



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
ESCOLA DE QUÍMICA

# **INSERÇÃO DE FATORES HUMANOS EM ANÁLISE BOW TIE**

FELIPE BARBOSA DE SOUZA E SILVA  
RAQUEL TEIXEIRA FORTES DE ARAUJO

Monografia em Engenharia Química

**Orientador**

Prof. Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

Novembro de 2022

**INSERÇÃO DE FATORES HUMANOS EM  
ANÁLISE BOW TIE**

***Felipe Barbosa de Souza e Silva***

***Raquel Teixeira Fortes de Araujo***

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

Aprovado por:

---

Helton Luiz Santana Oliveira, D.Sc.

---

Kese Pontes Freitas Alberton, D.Sc.

Orientado por:

---

Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Novembro de 2022

Silva, Felipe Barbosa de Souza e.

Araujo, Raquel Teixeira Fortes de.

Inserção de fatores humanos em análise Bow Tie/ Felipe Barbosa de Souza e Silva, Raquel Teixeira Fortes de Araujo. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2022

vii, 93 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**

Aos meus pais, agradeço por tamanho suporte e confiança no meu potencial, mesmo quando eu não mais acreditava ser possível seguir – a compreensão, paciência e calma de vocês foi um alicerce para que tudo fluísse mais leve e tranquilo e que o final dessa graduação fosse uma realidade palpável.

Ao meu fiel companheiro e também coautor deste trabalho, Felipe, agradeço por tudo que fez (e faz), garantindo que, principalmente, nos momentos mais difíceis, eu continue em frente e confiante, sempre com os pés no chão e ciente da qualidade pessoal e profissional que tenho e venho aperfeiçoando constantemente.

Aos meus amigos: Analú Brum, Caroline Alves, Isabela Cavalcanti, Karen Wajnszok, Larissa Ferreirinha, Leonardo Santos e tantos outros responsáveis por momentos únicos, de gargalhadas descontraídas e momentos memoráveis, que ficarão eternizados na memória e guardados no coração.

Por fim, ao professor e orientador Carlos André que, desde o terceiro período de UFRJ (e primeiro em Engenharia Química) sabia que eu o escolheria para esse tão sonhado momento. Obrigada pela paciência e suporte desde então.

*Raquel Teixeira Fortes de Araujo*

Agradeço aos meus pais por sempre buscarem o melhor para mim, mesmo que em alguns momentos eu não conseguisse enxergar. Obrigado por todo o tempo que se dedicaram à minha criação e todo o investimento feito para que hoje eu pudesse estar onde estou. A excelente estrutura familiar que eles me proporcionaram foi fundamental para que eu alcançasse meus objetivos.

Aos amigos que fiz na universidade, que tornaram essa fase da minha vida muito mais agradável com a ótima convivência que tivemos juntos. Agradeço por todos os momentos que estudamos e compartilhamos os aprendizados uns com os outros. Tenho consciência que o caminho teria sido mais difícil sem eles.

Agradeço à Raquel, coautora deste trabalho, que está sempre ao meu lado apoiando as minhas decisões e me inspira a continuar alçando vãos maiores. Ela é a minha principal motivação para continuar seguindo esse caminho.

Ao nosso professor e orientador Carlos André, que desde o primeiro contato foi muito empático e participativo na elaboração deste trabalho. Seus ensinamentos, instruções e comentários foram fundamentais para o esclarecimento das ideias na nossa mente e desenvolvimento de um trabalho de qualidade.

Dedico esse trabalho ao meu irmão Daniel, que é meu fiel amigo e faz de tudo para me ver bem.

*Felipe Barbosa de Souza e Silva*

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

## **INSERÇÃO DE FATORES HUMANOS EM ANÁLISE BOW TIE**

Felipe Barbosa de Souza e Silva

Raquel Teixeira Fortes de Araujo

Novembro, 2022

Orientador: Prof. Carlos André Vaz Junior

Ao longo da evolução do tema “Segurança” nas empresas, indústrias e universidades, especialistas identificaram que a avaliação dos fatores humanos é essencial para prover processos cada vez mais seguros. Visando a melhoria contínua dos processos, considerar o comportamento humano na elaboração e desenvolvimento de um sistema de segurança é fundamental para a sua robustez, uma vez que possibilita o gerenciamento de riscos mais eficaz, integrando os processos industriais às ações humanas. Neste trabalho, foi feito um estudo de caso de um acidente industrial, a partir do relatório de investigação, utilizando a ferramenta *Bow Tie* para analisar o sistema de segurança vigente na unidade na época do acidente, identificando possíveis falhas e oportunidades de melhoria. O foco do trabalho foi entender como os fatores humanos se relacionavam com as inconsistências identificadas no cenário do evento e, a partir disso, desenvolver uma proposta de alterações no sistema de segurança usando *Bow Tie*, considerando os fatores humanos identificados no processo em questão, com o objetivo de torná-lo mais seguro para os trabalhadores e comunidade vizinha. O acidente estudado se trata de um vazamento agudo de fosgênio ocorrido em uma fábrica da empresa Dupont, West Virginia, 2010. O fosgênio é um gás tóxico à temperatura ambiente, e três funcionários foram expostos a níveis críticos do composto. Algumas condições do sistema de segurança não estavam adequadas, ocasionando o acidente que resultou em uma fatalidade.

