um extintor e um cobertor de incêndio disponíveis.

Figura 21 - Recipiente com metanol em chamas



Fonte: CSB,2014

Segundo as investigações da CSB, alguns fatores humanos contribuíram para o acidente. Dentre eles, pode-se citar análise de riscos inadequada, problemas no procedimento e treinamento ineficiente. Essas deficiências são similares ao que se observa no ocorrido na empresa Sterigenics.

Sobre a análise de riscos inadequada, os perigos associados aos químicos inflamáveis utilizados nas práticas laboratoriais no The Discovery não foram identificados e controlados. Além disso, as investigações feitas pela CSB apontaram que nem os funcionários nem seus gerentes tinham experiência na realização dessa análise. O mesmo foi observado no programa de análise de riscos da empresa Sterigenics, em que não foi mapeado o perigo de uma concentração de óxido de etileno acima dos limites permitidos chegar ao queimador e sofrer ignição.

O procedimento formal para a demonstração laboratorial não continha todas as etapas do experimento de forma detalhada, assim, também apresentava deficiências. O documento em questão não informava que o metanol devia ser adicionado a um béquer menor em uma sala separada antes da prática, conforme instruído verbalmente aos funcionários nos treinamentos iniciais. Isso associado à análise de riscos ineficaz, fez com que houvesse uma normalização do uso inseguro do recipiente de 4,0 L, que passou a ser levado para a demonstração e mostrado à audiência. Além disso, os funcionários deixaram de transferir o metanol previamente para os béqueres, embebendo as bolas de algodão diretamente do recipiente maior. Essa prática tornou-se comum, caracterizando-se como uma violação rotineira. Caso o procedimento estivesse com as instruções completas, a probabilidade do líquido em chamas ter alcançado a audiência teria sido substancialmente minimizada, se não eliminada. (CSB, 2014) Esse ponto tem semelhanças e diferenças em relação ao

estudo de caso da empresa Sterigenics. Por um lado, a empresa disponibilizava um procedimento com instruções a serem seguidas, mas etapas não foram realizadas. Por outro lado, nos dois acidentes nota-se uma possível tolerância a desvios e violações ao procedimento. Isso reforça que seguir as orientações é tão importante quanto ter esse documento escrito de forma eficaz.

O terceiro fator contribuinte para o evento foi o treinamento ineficiente. A capacitação oferecida aos funcionários do The Discovery não enfatizava de forma eficaz os riscos inerentes à inflamabilidade do metanol. Devido à falta de conhecimento por parte da equipe do museu, os treinamentos de demonstração tinham como foco as melhores formas de interagir com o público e de comunicar os resultados científicos. Por outro lado, a utilização segura de metanol e de outros materiais inflamáveis durante as apresentações não era enfatizada suficientemente. Ademais, as avaliações periódicas dos funcionários centraram-se em uma apresentação atrativa da demonstração, em vez de assegurar boas práticas de segurança. Como exemplo de características altamente valorizadas, pode-se citar: mostrar o recipiente de metanol para a audiência, tom de voz, explicação clara dos princípios científicos e o entusiasmo.

Falhas no programa de treinamento também foram notadas no caso da empresa Sterigenics, já que o mesmo não tinha periodicidade suficiente de forma que todos os funcionários pudessem estar devidamente capacitados. Além disso, essa capacitação carecia de explicar o detalhe importante sobre a distinção entre câmara cheia e câmara vazia. O fato do equipamento estar vazio fez com que os técnicos e o supervisor achassem que não havia óxido de etileno residual. Assim, a etapa de lavagem de gases não foi realizada.

4 ESTUDO DE CASO: ACIDENTE NA REFINARIA DA BP NA CIDADE DO TEXAS

Nesse capítulo será discutida a explosão na refinaria de óleo da BP em 2005. As informações sobre o desastre foram obtidas a partir do relatório da investigação oficial do acidente elaborado pela CSB em 2007. Os fatores humanos que contribuíram para o ocorrido também serão abordados em seguida.

4.1 A EMPRESA E INTRODUÇÃO AO ACIDENTE

A refinaria de óleo da BP na Cidade do Texas era propriedade da empresa Amoco até 1999, ano no qual ocorreu a fusão com a BP, que passou a ser responsável pela operação da planta. Na época do acidente, essa instalação era a terceira maior dos Estados Unidos e era responsável pela produção de gasolina, combustível de aeronaves, diesel e matérias primas químicas. A unidade empregava cerca de 1800 funcionários e contava com mais 800 contratados que trabalhavam em projetos programados de manutenção das instalações.

No dia 23 de março de 2005, às 13h20, horário local, a refinaria sofreu um dos piores desastres industriais da história recente dos Estados Unidos. (CSB, 2007) O acidente ocorreu durante a inicialização, ou partida, de uma unidade de isomeração de hidrocarbonetos, em que uma das torres fracionadoras de refinado foi alimentada além dos limites preestabelecidos. Após uma sequência de acontecimentos, houve uma explosão e um incêndio subsequente que danificaram severamente a instalação (Figura 22). Conseqüentemente, quinze funcionários que estavam nos trailers perto da unidade de isomeração foram mortos, outros 180 foram feridos e casas distantes até 1,20 km da instalação foram danificadas. Além disso, enquanto o incêndio exalava fumaça, 43 mil habitantes da cidade receberam instruções das autoridades locais para permanecerem em suas casas.

Figura 22 - Danos na instalação da Cidade do Texas da Refinaria da BP



Fonte: CSB, 2007

4.2 O PROCESSO DA UNIDADE DE ISOMERIZAÇÃO

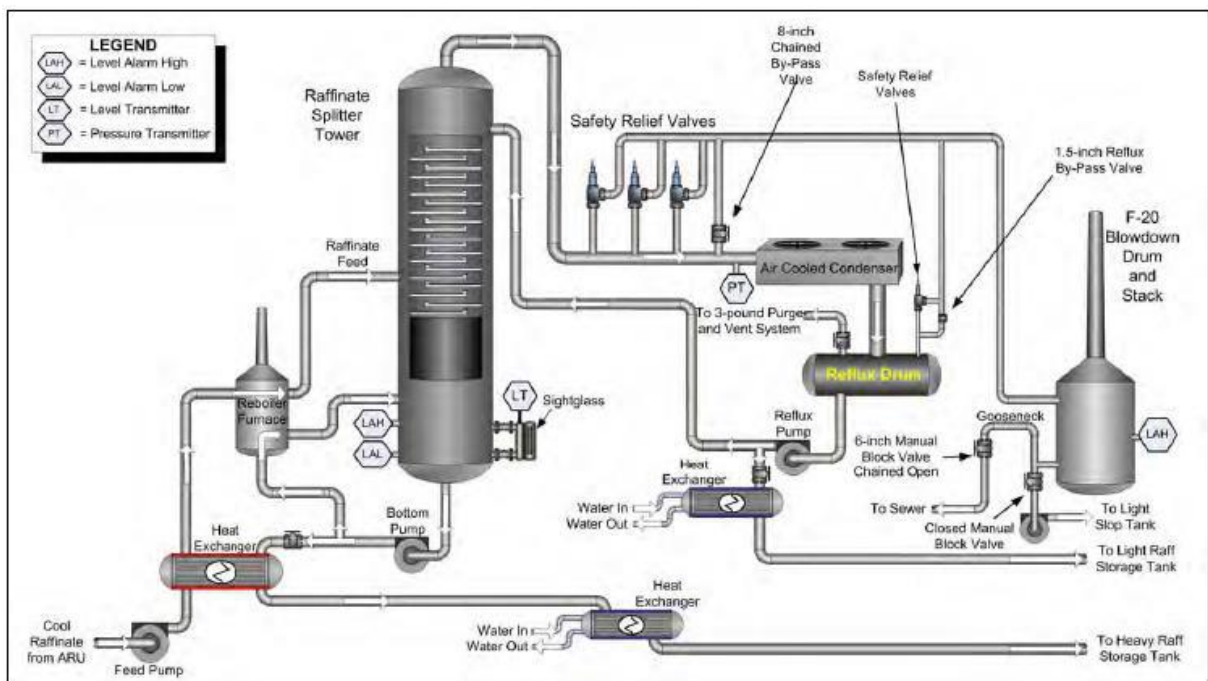
Na refinaria da BP, o processo de isomerização convertia pentanos e hexanos de cadeia linear em isopentanos e isohexanos com cadeias ramificadas para misturas de gasolina e matérias primas químicas. Na instalação estudada, essa era uma das etapas para o processo de aumento da octanagem da gasolina sem chumbo. As quatro seções dessa unidade são: um dessulfurizador, um reator, uma unidade de recuperação de vapor e reciclo de líquido e, por fim, uma torre fracionadora de refinado. A seguir serão descritos os equipamentos dessa última seção para o entendimento dos eventos que culminaram no acidente.