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

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>2 METODOLOGIA DE BOW TIE.....</b>	<b>11</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	11
2.2 BARREIRAS NO BOW TIE.....	14
<b>2.2.1 Barreiras preventivas .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.2 Barreiras mitigadoras .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.3 Barreiras com interação humana.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.4 Degradação das barreiras.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.5 Fatores e controles de degradação .....</b>	<b>19</b>
<b>3 FATORES HUMANOS EM BOW TIE.....</b>	<b>20</b>
3.1 DEFINIÇÃO DE FATORES HUMANOS .....	20
3.2 FATORES HUMANOS E A SEGURANÇA DE PROCESSOS .....	21
3.3 FATORES HUMANOS EM UMA PLANTA QUÍMICA .....	24
3.4 FALHA HUMANA.....	27
3.5 CULTURA DE SEGURANÇA.....	30
3.6 FATORES HUMANOS EM BOW TIE .....	32
<b>4 ESTUDO DE CASO: VAZAMENTO DE FOSGÊNIO EM PLANTA DA EMPRESA DUPONT.....</b>	<b>39</b>
4.1 INTRODUÇÃO AO ACIDENTE.....	39
4.2 O COMPOSTO FOSGÊNIO E SUAS CARACTERÍSTICAS .....	40
4.3 DESCRIÇÃO DO ACIDENTE .....	41
4.4 ANÁLISE DOS FATORES CONTRIBUINTES.....	48
<b>4.4.1 Mangueiras de Teflon ®.....</b>	<b>48</b>
<b>4.4.2 Sistema SAP .....</b>	<b>50</b>
<b>4.4.3 Equipamento de Proteção Individual (EPI).....</b>	<b>51</b>
<b>4.4.4 Incidente anterior com fosgênio .....</b>	<b>52</b>
<b>4.4.5 Planejamento de trabalhos não-rotineiros .....</b>	<b>55</b>
<b>4.4.6 Galpão de Fosgênio.....</b>	<b>56</b>
<b>4.4.7 Alarmes.....</b>	<b>58</b>
<b>4.4.8 Comitê Guardião de Material Altamente Tóxico de Fosgênio.....</b>	<b>59</b>
<b>4.4.9 Análise de Risco.....</b>	<b>61</b>

<b>4.4.10 Gestão do conhecimento .....</b>	<b>62</b>
<b>5 APLICAÇÃO DE BOW TIE PARA A UNIDADE SLM DA PLANTA DE BELLE DA DUPONT .....</b>	<b>64</b>
5.1 CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA BOW TIE PARA A UNIDADE .....	64
5.2 AVALIAÇÃO DO BOW TIE DESENVOLVIDO .....	73
5.3 FATORES HUMANOS E O BOWTIE DA UNIDADE SLM .....	75
5.4 PROPOSTA DE MELHORIAS NO SISTEMA DE SEGURANÇA DA UNIDADE SLM .....	77
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>81</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>85</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A realidade industrial observada hoje é resultado de consecutivas evoluções tecnológicas, a começar pela Primeira Revolução Industrial, iniciada na Inglaterra, durante os séculos XVIII e XIX, onde o trabalho braçal começou a ser substituído por máquinas, com o objetivo de aumentar a produtividade, impactando diretamente no rendimento da produção, o que mudou completamente o funcionamento da indústria desde então. Seguindo o mesmo caminho, os meios de transporte também sofreram avanços importantes com a descoberta do potencial energético proveniente da queima do carvão, surgindo então as locomotivas a vapor, auxiliando no transporte e otimizando a distribuição do produto final. Porém, é de se imaginar que, com esse avanço, a classe operária seria diretamente afetada, uma vez que sua força de trabalho estava sendo substituída por máquinas, reduzindo o quadro de funcionários das fábricas. Além disso, a falta de segurança dos trabalhadores era evidente, tendo em vista a quantidade de acidentes que sofriam, muitas vezes irreversíveis, sendo o mais comum perderem seus dedos nas máquinas (TURK, 2020).

Com a expansão das indústrias ao redor do mundo, o que caracterizou a Segunda Revolução Industrial, os principais recursos estavam voltados para a produção de petróleo, aço e eletricidade. Ademais, no início do século XX, depois de quase um século de reivindicações dos operários que sofriam com as condições precárias de trabalho que lhes eram impostas, além da falta de segurança, foi criada a Organização Internacional do Trabalho (OIT) com o objetivo de normatizar regras trabalhistas, podendo, a partir de então, garantir e recomendar aos países que melhores condições de trabalho fossem ofertadas para a classe operária. Ao fim da Segunda Guerra Mundial, observou-se um grande desenvolvimento e avanço do setor industrial com a associação da tecnologia ao processo produtivo, bem como o avanço tecno-científico e, a partir desse período pós-guerra que surge, então, a Terceira Revolução Industrial, também conhecida como Revolução Tecno científica (FREITAS, et al., 2020).

Em síntese, a primeira revolução industrial foi marcada pelo uso do vapor proveniente da queima do carvão como fonte de energia principal. Já na segunda fase

da revolução industrial, as fontes de energia eram o petróleo e a eletricidade. Na terceira revolução surgem as fontes de energia renováveis, como por exemplo a energia eólica, sendo esta uma alternativa menos nociva ao meio ambiente para a produção de energia elétrica, ainda mais quando comparada com a queima de carvão da primeira fase. Além disso, a terceira fase da revolução industrial também foi marcada pelo avanço do acesso às informações através da internet, aprimorando a comunicação e melhorando o alcance destas ao redor do mundo. Simultaneamente surge o Toyotismo, ou "*Just in Time*", um modo de produção "*on demand*", onde a produção caminha de acordo com a demanda do mercado, o que impactou diretamente a quantidade de funcionários necessários para determinada produção - trabalhando com um quadro de funcionários mais enxuto, eleva-se o lucro da produção. Um dos setores de maior destaque nesta terceira fase da revolução industrial foi o setor terciário, composto pelos autônomos e prestadores de serviços que, com a redução do quadro de funcionários e implementação da tecnologia nas empresas, precisavam se enquadrar no perfil de profissionais multitarefas. Além disso, essa fase foi primordial no que tange os avanços tecnológicos, impactando diretamente a cadeia produtiva, onde a automação promoveu maior eficiência no controle de qualidade - característica que, na primeira revolução industrial, sequer existia - graças a robótica e softwares de controle, proporcionando também, um incremento na capacidade de produção. Com isso as empresas se tornaram mais conscientes quanto à segurança de seus colaboradores, bem como quanto ao cuidado ao meio ambiente, conferindo a inovação tecnológica ao bem-estar dos funcionários (FREITAS, et al., 2020).

Contudo, ao passo que riscos de acidentes e o desenvolvimento industrial podem ser associados, os primeiros precisam ser administrados e, prioritariamente, reduzidos, com o objetivo de evitar sua ocorrência. Para isso, é necessário entender o conceito de risco.

Para o CCPS, o risco está relacionado a "uma medida de dano humano, ambiental ou perda econômica tanto em termos da probabilidade de acidentes quanto da magnitude do dano ou perda. Uma versão simplificada desta relação expressa o risco como sendo o produto da frequência e da consequência de um acidente (i.e.,  $\text{Risco} = \text{Frequência} \times \text{Consequência}$ ). Por exemplo, a frequência pode ser expressa

como "eventos/ano" e a consequência como "impacto/evento" (F = 1 liberação/ano; C = 1 fatalidade/libertação; com R = 1 fatalidade/ano para o cenário de liberação)."

Segundo a CETESB, risco "é definido como a combinação entre a frequência de ocorrência de um acidente e a sua consequência. A adequada composição destes fatores possibilita estimar o risco (de um empreendimento), sendo o estudo de análise de risco a ferramenta utilizada para esse fim".

O INEA apresenta o conceito de risco como sendo o "conjunto dos danos e perdas que possam vir a ocorrer por causa dos perigos existentes (associado a um sistema, atividade ou organização)."

Pela ISO 31000:2018, "o risco é definido como o "efeito da incerteza sobre os objetivos", que se concentra no efeito do conhecimento incompleto dos eventos ou circunstâncias sobre a tomada de decisão de uma organização."

Com o avanço tecnológico, maiores complexidades, dimensões e capacidades foram surgindo nas cadeias produtivas industriais, impulsionando, também, a dimensão e a proporção que acidentes industriais podem alcançar. E, é em razão de tal magnitude que um acidente industrial pode chegar que a atenção e os cuidados voltados à segurança de processos devem ser intensificados e priorizados, uma vez que as consequências advindas de tais eventos podem ser catastróficas, envolvendo não só o ambiente e pessoas próximas, mas como, também, toda uma comunidade local ao redor de uma determinada instalação industrial. Dado isso, ferramentas foram criadas e desenvolvidas, além de serem constantemente aprimoradas, para contribuir na prevenção de tais eventos, a exemplo, a metodologia "*Bow Tie*", integrante do HEMP (*Hazard, Effect and Management Process*), elaborada pelo Grupo Shell em 1999 (SEQUEIRA, 2010).

No capítulo dois é introduzido o conceito da metodologia *Bow Tie*, bem como sua relevância e a representação de barreiras, tanto de prevenção quanto mitigadoras.

No capítulo três é feita uma análise dos fatores humanos e como eles estão relacionados com a metodologia *Bow Tie*, afetando na qualidade e gestão de planejamento em segurança de processos.

O capítulo quatro é abordado o estudo de caso do acidente com vazamento de fosgênio, ocorrido na planta da empresa Dupont localizada em Belle, West Virginia, em 2010. Nesse tópico, é descrita a cronologia de como o acidente ocorreu, bem como alguns dos pontos-chaves em que se pode identificar influência dos fatores humanos no desencadear do cenário catastrófico.

A aplicação do *Bow Tie* é tratada no capítulo cinco, onde é feita uma análise e construção do diagrama para a unidade SLM da planta da Dupont, bem como a avaliação dos fatores humanos na análise *Bow Tie* e a proposta de um modelo mais robusto e completo, de acordo com os pontos levantados.

Para concluir, finalmente, o capítulo 6 apresenta as considerações finais do caso analisado, bem como suas conclusões, trazendo também as vantagens e limitações percebidas no modelo de diagrama *Bow Tie*.

## 2 METODOLOGIA DE BOW TIE

### 2.1 INTRODUÇÃO

A metodologia *Bow Tie* é uma representação gráfica simples e estruturada para análise de cenários catastróficos, onde a empresa identifica os cenários de risco inaceitável e, também, de risco aceitável onde a severidade seja catastrófica, capazes de causar danos irreversíveis à empresa ou à comunidade. Nessa metodologia são mapeadas as principais causas, consequências, barreiras de prevenção, barreiras mitigadoras, fatores e controles de degradação (CCPS, 2018).