4.2.1 Seção fracionadora de refinado

A seção fracionadora recebia refinado, uma mistura de hidrocarbonetos com cadeia linear, da Unidade de Recuperação de Aromáticos e separava-a em componentes leves e pesados. Em relação à capacidade, podia processar

aproximadamente 7,2 milhões L/dia de refinado alimentado. Os equipamentos de processo dessa seção são: um tambor de alimentação, uma torre fracionadora de refinado, uma fornalha com duas seções de aquecimento - uma delas utilizada como refervedor para o aquecimento do fundo da torre e a outra para o pré aquecimento da alimentação - condensadores, vaso de refluxo, diversas bombas e trocadores de calor. Uma visão geral dessa seção pode ser vista na Figura 23, em que também estão dispostos os alarmes de nível.

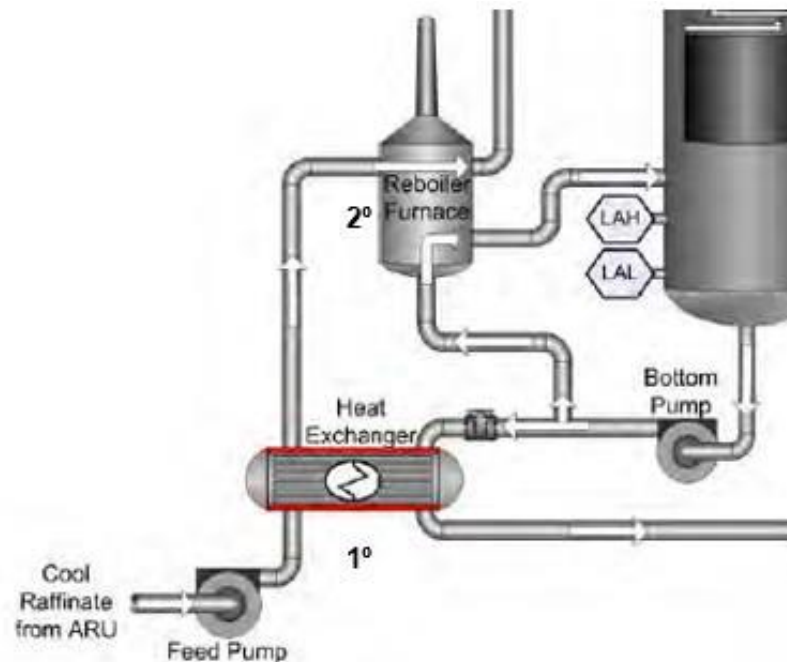
Figura 23 - Seção fracionadora de refinado da unidade de isomeração



Fonte: CSB, 2007

A torre fracionadora de refinado era uma coluna de destilação com um diâmetro interno de 3,8 m, altura de 52 m e uma capacidade volumétrica de 586.100 L. Esse equipamento era utilizado para destilar e separar os componentes da gasolina em refinado leve e pesado. A alimentação era feita perto do meio da torre fracionadora e uma válvula de controle automática ajustava esse fluxo. O líquido era preaquecido duas vezes, a primeira por um trocador de calor usando a fração pesada do produto refinado, e a segunda pela seção de preaquecimento do refervedor, que usava gás combustível da refinaria. A Figura 24 mostra esse sistema em destaque.

Figura 24 – Seções de pré aquecimento da corrente de alimentação



Fonte: CSB, 2007 (Adaptado)

Como mencionado, o primeiro preaquecimento da corrente de entrada era feito com a corrente de saída. Isso se trata de um exemplo de integração energética, que é a forma mais eficiente de se promover o ajuste de temperatura entre duas correntes. (PERLINGEIRO, 2005) A integração ocorre quando o calor das correntes quentes é aproveitado para aquecer as correntes frias, ao mesmo tempo em que há o resfriamento das correntes quentes. A vantagem disso é a diminuição de custos relacionados à operação, uma vez que o consumo de utilidades é reduzido. Já o segundo preaquecimento era feito utilizando combustível, tratando-se de um gasto a mais.

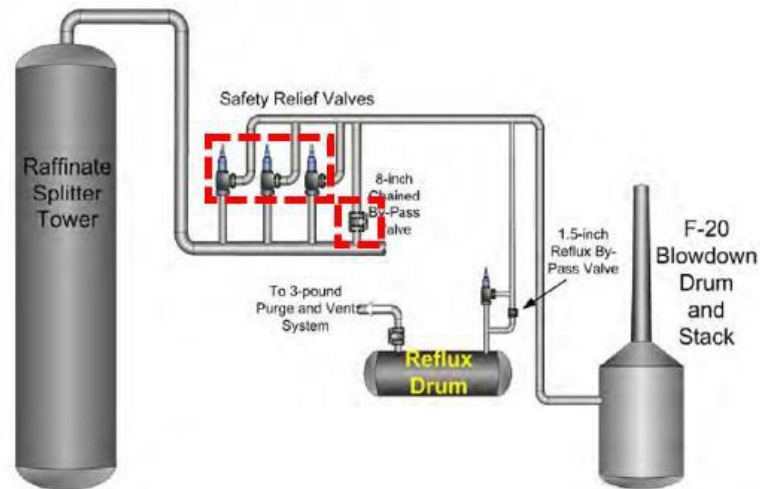
Próximo à base da torre, havia um instrumento que media o nível de líquido contido na mesma e transmitia a informação para a sala de controle dos operadores, localizada longe da unidade de isomeração. Esse equipamento fazia a medição na faixa de 1,5 m até 2,7 m, a partir do fundo. Havia também dois alarmes separados que indicavam níveis altos de líquido. Um foi programado para alertar quando o transmissor estivesse indicando 2,3 m e o outro avisava quando o nível de líquido alcançasse 2,4 m.

O refinado pesado era bombeado do fundo da torre e seguia para dois trocadores de calor (Figura 23). O primeiro trocava calor com a alimentação desse equipamento, que era mais fria, e o segundo trocava calor com água, antes dessa corrente seguir para o armazenamento ou tanques de mistura. Esse fluxo era controlado por uma válvula de controle de nível que, quando colocada no modo automático, mantinha um nível constante na torre fracionadora.

O vapor da fração leve fluía da parte superior da torre para baixo por uma tubulação, chegava ao condensador e era armazenado em um vaso de refluxo. Esse equipamento era operado de forma que ele sempre estivesse completamente preenchido e havia alarmes de nível alto e baixo, além de uma válvula de alívio. Durante a inicialização da torre, os vapores não condensáveis que se acumulavam no tambor eram normalmente ventilados para a purga da refinaria e o sistema de ventilação de gases. Uma válvula era usada para controlar essa vazão e não estava funcionando no dia do acidente.

Para proteger a torre fracionadora de uma sobrepessão, três válvulas de alívio (*Safety Relief Valves*) estavam localizadas em paralelo na tubulação de vapor a 45 m do topo da torre, como mostra a Figura 25. As pressões definidas nesses dispositivos foram 276, 283, e 290 kPa, respectivamente, e foram desenhadas para abrir e descarregar primariamente vapor quando as suas pressões estabelecidas eram excedidas. Uma tubulação *bypass* equipada com uma válvula manual (*8 - inch Chained By-Pass valve*) era utilizada para liberar gases não condensáveis e também para a purga do sistema. Essa vazão de saída foi canalizada para ser descarregada no sistema de coleta e descarte.

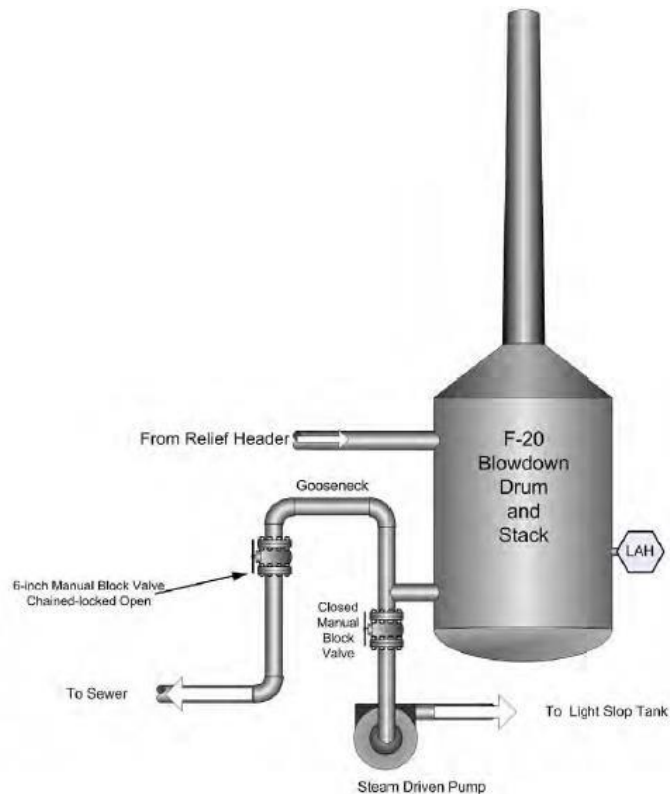
Figura 25 - As três válvulas de alívio e a manual



Fonte: CSB, 2007 (Adaptado)

O sistema de coleta recebia líquidos e/ou vapores de hidrocarbonetos das válvulas de alívio e de descarga da torre fracionadora e os descarregava para o tambor de descarga e purga. Outras seções da unidade de isomeração também utilizavam esse tambor, que pode ser visto em destaque na Figura 26.