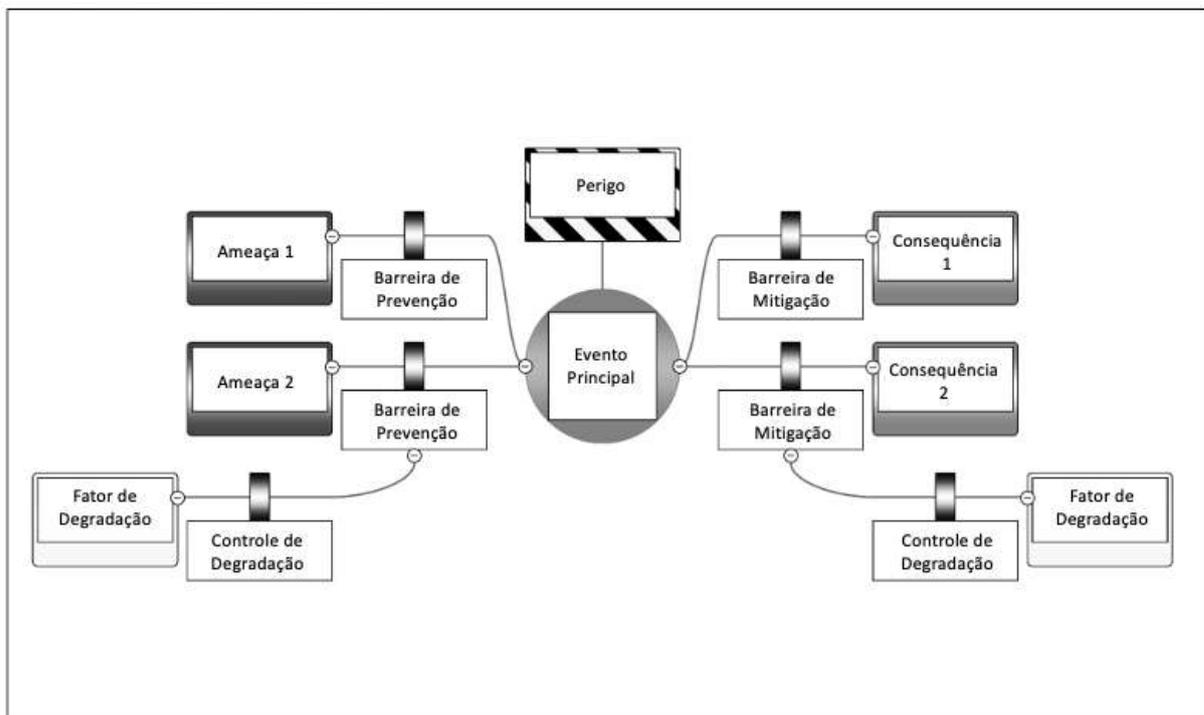
O objetivo principal da metodologia é esquematizar eventos de severidade catastrófica de uma forma simples e compreensível para que diferentes níveis de usuários entendam como o acidente pode ser evitado ou mitigado, e o que a organização deve controlar para garantir a eficácia do sistema de segurança vigente. É possível utilizar a metodologia também para eventos com severidades menores, porém não é uma prática comum, de acordo com CCPS (2018), visto que a criação, atualização e comunicação do *Bow Tie* demanda estudo e esforços constantes. Na prática, em um ambiente industrial, é humanamente impossível tratar todos os cenários acidentais com *Bow Tie*. A metodologia não foi criada com esse intuito e apresenta melhores resultados se utilizada focando somente em riscos de cenários catastróficos. O nome “*bow-tie*” faz referência a gravata borboleta, pois o diagrama final possui uma estrutura visualmente similar.

É importante mencionar que a metodologia *Bow Tie* não é tipicamente utilizada para identificar os riscos dos processos – ele pode ser usado para estimar frequências, mas é uma prática pouco comum – e, por isso, deve ser utilizada em associação com outras metodologias de segurança de processo. Um exemplo dessa interação seria o uso da metodologia HAZOP para identificação de cenários de falha e o uso do método LOPA (Análise das Camadas de Proteção) para avaliar quais são as barreiras para esses cenários e como elas se relacionam entre si (CCPS, 2018).

Um diagrama *Bow Tie* é composto dos elementos listados abaixo, ilustrados na Figura 1, de forma esquemática:

1. Perigo: início do diagrama;
2. Evento Principal: o acidente catastrófico que pode acontecer caso perca-se o controle do perigo;
3. Ameaças: fatores que podem gerar o evento;
4. Consequências: impactos causados pelo evento;
5. Barreiras de prevenção: como as causas são tratadas para redução da probabilidade de ocorrência;
6. Barreiras de mitigação: como os impactos da ocorrência do evento são controlados ou reduzidos;
7. Fatores de degradação: fatores que degradam cada barreira de prevenção ou mitigação, podendo resultar em falha;
8. Controles de degradação: o que é feito para mitigar os fatores de degradação e manter as barreiras operando de maneira consistente.

Figura 1 – Representação do diagrama *Bow Tie*

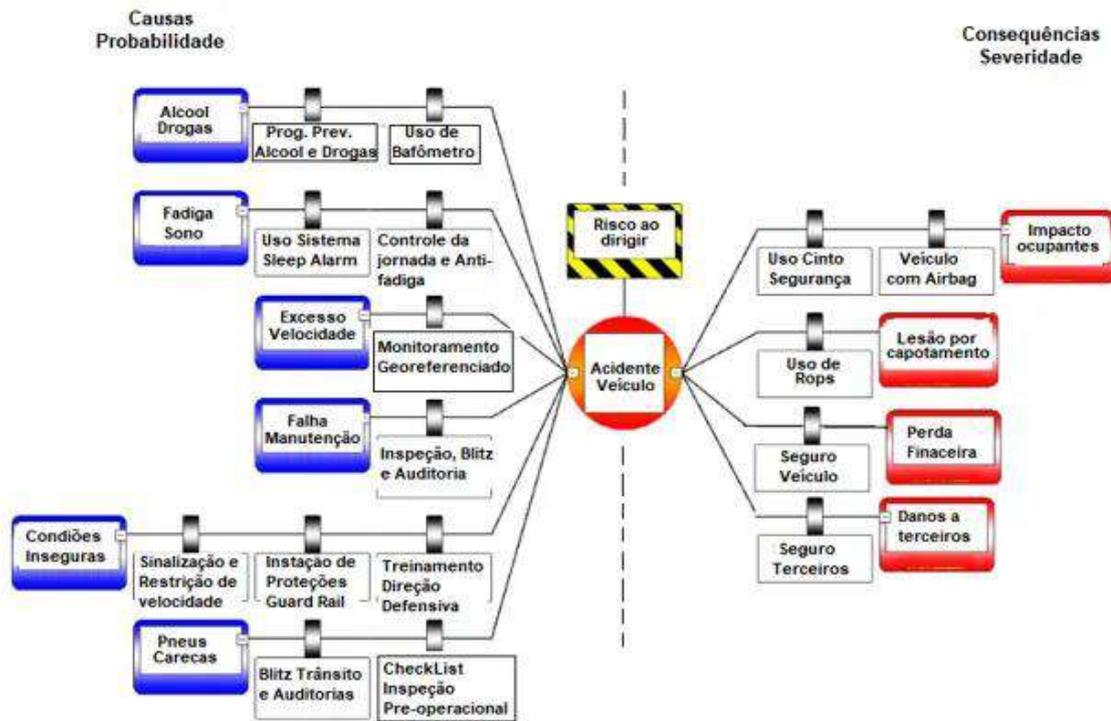


Fonte: CCPS, 2018 (Adaptado)

Esse diagrama é um *Bow Tie* padrão e representa o cenário acidental e seus fatores. A sua simplicidade está diretamente associada ao objetivo da metodologia de apresentar as interações entre causas e consequências de um evento que saiu do controle de uma forma que seja compreensível por não especialistas (CCPS, 2018).

Com as informações organizadas de forma estruturada, o diagrama *Bow Tie* pode ser usado para mostrar o papel de cada elemento na prevenção/mitigação do acidente e conscientizar as pessoas da importância de manter cada barreira operando em perfeito estado. É possível também utilizá-lo para análises de priorização de atividades. Pensando de forma corporativa, após todo o mapeamento das barreiras e controles de degradação, deve-se criar um plano de gerenciamento desses elementos com o objetivo de garantir seu perfeito funcionamento. Para isso, é fundamental que o *Bow Tie* seja construído com qualidade e por profissionais especializados, pois um diagrama desenvolvido de forma falha pode trazer uma falsa impressão de segurança. De acordo com a CCPS (2018), um diagrama *Bow Tie* é uma excelente ferramenta de comunicação de como os perigos de acidentes são controlados. A Figura 2 apresenta um exemplo prático do diagrama aplicado, onde Barbosa (2018) considera o evento principal como sendo "acidente veicular" e o perigo como "risco ao dirigir". Além disso, Barbosa propôs 6 ameaças, como por exemplo "fadiga/sono" e "excesso de velocidade", e 4 consequências foram destacadas: "impacto ocupantes", "lesão por capotamento", "perda financeira" e "danos a terceiros". No cenário de "fadiga/sono", por exemplo, ele propôs as seguintes barreiras preventivas: "uso do sistema *sleep alarm*" e "controle da jornada e anti-fadiga". Já no caso do cenário de "excesso de velocidade", "monitoramento georreferenciado" foi a barreira preventiva sugerida. Para a consequência "impacto ocupantes", Barbosa considerou duas barreiras mitigadoras: "uso de cinto de segurança" e "veículo com *Airbag*". Para a consequência "lesão por capotamento", "uso de ROPS" (onde ROPS é a sigla em inglês para *Roll Over Protective Structure*, ou seja, Estrutura Protetora Contra Capotamento) foi a barreira mitigadora escolhida.

Figura 2 – Exemplo do diagrama *Bow Tie* para acidente veicular considerado como evento principal



Fonte: Barbosa, 2018.

## 2.2 BARREIRAS NO BOW TIE

Na metodologia *Bow Tie*, barreiras são fatores que reduzem a probabilidade de um evento não desejado ocorrer, ou reduzem o impacto que haverá no caso da ocorrência. Por isso, as barreiras são divididas em preventivas e mitigadoras. As barreiras preventivas são ilustradas no lado esquerdo do diagrama *Bow Tie* e representam os fatores de redução de probabilidade da ocorrência do incidente. Elas atuam nas causas dos acidentes. Já as barreiras mitigadoras se situam no lado direito do diagrama *Bow Tie* e representam os fatores de redução do impacto que será gerado em caso de acidente, atuando diretamente nas consequências do evento. Usando como exemplo a Figura 2, onde o perigo é “risco ao dirigir” e o evento principal “acidente veicular”, a barreira “inspeção, blitz e auditoria” atua prevenindo o acidente e por isso está localizada no lado esquerdo do diagrama, enquanto o “uso de cinto de

segurança” só seria eficiente após a ocorrência do evento principal, e por isso aparece no lado direito.