Figura 26 - Sistema de coleta e descarte



Fonte: CSB, 2007

O tambor de purga e descarte recebia misturas líquido e/ou vapor de hidrocarbonetos durante o funcionamento e encerramento das atividades. Em operações normais, apenas os vapores de hidrocarbonetos leves subiam através de diversos deflectores e eram liberados pelo topo do equipamento por uma chaminé de ventilação. Qualquer fração pesada de hidrocarbonetos ou líquidos presentes desciam e eram descarregados na base do tambor. O líquido presente na corrente de saída seguia para o esgoto da unidade de isomeração, cuja tubulação era equipada com uma válvula manual que era mantida aberta.

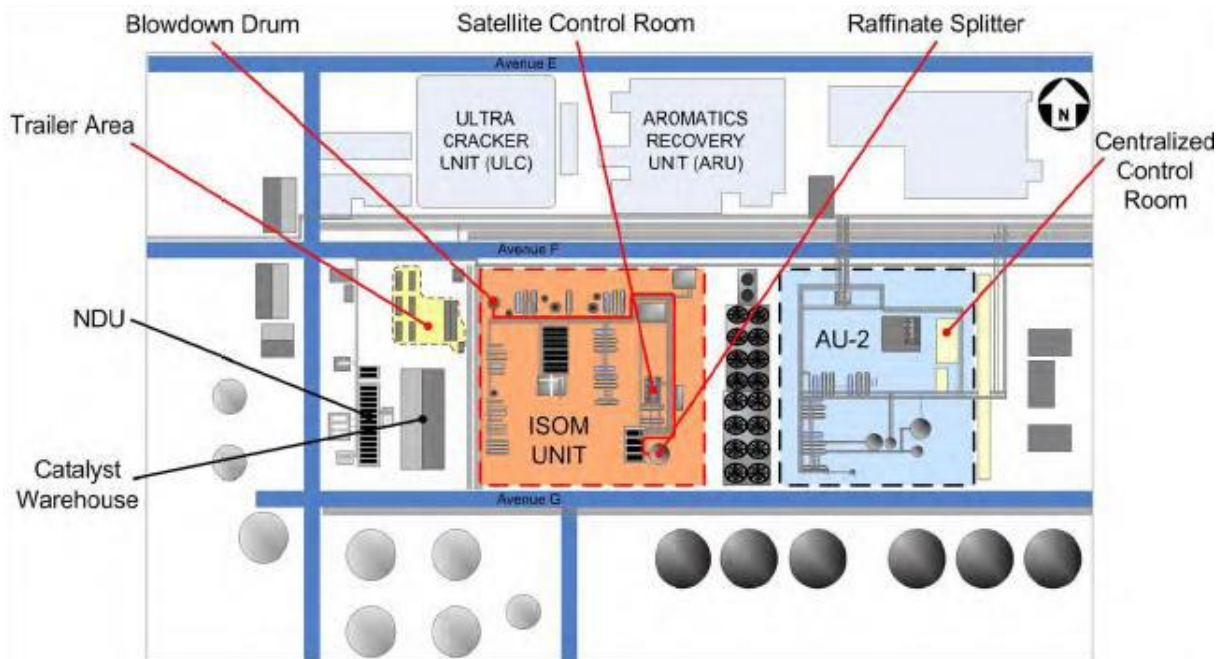
Em relação às dimensões do equipamento, o mesmo consistia em um tambor vertical instalado na refinaria em 1950 com um diâmetro inferior interno de 3 m e superior de 86 cm, que descarregava na atmosfera a uma altura de 36 m do solo. O seu volume total era de aproximadamente 86.200L. Um nível de líquido, geralmente água, era mantido no fundo do tambor e a altura era controlada por uma tubulação sinuosa conectada a um ralo fechado. Havia um visor de nível para monitorar a altura do líquido e um alarme era ativado quando o fluido estava próximo de transbordar sobre a parte superior da tubulação sinuosa. Uma segunda válvula de bloqueio manual era localizada numa ramificação do tubo de descarga do tambor.

4.3 DESCRIÇÃO DO ACIDENTE

Uma sequência de ações em um total de 11h culminou na explosão da refinaria da BP no dia 23 de março de 2005. A seguir, esses acontecimentos serão descritos com os detalhes necessários para o entendimento do evento.

À época, várias unidades da refinaria estavam com operações suspensas para projetos programados de manutenção e havia mais de 800 profissionais contratados na planta além dos funcionários da BP. Para comportar esse aumento de pessoal, a empresa optou por colocar vários trailers, que eram utilizados pelas equipes responsáveis pela manutenção junto às unidades de processamento. Por meses, dez dessas instalações temporárias foram mantidas para trabalhadores atuando na unidade de ultracraqueamento e serviam como escritórios que eram frequentemente utilizados para reuniões. Na Figura 27 é possível ver um esquema geral da planta.

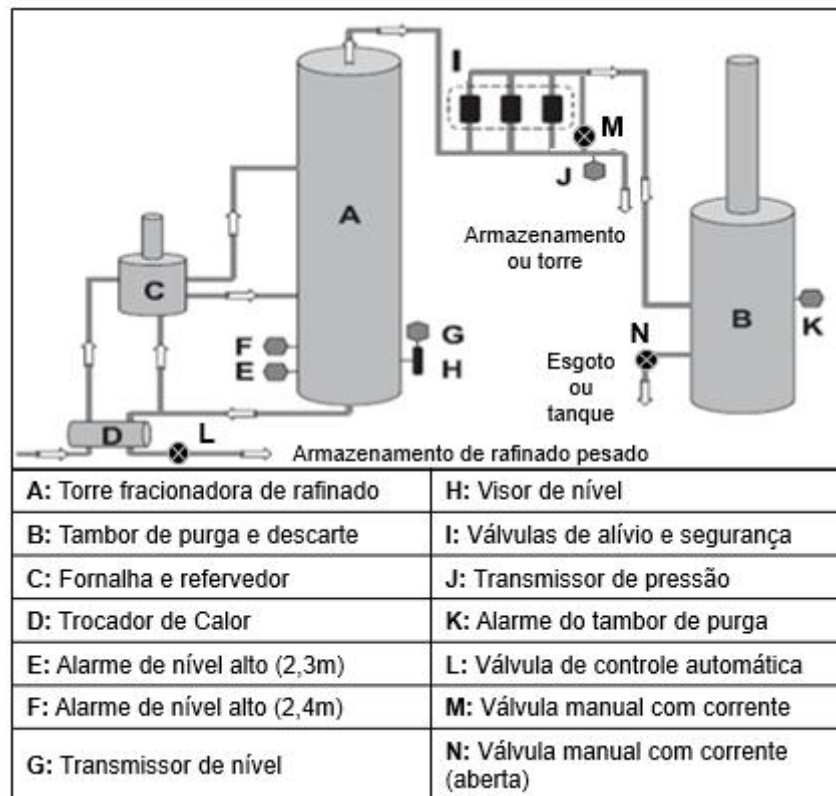
Figura 27 - Esquema com a planta simplificada da refinaria



Fonte: CSB, 2007

Nota-se que a unidade de isomeração (*ISOM UNIT*), em laranja, encontra-se em uma região relativamente central da planta. Nela, observa-se também o ponto em que a liberação de hidrocarbonetos aconteceu, no tambor de purga e descarte (*Blowdown Drum*). À direita, em azul, pode-se ver a sala de controle (*Centralized Control Room*), onde os colaboradores acompanhavam as operações em todas as unidades. Já à esquerda, em amarelo, tem-se a área dos trailers (*Trailer Area*), localizada ao lado da unidade de isomeração e perto da área de craqueamento, na qual os funcionários contratados estavam atuando. Dessa forma, o posicionamento dos escritórios temporários era coerente, visto que era uma área aberta próxima à área de trabalho. Na Figura 28 há um fluxograma mais detalhado da unidade de isomeração.

Figura 28 - Fluxograma simplificado da unidade de isomeração



Fonte: Abbasi S. et al, 2020 (Adaptado)

Às 2h15 da manhã do dia do acidente, os operadores começaram a alimentar a torre fracionadora de refinados. Às 3h09, quando o líquido atingiu a marca de aproximadamente 2,3 m, um alarme de nível alto foi acionado e soou na sala de controle. No entanto o outro alarme, um pouco mais acima da torre, falhou e não disparou. Já às 3h30, o indicador de nível mostrava que o líquido havia chegado aos 2,7 m de altura e a alimentação foi interrompida. Nesse ponto, as investigações feitas pela CSB estimaram que, na verdade, o líquido estava a uma altura próxima de 4 m, mas os operadores não tinham como saber o nível real porque o equipamento não media acima dos 2,7 m. Como a falha no segundo alarme não foi notada, isso não foi reportado pelo operador do turno noturno, conseqüentemente, nenhuma ação foi tomada e nada foi escrito no livro de registro. Depois que a torre foi enchida, a inicialização foi interrompida, a circulação de fluidos na torre foi desligada e a válvula de controle de nível foi mantida fechada para que o processo prosseguisse no turno seguinte.

A inicialização das operações era monitorada pelo operador líder do turno da noite na sala de controle. Às 5h, ele atualizou rapidamente o outro operador e seu supervisor sobre as atividades e saiu mais cedo, 1h antes do fim do expediente. O funcionário do turno da manhã chegou em torno das 6h, começando seu trigésimo dia seguido de 12h de trabalho. Em seguida, falou rapidamente com o operador que finalizava seu turno e leu os registros, onde não havia muitos detalhes acerca da inicialização. Lá havia apenas uma frase “*ISOM: Brought in some raff to unit, to pack raff with*” ou, em português, “ISOM: adicionei refinado na unidade, completar refinado”.

Às 7h15, o supervisor do turno diurno chegou e, como ele estava 1h atrasado, não recebeu informação formal da equipe da noite sobre as condições da unidade de isomeração. Às 9h51, a alimentação voltou a circular e mais refinado foi adicionado à torre que já estava preenchida além dos limites preestabelecidos. A altura do líquido deveria ser regulada com a válvula de controle de nível. No entanto, o computador da sala de controle indicava erroneamente que havia um fluxo de saída aproximadamente cinco vezes menor do que o de entrada, assim, essa válvula permaneceu por horas fechada. Era costume dos funcionários manter um nível alto de líquido durante a partida, isso porque, depois que o mesmo começasse a circular, esse nível iria cair. Essa prática era realizada com o intuito de evitar que essa queda danificasse a tubulação da fornalha devido ao superaquecimento.

Em seguida, os operadores acenderam os queimadores da fornalha para preaquecer o líquido de alimentação e que também serviam como refervedores da torre, sem saberem que o nível real de líquido da torre continuava a subir. Enquanto esse processo acontecia, o supervisor deixou seu posto de trabalho mais cedo, às 10h47, devido a uma emergência familiar. No entanto, contrariando os procedimentos da empresa, nenhum outro supervisor experiente o substituiu. Como consequência, um único operador ficou responsável por operar três unidades da refinaria, incluindo a de isomeração, que demandava maior atenção, sem um líder qualificado.

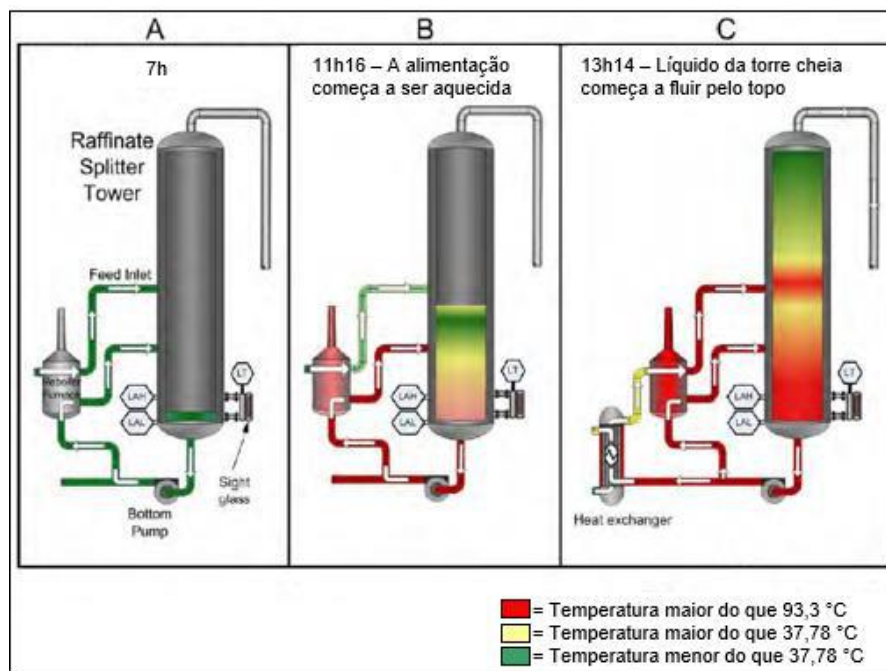
Pouco antes de 12h, a inicialização continuava e a alimentação seguia, fazendo com que a altura de líquido dentro da torre fracionadora chegasse a 30 m, quinze vezes o valor recomendado. Entretanto, o transmissor de nível mostrava aos operadores que o mesmo estava em 2,6 m e diminuindo gradualmente. Além disso,

na mesma tela do monitor da sala de controle não eram mostradas a entrada e a saída de líquidos e a quantidade de refinado na torre não era calculada.

Às 12h41, a pressão da torre subiu até 228 kPa devido à compressão do nitrogênio remanescente no sistema da torre pelo aumento significativo do nível de líquido. Os operadores acreditavam que a fonte da alta pressão era devido ao superaquecimento do fundo da torre, que já havia acontecido em outras inicializações. Assim, os funcionários abriram a válvula manual, que liberava o conteúdo do topo da torre para o sistema de purga. Além disso, eles também desligaram dois queimadores para reduzir a temperatura da torre, acreditando que isso diminuiria a pressão.

Com a variação da pressão, os funcionários, preocupados com a falta de corrente de saída de líquido, abriram a válvula de controle de nível para enviar refinado pesado aos tanques de armazenamento. Nesse momento, segundo as investigações da CSB, ninguém sabia que o equipamento estava perigosamente cheio e o transmissor ainda indicava que o nível de líquido estava caindo. Como essa corrente estava muito quente, ao fluir pelo trocador de calor, a temperatura da alimentação da torre aumentou em aproximadamente 60,6 °C. Um esquema em que pode-se notar o aquecimento das correntes de entrada e de saída da torre é mostrado na Figura 29.

Figura 29 - Condições da torre em três momentos

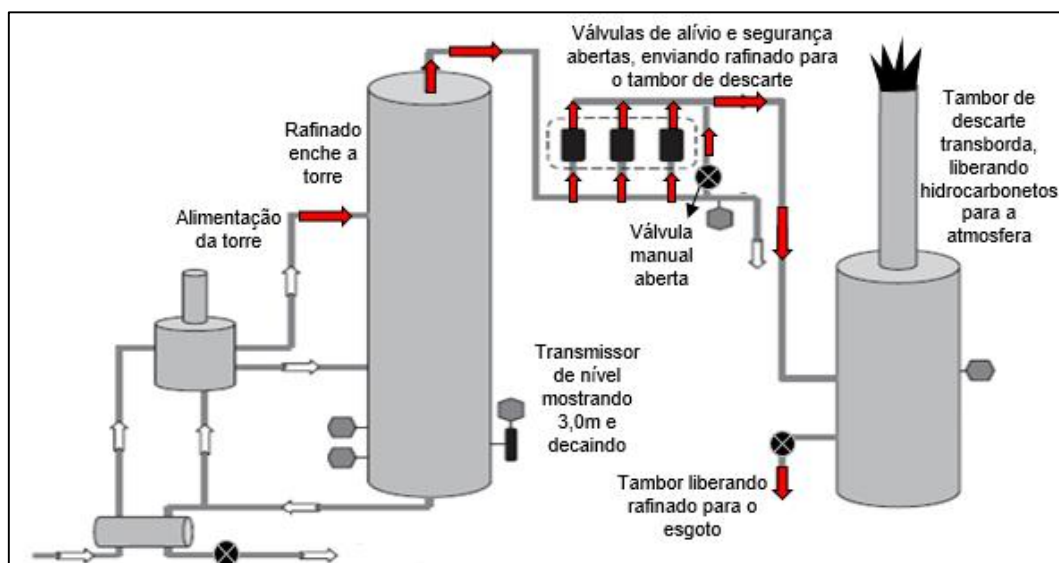


Fonte: CSB, 2007 (Adaptado)

Em torno das 13h, os técnicos que trabalhavam na unidade de ultracraqueamento retornaram do almoço e se reuniram em um dos escritórios nos trailers. Nos minutos seguintes, a alimentação quente fez o líquido ferver, preenchendo a torre e transbordando pela tubulação de vapor, exercendo pressão nas válvulas de alívio. Às 13h14, as três válvulas abriram-se, enviando 196.500 L de líquido inflamável ao sistema de purga e descarte, do outro lado da unidade (Figura 29). O fluido preencheu o tambor de purga e vazou no esgoto de processo, disparando alarmes na sala de controle. No entanto, o alarme de nível alto no tambor de purga não disparou.

Quando os hidrocarbonetos encheram o tambor de purga, os operadores viram líquido e vapor serem liberados do topo da chaminé para a atmosfera (Figura 30). O volume de 28.000 L caiu sobre o terreno e uma enorme nuvem de gás inflamável começou a se formar e espalhou-se rapidamente, envolvendo a unidade e os trailers.