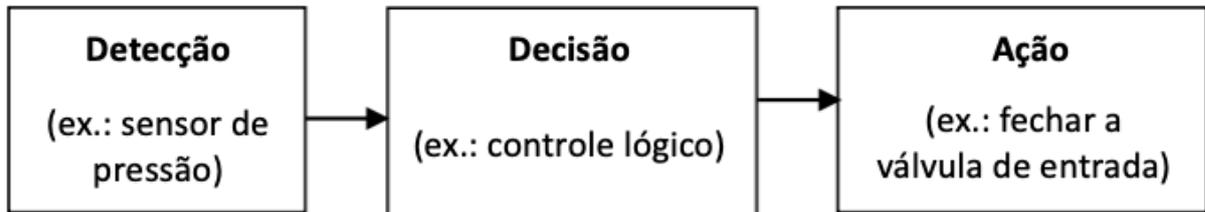
Independente se é preventiva ou mitigadora, as barreiras devem atender aos seguintes requisitos (CCPS, 2018):

- a. Ser eficaz: deve ser desenvolvida de forma que opere consistentemente, não apresente falhas quando demandada e atinja o resultado esperado. Em outras palavras, a sua operação deve ser extremamente confiável;
- b. Ser independente: não deve possuir interligação direta com outras barreiras ou ameaças. A eficácia da sua operação não pode depender de outras barreiras ou da ameaça;
- c. Ser auditável: deve ser possível testar a barreira de forma segura para validar se sua operação está conforme. As empresas devem possuir planos de gerenciamento dessas barreiras e frequentemente auditá-las para verificar o seu estado de operação.

Diretamente associados às barreiras, são representados no diagrama os fatores de degradação e os controles de degradação, sendo possível mapear como as barreiras se degradam e o que pode ser feito para reduzir ou evitar essa degradação.

As barreiras podem ser medidas físicas ou não, que atuam na prevenção ou contenção do perigo, e podem ser ativas ou passivas. Barreiras passivas são medidas físicas que reduzem os riscos somente por estarem presentes no ambiente. Exemplos são diques, portas antifogo, guarda-corpo, tinta anticorrosão etc. Já barreiras ativas devem atuar “detectando”, “decidindo” e “agindo”. Na prática, um mecanismo de detecção identifica o estado atual de operação do sistema e uma decisão é tomada. Caso seja identificado que o estado atual está fora dos limites estabelecidos, uma ação diferente é realizada pela barreira (Figura 3) (CCPS, 2018).

Figura 3 – Representação das ações do mecanismo de detecção das barreiras ativas



Fonte: CCPS, 2018 (Adaptado)

De acordo com o CCPS (2018), as barreiras só são assim consideradas se atuarem executando as três ações listadas acima. Por exemplo: um sistema de detecção de gás não é considerado uma barreira se ele só detecta e reporta a situação. A barreira seria o sistema de detecção somado aos outros sistemas que tomam decisão e agem sobre o que foi identificado. Nesse caso, tratar o sistema de detecção de gás individualmente como uma barreira seria um erro. A seguir é apresentado alguns exemplos de sistemas que, individualmente, não são considerados como barreiras no *Bow Tie*, quando implementados sozinhos (CCPS, 2018):

- a. Uma válvula de emergência (responsável por agir) por si só não é uma barreira. Esse sistema precisa identificar quando há uma não conformidade e decidir como atuar;
- b. Um sistema de combate a incêndio precisa de um elemento de detecção para funcionar;
- c. Um sistema de alarme será ineficiente se não estiver conectado a um sistema de resposta e atuação. No caso, para ser considerada uma barreira, deveria ser somada a resposta de um operador, por exemplo.

### 2.2.1 Barreiras preventivas

Como já relatado, uma barreira preventiva (ou de prevenção) é uma barreira que previne a ocorrência do evento principal, e uma característica mandatória é que, em teoria, ela por si só deve ser capaz de preveni-lo. Porém, isso não garante que o

sistema preventivo seja infalível, já que ela pode não operar corretamente, caso esteja degradada de alguma forma. CCPS (2018) aponta que, na indústria, para casos em que o evento principal não é tão nocivo, é comum utilizar barreiras preventivas que reduzem a chance do evento ocorrer, mas não necessariamente tem a capacidade de preveni-lo.

Se tratando de atuação, basicamente há duas maneiras de atuação das barreiras preventivas: prevenindo a ameaça de acontecer de fato, ou prevenindo que uma ameaça, que já está ocorrendo, resultar no evento principal. Essas são as duas formas mais comuns de se pensar na elaboração de medidas preventivas.

Retornando à Figura 2 para exemplificar, a barreira “treinamento em direção defensiva” reduz a probabilidade da ameaça de acontecer pois instrui o condutor a dirigir de forma segura e consciente, respeitando as leis de trânsito. Por outro lado, o “uso de bafômetro” atua prevenindo que a ameaça, que já pode estar ocorrendo, resulte no evento principal. Se o bafômetro identificar um condutor alcoolizado, os fiscais irão impedir que ele volte a dirigir nessas condições.