Figura 30 - Fluxo de fluidos até o transbordamento pela chaminé



Fonte: Abbasi S. et al, 2020 (Adaptado)

A cerca de 7 m do tambor de purga, havia dois trabalhadores em um veículo com o motor ligado. Ao entrar na admissão de ar, o vapor fez o motor acelerar. Os dois homens saíram da caminhonete sem conseguir desligar o motor. Em seguida, o escapamento estourou, fazendo a ignição da nuvem de gás. Enormes explosões varreram a área, causando destruição maciça e incêndios por toda a região.

Os incêndios continuaram queimando por horas. Quinze funcionários contratados que estavam nos trailers ou próximos a eles morreram. O total de 180 funcionários foram feridos, 66 deles de forma grave. A maioria destes sofreu queimaduras graves, fraturas e ferimentos traumáticos. Os trailers de madeira e metal foram destruídos pela explosão. Cinquenta tanques de armazenamento foram danificados. Nas imagens 31 e 32 é possível observar a área queimada após os incêndios e as setas vermelhas apontam para o tambor de descarte.

Figura 31 - Planta da Refinaria BP após os incêndios



Fonte: CSB, 2007

Figura 32 - Trailers destruídos após a explosão



Fonte: CSB, 2007

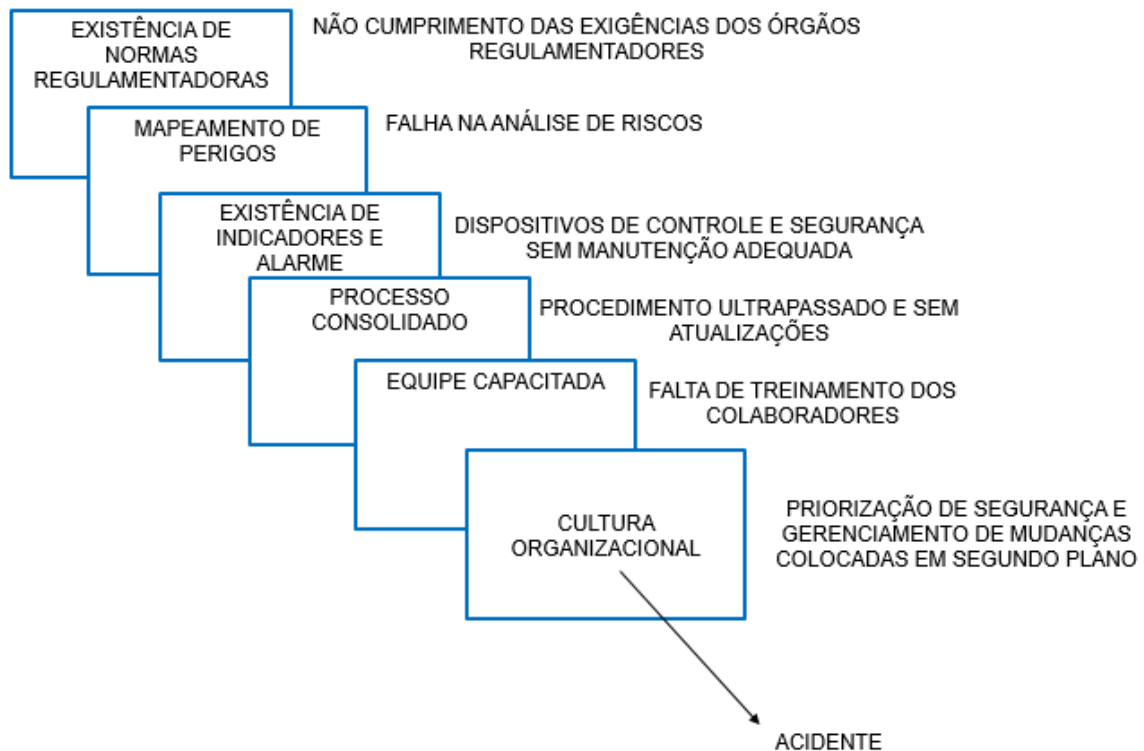
A área total queimada foi estimada em aproximadamente 18.581 m² e, segundo a CSB, a maior parte da dispersão de vapores foi causada pela evaporação direta antes da ignição. Além disso, o hidrocarboneto líquido escorrendo pela chaminé e pelo tambor de descarte juntamente com o impacto da queda do líquido sobre os equipamentos e componentes do processo também promoveu a fragmentação em gotículas relativamente pequenas. Isso fez com que a taxa de evaporação aumentasse e, assim, estimulou a formação da nuvem de vapor inflamável.

O vento também ajudou a empurrar os vapores e pequenas gotas para baixo, causando a sua mistura com o ar. Porções da nuvem de vapor também subiram e foram levadas pelo vento, fazendo com que os trailers ficassem dentro da área coberta pela nuvem inflamável. Após o acidente, a unidade de isomeração ficou fechada por mais de dois anos.

4.4 ANÁLISE DOS FATORES HUMANOS NO ACIDENTE DA REFINARIA DA BP

Assim como na explosão ocorrida na Sterigenics, é possível aplicar o modelo “Queijo Suíço” de Reason ao acidente na refinaria da BP na Cidade do Texas. A Figura 33 mostra as barreiras e as deficiências em cada uma delas, que contribuíram para a ocorrência da tragédia.

Figura 33 - Representação da trajetória do acidente na refinaria da BP utilizando o modelo “Queijo Suíço”



Fonte: Elaboração da autora, 2022

É notório que algumas das barreiras preventivas da explosão na refinaria são as mesmas levantadas no acidente ocorrido na empresa Sterigenics. Elas são: existência de normas regulamentadoras, mapeamento de perigos, processo consolidado, equipe capacitada e cultura organizacional. No entanto, as deficiências em cada uma não foram todas iguais.

4.4.1 Existência de normas regulamentadoras

Segundo as investigações da CSB, dois órgãos regulamentadores eram responsáveis por inspecionar e definir normas para a indústria petroquímica, a OSHA e o API. Anos antes do acidente, em 1992, a OSHA publicou o padrão PSM com catorze diretrizes para o gerenciamento de riscos de processo para produtos altamente perigosos. O método de verificação e de aplicação das normas seria a *Program Quality Verification* (PQV) ou, em tradução livre, Programa de Inspeção de

Qualidade, uma auditoria extensa e complexa realizada por inspetores capacitados da OSHA que levaria semanas ou meses para ser feita.

O PQV requeria inspeções minuciosas de locais com histórico de acidentes ou com indicações de riscos catastróficos, motivadas por estatísticas de acidentes pessoais. Embora a refinaria da BP tivesse um histórico de acidentes fatais, não houve nenhuma inspeção desse programa de segurança de processos na planta da Cidade do Texas. A OSHA realizou apenas inspeções pequenas e não planejadas, que não apontaram falhas graves na gestão de segurança.

Ainda em 1992, a OSHA realizou inspeções na refinaria devido a vazamentos de um tambor de purga similar ao da Cidade do Texas em outra unidade de processo. No final da análise, a Amoco, dona da planta à época, foi intimada por conta da liberação de gases sem pré-tratamento adequado diretamente para a atmosfera, causada por esse equipamento. No entanto, essa advertência foi retirada após a empresa garantir que seguiria padrões do API.

Nesse tópico, os acidentes industriais estudados apresentam aspectos diferentes. Enquanto que a planta da Sterigenics não tinha normas específicas sobre o tratamento de emissões de óxido de etileno, a refinaria tinha passado por auditorias externas e recebido intimações com mudanças a serem realizadas. No entanto, como as modificações exigidas por lei não foram cumpridas, nem acompanhadas pelos órgãos regulamentadores, essa barreira preventiva ainda apresentava diversas falhas estruturais. Caso as normas de segurança determinadas tivessem sido plenamente implementadas, é provável que o acidente não tivesse acontecido. Além disso, após uma auditoria é necessário monitorar se os pontos de atenção levantados foram de fato corrigidos, caso contrário, o perigo ainda existe.

4.4.2 Mapeamento de perigos

A investigação feita pela CSB apontou que a análise de perigos feita na planta da BP era ineficiente, principalmente no mapeamento de riscos de incêndio e de explosão. Alguns exemplos que mostram essa deficiência são:

1. A análise de riscos realizada não continha os perigos relacionados ao nível e pressão altos na torre de refinado, que fazem com que as válvulas de alívio sejam pressurizadas. Além disso, as consequências de um nível alto no tambor de purga e de um transbordo de líquido desse equipamento também não tinham sido identificadas;
2. Taxas elevadas de aquecimento e saídas bloqueadas não foram mapeadas como causas possíveis de pressão alta;
3. As dimensões do tambor de purga e de descarte para contenção de uma liberação de líquido da unidade de isomeração não foram avaliadas. As defesas listadas para proteção contra o perigo de transbordo desse equipamento, como a bomba de vapor e o alarme de nível alto, não foram suficientes para proteger contra os perigos. Além disso, não foram feitas recomendações de fornecimento de proteções adicionais pela equipe realizadora da análise de riscos;
4. Os incidentes anteriores com potencial catastrófico não foram abordados e lições aprendidas não foram implementadas. A análise inicial de perigos e riscos foi concluída em 1993 e duas revalidações foram realizadas, em 1998 e em 2003. Nenhuma dessas revisões abordou os incidentes envolvendo o tambor de purga ocorridos em 1994 e em 1999.

Essa falha no mapeamento de perigos também pôde ser notada na explosão na Sterigenics. O programa de análise de perigos na planta de Ontario falhou na identificação dos perigos associados a uma corrente com concentração acima do limite inferior de explosividade de óxido de etileno chegar ao queimador. Além disso, essa deficiência foi observada também na explosão no laboratório do museu The Discovery, em que os perigos associados à utilização de químicos inflamáveis não foram levantados, apesar dos mesmos serem usados nas práticas apresentadas ao público. Sem que esses perigos sejam identificados e mapeados, a empresa não é capaz de criar estratégias a fim de mitigar os riscos à organização.

4.4.3 Existência de indicadores e alarmes

A importância dessa barreira preventiva está relacionada às informações que os indicadores e alarmes podem oferecer aos funcionários que trabalham na planta. No caso do acidente da BP, as decisões do operador na sala de controle foram baseadas em instrumentos mal calibrados na torre fracionadora de refinado. Um exemplo é o indicador de nível de líquido desse equipamento, que apontava que o mesmo estava decaindo quando, na verdade, estava aumentando. Ademais, o alarme de nível alto também apresentou falhas, uma vez que não foi ativado mesmo com a altura do líquido ultrapassando o limite. A falta de manutenção nesses dois dispositivos e as falhas concomitantes fizeram com que o operador em questão não pudesse saber as condições reais do processo. (CSB, 2007)

A deficiência no sistema de gestão da integridade mecânica dos equipamentos também foi um fator contribuinte para o evento descrito. Seguindo o exemplo, o visor de vidro que foi projetado para permitir uma verificação visual do nível de líquido da torre fracionadora estava sujo, o que impossibilitava essa checagem. Caso ele estivesse limpo, seria possível observar que o nível de líquido subia continuamente. Associado aos problemas nos dispositivos, o operador da sala de controle não tinha como fazer essa medição de forma correta. (CSB, 2007)

Segundo as investigações feitas pela CSB, as falhas nos instrumentos associados à torre fracionadora de refinado e ao tambor de purga e descarte contribuíram diretamente para o acidente. O padrão PSM publicado pela OSHA traz a integridade mecânica como um de seus elementos e o seu objetivo é o de assegurar que os equipamentos do processo, incluindo a instrumentação, funcionem corretamente. A ideia é que ações proativas sejam tomadas em vez de esperar que paradas não programadas, ou seja, quebras, ocorram. No entanto, o programa de integridade mecânica da BP falhou em assegurar que as deficiências previamente observadas nos equipamentos e instrumentos da unidade de isomeração fossem reparadas antes do acidente.

Já em relação à Sterigenics, a empresa não tinha um sistema de monitoramento de gás nas câmaras nem sistemas de controle de concentração de

óxido de etileno na instalação. Instrumentos que conseguem realizar leituras das condições de processo, como nível de líquido, com acurácia são críticos durante a operação. Isso porque eles propiciam ao funcionário uma forma de monitorar e de detectar qualquer irregularidade no processo. Nesse tópico pode-se notar a importância de não só haver tais dispositivos, mas também a de existir uma manutenção adequada dos mesmos.

4.4.4 Processo consolidado

Essa barreira preventiva está relacionada à existência e ao cumprimento dos procedimentos de operação e havia uma série de condições latentes que contribuíram para o acidente. Os investigadores da CSB constataram que esses documentos estavam ultrapassados, que as alterações nos mesmos não passavam por uma análise de riscos e que havia um estímulo à realização de desvios. Dessa forma, o ato inseguro mais observado nessa barreira são as violações rotineiras, em que o descumprimento das regras tornou-se comum.

Os procedimentos de operação não refletiam o trabalho que era realmente feito na refinaria. Isso porque os gestores não asseguravam que os problemas operacionais fossem corrigidos, levando a um desvio dos procedimentos estabelecidos. Dados históricos datando de cinco anos antes do acidente mostram que a torre fracionadora era preenchida acima dos limites e havia variações grandes de nível na maioria das partidas da planta. Além disso, a válvula de controle de nível que deveria permanecer em automático era deixada no modo manual e os *set-points* dos alarmes eram frequentemente excedidos. Os registros também indicaram que colocar mais líquido do que o limite na torre fracionadora era uma prática comum porque os operadores acreditavam que um nível baixo danificaria o queimador, mas desconheciam os riscos da manutenção de níveis altos.

Essas informações estavam disponíveis para os gerentes, no entanto, não houve uma revisão efetiva dos registros e nem uma intervenção com o objetivo de prevenir desvios futuros, mas sim uma tolerância aos mesmos. As falhas operacionais deveriam ter sido corrigidas e os procedimentos atualizados após uma análise de

riscos eficiente para mapeamento dos perigos que as alterações poderiam causar, isso faz parte de um gerenciamento de mudanças efetivo. Ademais, a revisão desses documentos reforça aos funcionários a importância de seguir as instruções escritas.

As falhas na gestão dos procedimentos e na correção dos problemas operacionais encorajavam esses desvios, uma vez que os funcionários se acostumaram a não depender desses documentos para operar a planta. Segundo a CSB, quando as condições reais de operação não são descritas nos procedimentos formais, os funcionários frequentemente desenvolvem práticas de trabalho diferentes das documentadas. Nesse cenário, esses colaboradores se baseiam no próprio julgamento para decidir quais ações eram necessárias e quais não eram e, eventualmente, esses desvios poderiam causar um acidente.

Os desvios realizados nos procedimentos de operação eram feitos sem uma análise de possíveis perigos dessas modificações. A gerência da refinaria permitia que operadores e supervisores alterassem, editassem, adicionassem e removessem etapas dos procedimentos sem mapear os riscos relacionados às modificações e sem um gerenciamento de mudanças. Além disso, era permitido que esses funcionários escrevessem “não aplicável” (N/A) para qualquer etapa e continuar a inicialização utilizando métodos alternativos. Esse cenário contribuiu para um ambiente de trabalho perigoso, no qual procedimentos não foram seguidos nem vistos como instruções a serem respeitadas.

Diferente da refinaria da BP, a empresa Sterigenics possuía um procedimento de operação atualizado, mas que não foi seguido pelos funcionários devido à falta de conhecimento da importância de cada etapa do processo. Essa deficiência fez com que uma decisão equivocada ocorresse e isso foi crucial para a explosão de óxido de etileno.

Já em relação à explosão ocorrida no museu The Discovery, nota-se a existência de algumas condições latentes presentes também na refinaria. Além do procedimento escrito não conter todas as instruções para a prática experimental, havia deficiências no conhecimento dos funcionários que faziam as apresentações ao público. Ademais, assim como na refinaria, desvios às instruções escritas eram comuns e havia uma tolerância a desvios.

4.4.5 Equipe capacitada

Sabe-se que funcionários novos, ao serem admitidos, devem passar por uma série de treinamentos que forneçam informações e instruções suficientes para que o trabalho seja feito da forma correta. No caso da refinaria, uma série de deficiências no programa de qualificação foi observada, como falta de um treinamento completo, que trouxesse todo o conhecimento necessário, e falta de uma avaliação de performance. Além disso, também foram feitos cortes de gastos associados ao departamento responsável pelo aprendizado e desenvolvimento.

Segundo a CSB, o treinamento de gestão de situações anormais era insuficiente. Boa parte do programa de capacitação consistia em instruções sobre tarefas rotineiras e era feito no local de trabalho, assim, para rever os procedimentos de partida e de desligamento do processo, o *trainee* teria que ter seu treinamento agendado no horário dessas operações. Além disso, também havia tutoriais computadorizados, que forneciam poucas informações, como qual alarme correspondia a cada parte do equipamento ou instrumento. Nenhum dos dois tipos de treinamento oferecia o conhecimento de segurança de processos e de gestão de situações fora do normal necessário para controlar processos de alta periculosidade. É notório que essa deficiência prejudicou os operadores, que, pela falta de entendimento do processo, não foram capazes de lidar com o cenário adverso.

O curso para os operadores da sala de controle não trazia a discussão dos perigos associados a encher a torre além dos limites e nem sobre o que fazer caso isso ocorresse. O treinamento também não incluía instruções específicas sobre a importância de calcular o balanço material e nem como fazê-lo. Esse cálculo é feito a partir das correntes de entrada e de saída de um determinado equipamento, no caso, a torre de fracionamento. A partir dele é possível analisar como as vazões influenciam na altura de nível da torre com o tempo, que é o termo de acúmulo da equação. O operador da manhã não sabia como realizar essa análise.