### **2.2.2 Barreiras mitigadoras**

De acordo com CCPS (2018), posicionadas no lado direito do *Bow Tie*, as barreiras mitigadoras atuam após a ocorrência do evento principal e são responsáveis por reduzir ou prevenir os danos e perdas, assim como retomar o controle da situação. Existem duas maneiras desse tipo de barreira atuar: interrompendo a ocorrência da consequência da perda de controle ou reduzindo a magnitude dos danos. O acionamento de *airbags* em veículos, por exemplo, ajuda a reduzir a magnitude dos danos, enquanto o uso do extintor de incêndio do carro pode interromper o incêndio em um veículo.

### 2.2.3 Barreiras com interação humana

Existem diferentes tipos de sistemas de barreiras utilizados na prática na indústria. Elas podem usar métodos físicos, químicos, tecnológicos, humanos, contínuos etc.

Quando se fala de barreiras que envolvem a atuação humana de alguma forma, existem basicamente dois tipos: barreiras onde há atuação exclusivamente humana e barreiras onde a atuação humana está conectada a algum hardware de alguma forma (CCPS, 2018).

Exemplos: em um avião, um alarme informar aos passageiros da perda de controle da pressão da cabine e os mesmos colocarem as máscaras de oxigênio é uma barreira mitigadora onde há interação entre hardware e decisão humana, enquanto em um cenário de queda, os humanos se posicionarem em seus assentos em posição de impacto é uma barreira onde há atuação humana exclusivamente.

### 2.2.4 Degradação das barreiras

Em qualquer processo onde haja um sistema de segurança em vigor, as barreiras existentes são suscetíveis à degradação. Com o tempo, por diversos motivos, a capacidade de prevenção ou mitigação da maioria das barreiras naturalmente se reduz, podendo chegar a níveis inaceitáveis. Isso ocorre por degradação física, obsolescência, mudança nos processos, mudança de pessoas, mudanças organizacionais etc.

Para garantir a efetividade das barreiras, é mandatório que haja controle e monitoramento ativo sobre elas. A organização é responsável por manter as barreiras totalmente confiáveis e operacionais, para que obtenham sucesso quando forem demandadas. É justamente por isso que a metodologia *Bow Tie* exige um estudo do que pode comprometer e degradar a confiabilidade das barreiras, assim como o que deve ser feito para manter esses níveis de confiabilidade suficientes para sua operação.

### 2.2.5 Fatores e controles de degradação

Baseado na premissa de que as barreiras sofrem degradação ao longo do tempo, a metodologia *Bow Tie* representa em sua estrutura os fatores que comprometem a integridade das barreiras e o que deve ser feito para garantir que as mesmas se mantenham em alto nível de confiabilidade. Para a elaboração de um diagrama robusto, é necessário que haja um estudo técnico das barreiras e como elas se relacionam com o sistema de segurança existente como um todo, com o objetivo de mapear o que impacta negativamente a operação das barreiras, e o que deve ser controlado e feito para que a degradação delas seja reduzida. Esse é o grande objetivo da metodologia *Bow Tie*: mapear o que deve ser controlado para garantir que as barreiras existentes operem com a confiabilidade desejada.

Os fatores de degradação são as condições mapeadas que comprometem a integridade das barreiras, reduzindo a capacidade delas operarem como o planejado. Um exemplo pode ser a corrosão de um equipamento, que pode atrapalhar a sua funcionalidade. Os controles de degradação são as medidas que a organização deve tomar para garantir que os fatores de degradação mapeados não estão sendo afetados pelos fatores de degradação a ponto de comprometer a sua operação. Nesse exemplo, a manutenção preventiva desse equipamento sujeito à corrosão seria um controle de degradação.

### 3 FATORES HUMANOS EM BOW TIE

#### 3.1 DEFINIÇÃO DE FATORES HUMANOS

Quando se trata de gestão de segurança de processos é fundamental que os fatores humanos sejam considerados. A OGP (*International Association of Oil & Gas Producers*), em 2005, definiu “Fatores Humanos” como termo usado para descrever a interação entre indivíduos entre si, com instalações, equipamentos e sistemas de gestão (Figura 4). E essas interações são influenciadas pelo ambiente de trabalho e a cultura das pessoas envolvidas (CROWL, 2007).

Figura 4 – Representação das interações entre indivíduos, instalações, equipamentos e sistemas de gestão.



Fonte: Crowl, 2007 (Adaptado)

Nesse modelo, representado na Figura 4, o conjunto “instalações e equipamentos” está associado ao ambiente físico de trabalho, design dos equipamentos e confiabilidade dos mesmos. O conjunto “pessoas” considera as habilidades individuais, percepções e fatores relacionados à saúde física, saúde mental e fadiga dos trabalhadores. A interação entre os trabalhadores e computadores

é um exemplo onde há união entre os conjuntos “pessoas” e “instalações e equipamentos”. O conjunto “sistema de gestão” contempla o sistema organizacional onde o trabalho é realizado e inclui: treinamentos, procedimentos operacionais, sistemas de segurança de processo, cultura de segurança, cultura organizacional e fatores sociais da comunidade local. Os três conjuntos se sobrepõem com suas relações entre si (CROWL, 2007).