Havia problemas também relacionados à supervisão, que não foi efetiva durante a partida da unidade de isomeração. Como descrito, o supervisor responsável por acompanhar o processo saiu mais cedo da refinaria por conta de uma emergência

familiar. No entanto, nenhum funcionário com experiência foi designado para acompanhar o processo com o operador na sala de controle e a única pessoa disponível para oferecer suporte não tinha conhecimento técnico da unidade. Falhas na supervisão imediata ou no monitoramento de um indivíduo aumentam a probabilidade de um ato inseguro ocorrer. (MORIARTY, 2015)

Deficiências no treinamento foram fatores contribuintes também no acidente ocorrido na empresa Sterigenics, cujo programa de capacitação não tinha uma frequência suficiente tal que os funcionários se mantivessem atualizados sobre os procedimentos. Ademais, essa deficiência implica diretamente na supervisão insegura, visto que o supervisor responsável por tomar a decisão de pular uma etapa chave do processo não tinha sido treinado o suficiente para compreender os perigos relacionados a essa ação. A falta de conhecimento também foi observada no acidente ocorrido no museu The Discovery, cujos funcionários não conheciam os riscos relacionados à manipulação dos compostos inflamáveis utilizados nas práticas laboratoriais.

4.4.6 Cultura organizacional

Analisando a cultura organizacional, nota-se que o acidente tem causas relacionadas à cultura da refinaria da BP, em que a segurança de processos e o *Management of Change* (MOC) - em português, gerenciamento de mudanças - eram colocados em segundo plano. Isso se reflete na série de infrações a normas e em todas as deficiências nas barreiras.

Apesar de ser importante e de ser uma estratégia de gestão de segurança de processos, a refinaria da BP não possuía uma cultura de reporte e de aprendizado com a experiência. Comunicar notícias ruins não era encorajado e não havia um ambiente de confiança para compartilhá-las. Em 2005, ano em que a tragédia ocorreu, o gerente de manutenção da planta compartilhou internamente que a empresa estava longe de alcançar uma cultura de aprendizado. Além disso, a gestão da planta na Cidade do Texas não tinha o hábito de investigar acidentes de forma apropriada ou de realizar ações corretivas satisfatórias. Lições aprendidas não eram implementadas

a partir de eventos que aconteciam em outras sedes. Cinco anos antes da tragédia houve três acidentes graves, incluindo um grande incêndio, em outra planta da BP, em Grangemouth, na Escócia. Os problemas apontados pelas investigações feitas à época foram observados também no acidente na Cidade do Texas.

O interesse do grupo BP não era o de controlar riscos de grandes perigos nem na segurança de processos, cujos indicadores eram negligenciados. (CSB, 2007) Por outro lado, os gerentes da planta da Cidade do Texas procuravam reduzir os índices de acidentes pessoais, tais como tropeços e quedas e era fornecida ênfase à segurança pessoal, que era notada, medida e recompensada. Ademais, os gestores, tanto locais como globais, não implementavam supervisão, recursos humanos e econômicos adequados e também não acompanhavam a aderência a regras e procedimentos de segurança.

Em relação ao gerenciamento de mudanças, a política da refinaria exigia que o MOC fosse realizado em algumas situações. Dentre elas, pode-se citar: mudanças em equipamentos, nos procedimentos de operação, nos limites de operação seguros, no quadro de funcionários e na estrutura da organização. No entanto, diversas alterações realizadas na planta não foram revisadas a fim de manter uma margem de segurança. (CSB, 2007)

Havia várias aplicações incorretas da política MOC da refinaria em relação ao tambor de purga e descarte e à torre fracionadora. (CSB, 2007) Além disso, diversas alterações na organização, que poderiam impactar de forma adversa a segurança de processos, geralmente não eram avaliados. Como exemplo, tem-se as mudanças na estrutura da diretoria, os cortes orçamentários e a diminuição do quadro de funcionários, que geralmente não eram avaliados.

Sobre os desvios a essas normas, pode-se citar as alterações realizadas durante as partidas da unidade de isomeração e a localização dos trailers ao lado da unidade de isomeração, que não estava de acordo com a política MOC e não foi autorizada. Ademais, também foram feitas mudanças no tambor de purga e descarte, sem que o gerenciamento das mesmas fosse feito, apesar desse equipamento ser designado pela refinaria como crítico para a segurança.

Deficiências na barreira preventiva relacionadas à cultura organizacional também foram observadas na planta de Ontario, como as permissões de acessos indevidas e o compartilhamento de senhas. Ademais, o museu The Discovery também não tinha uma cultura forte de segurança química, um exemplo é a inexistência de uma análise de riscos e perigos efetiva, apesar de reagentes inflamáveis serem utilizados nas demonstrações. Em vez disso, o foco era voltado para as apresentações ao público, que deveriam ser convidativas, e não nas práticas utilizadas para manuseio das substâncias.

4.4.7 Fadiga dos funcionários

As investigações feitas pela CSB também apontaram a jornada de trabalho longa do operador da sala de controle como um fator humano que contribuiu com o acidente. Esse funcionário da unidade de isomeração realizou turnos de 12 horas por pelo menos 29 dias seguidos antes da explosão. Dessa forma, é provável que esse colaborador sofresse de fadiga, incluindo perda de sono e déficit acumulado de mais de 43 horas de sono.

Segundo Bendak e Rashid (2020), quando o funcionário está com fadiga, a sua atenção e performance diminuem e, de modo geral, a resolução de problemas se torna mais lenta e as habilidades psicomotoras pioram. Além disso, deficiências na performance devido a fadiga são mais prováveis de acontecer em tarefas que exigem atenção contínua, especialmente em longas durações. Outras consequências da fadiga são a demanda maior de esforço para a realização de multitarefas e de atividades já realizadas normalmente pelo funcionário e as falhas na atenção, raciocínio e de integrar informações. (BENDAK; RASHID, 2020) A partida da unidade de isomeração era um processo longo e que demandava atenção por horas e o cansaço pode ter levado o operador a não perceber o que se passava na unidade.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do presente trabalho possibilitou uma análise dos fatores humanos e de como os mesmos influenciam em acidentes dentro e fora da indústria química. Esse tema é muito extenso, complexo e pode-se ter diferentes abordagens para analisar essa influência na segurança de processos.

Os estudos de caso mostraram que há similaridades nos fatores humanos contribuintes nos dois acidentes industriais abordados e no ocorrido no museu The Discovery. A falta de procedimentos consolidados e eficientes, de uma análise de riscos eficaz que de fato mapeasse os perigos associados às atividades laborais e problemas na capacitação de pessoal foram peças chaves para os eventos descritos. Nota-se que alguns dos erros se repetem e que, em algumas das barreiras preventivas, houve falhas diferentes. Como as barreiras de segurança podem ter mais de uma deficiência, essas diferenças podem ocorrer.

Como foi ilustrado por meio do modelo “Queijo Suíço” proposto por Reason, há diversas barreiras defensivas antes da atuação direta de um funcionário. A trajetória do dano nos três acidentes poderia ter sido interrompida antes de chegar nos colaboradores. Além disso, em nenhum dos acidentes listados foi constatado que uma pessoa errou com o objetivo de causar um dano ou agiu por negligência. Na verdade, o que se observa é uma série de circunstâncias e condições latentes que estiveram alinhadas de forma que possibilitaram a ocorrência dos eventos. A partir dos relatórios de investigação, nota-se que as deficiências nas barreiras preventivas, que poderiam ter sido mapeadas previamente, foram alguns dos fatores humanos contribuintes para os ocorridos.

Em relação aos procedimentos de operação, observou-se tanto falhas ativas como condições latentes referentes a fatores humanos nos acidentes estudados. Sobre atos inseguros, na empresa Sterigenics havia procedimentos com as instruções necessárias para a realização das atividades, mas os mesmos não foram seguidos. Na refinaria da BP e no museu The Discovery, não seguir os procedimentos era uma prática comum, violações rotineiras eram realizadas e havia uma tolerância a esses tipos de desvio. Já em relação às condições latentes, nas três organizações havia

problemas no programa de treinamento. Além disso, no caso da refinaria e do museu, esses documentos não continham todas as instruções necessárias.

A cultura da organização é importante para que a segurança de processos seja efetiva, visto que pode incentivar e/ou desmotivar certos comportamentos e, nos três acidentes estudados, nota-se a inexistência de uma cultura forte de segurança. Nesse contexto, o papel da liderança é indispensável. Mais eficiente do que ensinar com treinamentos e capacitações formais é ensinar com o exemplo, é agir com conformidade às normas. Dessa forma, os funcionários percebem que o que se ensina é o que se pratica, então se a segurança de processos for valorizada pelos níveis hierárquicos mais altos, os demais funcionários podem ser influenciados a agir da mesma forma. Além disso, o papel dos órgãos regulamentadores é essencial não só para a criação das normas, mas também para a realização de auditorias que verifiquem se as mesmas estão sendo cumpridas.

Estudar e analisar acidentes passados é válido para que o aprendizado a partir dos erros cometidos aconteça. A implementação das lições aprendidas é importante para que as mesmas falhas não se repitam e para, caso ocorram, a instalação tenha barreiras mitigadoras eficazes de forma a evitar danos maiores. Ademais, fazer simulações de eventos disruptivos é interessante para treinar e preparar os funcionários em casos de emergência. Isso somado a existência de procedimentos atualizados que contenham todas as informações importantes, faz com que os processos sejam cada vez mais robustos, com menos erros.

É notório que a segurança de processos é um pilar essencial para manter um ambiente de trabalho saudável na organização e para assegurar condições básicas para os funcionários e para os processos. Nos estudos de caso abordados da empresa Sterigenics, da Refinaria da BP e do museu The Discovery, focar e priorizar esse pilar teria sido menos custoso do que lidar com as consequências dos acidentes. Ademais, é importante também incentivar a melhoria contínua, uma vez que, além de aumentar a performance e a produtividade, ela permite encontrar falhas nos processos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASI, Soheil *et al.* BP Texas Refinery Incident Causes: A Literature Review. **International Journal Of Occupational Hygiene**. [S. L.], p. 256-270. 30 set. 2020. Disponível em: <https://ijoh.tums.ac.ir/index.php/ijoh/article/view/452>. Acesso em: 01 nov. 2021.

AIR CRASH DISASTERS. Tenerife air disaster: Aviation's most deadly crash. Direção de Phil Desjardins. Canada: Discovery Channel, 2016. 1 vídeo (45min 10seg). Publicado pelo canal Channel ferochhas. Disponível em: https://youtu.be/W98AZ6x5j_M. Acesso em: 11 de jul. 2021.

AIR LIQUIDE BRASIL LTDA. **Ficha de informação de produto químico – FISPQ**. Óxido de Etileno. 2019. Disponível em: https://industrial.airliquide.com.br/sites/industry_br/files/sds/2019/05/07/23046_oxido_de_etileno75-21-8.pdf. Acesso em: 25 mai. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14725-2**: Produtos químicos — Informações sobre segurança, saúde e meio ambiente Parte 2: Sistema de classificação de perigo. 1 ed. Rio de Janeiro, 2009. 98 p. Disponível em: http://www2.iq.usp.br/pos-graduacao/images/documentos/seg_2_2013/nbr147252.pdf. Acesso em: 03 jul. 2021.

BAHIA, Antonio Fernando Noceti. **GERENCIA DE RISCO INDUSTRIAL - UM ESTUDO "EX-POST" SOBRE O ACIDENTE EM BHOPAL, INDIA**. 2006. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Economia, Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2006. Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/3634/1/Dissertacao_VERSAO%20FINAL_Antonio%20Fernando%20Noceti%20Bahia.pdf. Acesso em: 07 nov. 2021.

BENDAK, Salaheddine; RASHID, Hamad S.J.. Fatigue in aviation: A systematic review of the literature. **International Journal Of Industrial Ergonomics**. [S.L.], mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2020.102928>. Acesso em: 03 jan. 2022.

CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY. **Guidelines for Risk Based Process Safety**. Nova Jersey: Wiley-Interscience, 2007.

CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY. **Risk Based Process Safety Overview**. New York: CCPS, 2014. Disponível em: https://www.aiche.org/sites/default/files/docs/embedded-pdf/risk_based_process_safety_overview.pdf. Acesso em: 10 set. 2021.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (São Paulo). **Análise de risco tecnológico: Seveso. c2022**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/analise-risco-tecnologico/grandes-acidentes/seveso/>. Acesso em: 06 jan. 2022.

CORREA, Cármen Regina Pereira; CARDOSO JUNIOR, Moacyr Machado. Análise e classificação dos fatores humanos nos acidentes industriais. **Produção**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 186-198, 23 ago. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-65132007000100013>. Acesso em: 10 jun. 2021.

CORRIERE DELLA SERA (Itália). **37 anni fa, la nube tossica a Desio e Seveso**. 2013. Disponível em: https://www.corriere.it/cronache/foto/07-2013/seveso/ambiente/37-anni-fa-nube-tossica-desio-seveso_910a2bec-e8d4-11e2-ae02-fcb7f9464d39.shtml#1. Acesso em: 17 jan. 2022.

DE SOUZA, J. T.; SOUZA, J. A. A ferramenta bow-tie no gerenciamento de riscos em projetos. **Revista E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial - ISSN - 1983-1838**, [S. l.], v. 14, n. 1, 2021. Disponível em: <https://etech.emnuvens.com.br/edicao01/article/view/1071>. Acesso em: 20 dez. 2021.

FEDERAÇÃO NACIONAL DOS PETROLEIROS (Rio de Janeiro). **BHOPAL 84: maior crime industrial da história**: 36 anos de crime industrial na Índia. 3 de dezembro também é o dia mundial de combate aos agrotóxicos. 2020. Disponível em: <http://www.fnpetroleiros.org.br/noticias/6336/bhopal-84-maior-crime-industrial-da-historia>. Acesso em: 06 jan. 2022.

FIRSTPOST. **'We demand our rights': 30 years after disaster, Bhopal still waiting for justice**. 2014. Disponível em: <https://www.firstpost.com/india/demand->

rights-30-years-disaster-bhopal-still-waiting-justice-1831797.html. Acesso em: 08 jan. 2022.

KELLY, Damien; EFTHYMIOU, Marina. An analysis of human factors in fifty controlled flight into terrain aviation accidents from 2007 to 2017. **Journal Of Safety Research**. [S. L.], p. 155-165. jun. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2019.03.009>. Acesso em: 10 jan. 2022.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. 1998. Portaria interministerial nº 482. 1999 Disponível em: http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/1999/pri0482_16_04_1999.html. Acesso em: 25 mai. 2021.

MOREIRA, Alinne dos Santos. **PRÁTICAS DE GESTÃO ORIENTADAS PARA A MELHORIA DA SEGURANÇA DE PROCESSOS NA ATIVIDADE DE CONSTRUÇÃO DE POÇOS MARÍTIMOS DE UMA EMPRESA PETROLÍFERA BRASILEIRA: UMA PROPOSTA**. 2017. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Sistemas de Gestão, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/5466>. Acesso em: 10 set. 2021.

MORIARTY, David. *Practical Human Factors for Pilots*. [S.l.]: Academic Press, 2015. 280 p.

PERLINGEIRO, Carlos Augusto G.. *Engenharia de Processos: análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos*. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

REASON, James. *Human Error*. New York: Cambridge University Press, 1990.

SOUSA, Giovanni Tavares de. **AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DA ESTERILIZAÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS EXPOSTOS AO ÓXIDO DE ETILENO**. 2010. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de M Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/riufcg/4112/GIOVANNI%20TAVARES%20DE%20SOUSA%20%e2%80%93%20DISSERTA%c3%87%c3%83O%20%28PPG-CEMat%29%202010.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 25 mai. 2021.

UNION CARBIDE CORPORATION. **Bhopal Gas Tragedy Information**. Disponível em: <http://www.bhopal.com/>. Acesso em: 08 jan. 2022.

U.S. CHEMICAL SAFETY AND HAZARD INVESTIGATION BOARD. **Investigation Report REFINERY EXPLOSION AND FIRE (15 Killed, 180 Injured)**. 2007.

Disponível em: <https://www.csb.gov/bp-america-refinery-explosion/>. Acesso em: 11 de jul. 2021.

U.S. CHEMICAL SAFETY AND HAZARD INVESTIGATION BOARD. (2008). CSB Safety Video: Anatomy of a Disaster. 1 vídeo (55min 33seg). Publicado pelo canal USCSB. Disponível em: https://youtu.be/XuJtdQOU_Z4. Acesso em: 11 de jul. 2021.

U.S. CHEMICAL SAFETY AND HAZARD INVESTIGATION BOARD. (2007). CSB Safety Video: Explosion at BP Refinery. 1 vídeo (5min 56seg). Publicado pelo canal USCSB. Disponível em: <https://youtu.be/c9JY3eT4cdM>. Acesso em: 11 de jul. 2021.

U.S. CHEMICAL SAFETY AND HAZARD INVESTIGATION BOARD. **Investigation Report Sterigenics (4 employees injured)**. 2006. Disponível em:

<https://www.csb.gov/sterigenics-ethylene-oxide-explosion/>. Acesso em: Acesso em: 24 abr. 2021.

U.S. CHEMICAL SAFETY AND HAZARD INVESTIGATION BOARD. **Key Lessons for Preventing Incidents from Flammable Chemicals in Educational Demonstrations**. 2014. Disponível em: <https://www.csb.gov/key-lessons-for-preventing-incidents-from-flammable-chemicals-in-educational-demonstrations/>.

Acesso em: 11 de jan. 2022.

U.S. CHEMICAL SAFETY AND HAZARD INVESTIGATION BOARD. **Texas Tech University Laboratory Explosion**. 2011. Disponível em: <https://www.csb.gov/texas-tech-university-chemistry-lab-explosion/>. Acesso em: Acesso em: 08 jan. 2022.

WIKIPEDIA. **Ficheiro:Ethylene-oxide-2D.png**. 2006. Disponível em:

<https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Ethylene-oxide-2D.png>. Acesso em: 15 jan. 2022.

Workshop RSE - 1º Workshop Conhecendo Segurança de Processo. Workshop apresentado por Rafaela Raimundi. Bahia, RSE, 08/03/2021.