### 3.2 FATORES HUMANOS E A SEGURANÇA DE PROCESSOS

De acordo com Crowl (2007), o homem é capaz de utilizar seu conhecimento prático e científico para a redução da frequência de acidentes. Somado a isso, a consideração dos fatores humanos nas avaliações de processos resulta em aumento da eficiência e confiabilidade dos sistemas de segurança pois reduzem a probabilidade de ocorrência de erro humano, gera aumento de produtividade e reduz o risco de problemas relacionados à ergonomia no trabalho. O sucesso de qualquer organização industrial depende do desempenho dos seres humanos, portanto, é vital que os fatores humanos sejam considerados em seus processos. Além disso, se forem integrados em todo o seu ciclo de vida (planejamento, desenvolvimento, operação, manutenção, descomissionamento) as pessoas inseridas nesse sistema podem atuar de forma proativa quanto a ele, e não simplesmente reagir aos problemas que aparecem com o passar do tempo. Tratar os fatores humanos de forma apropriada e proativa gera excelentes resultados: muitas equipes de gerenciamento de projetos entendem que incorporá-los no início do design da instalação ou equipamento apresenta melhor custo-benefício.

Um exemplo básico de fluxo de consideração dos fatores humanos por uma organização é: a empresa deve considerar os fatores humanos na contratação de seus trabalhadores, avaliando se eles atendem aos requisitos físicos e mentais da respectiva função. Depois, a empresa deve considerar os fatores humanos no momento de projetar ou adquirir os equipamentos que serão usados pelos trabalhadores para execução das atividades. Por último, deve considerar os fatores

humanos na sua própria estrutura organizacional para garantir que esta, bem como o sistema de gestão e a relação entre as equipes colaborem para o bom desempenho de seus trabalhadores.

Considerar os fatores humanos nos processos industriais é uma prática que está diretamente relacionada aos acidentes catastróficos que ocorreram ao longo da história. Algumas organizações ainda tratam essa abordagem de uma forma mais reativa do que proativa. Um diagnóstico previsível em investigações e análises de acidentes com múltiplas fatalidades é que o mesmo foi provocado devido a “falha humana”. Um exemplo disto é o caso da explosão seguida de incêndio em uma planta de PVC (Formosa Plastics, Illinois - EUA, 2004) em que o operador confundiu o número do reator que estava realizando a limpeza e acabou abrindo a válvula de fundo de um outro reator, provocando o escape de cloreto de vinila, químico altamente inflamável, provocando uma enorme explosão que ocasionou a morte de cinco pessoas e deixou três seriamente feridas (CSB, 2007b). Com a repetição de inúmeros casos em que a resposta é sempre a mesma, as organizações começaram a abordar os fatores humanos nos seus sistemas de segurança. Na prática, elas têm utilizado seus casos de incidentes para reavaliar e corrigir situações onde os fatores humanos apresentam deficiência (CARVALHO NETO, 2006).

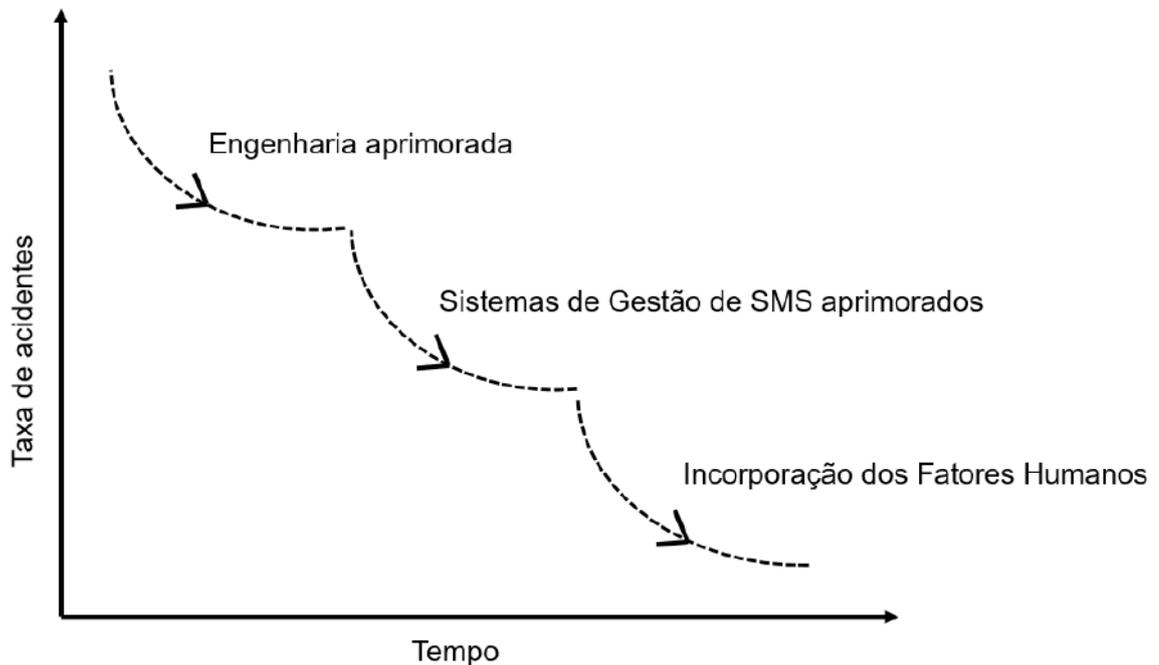
O cenário industrial atual exige aumento de produtividade com redução de incidentes e impactos ambientais. Com o avanço da tecnologia, o desenvolvimento de soluções de engenharia cada vez mais robustas e a criação de sistemas de gestão organizados, é possível observar que a sociedade vem caminhando nessa direção. Porém, visando um cenário de melhoria contínua é mandatório que os fatores humanos sejam gerenciados nas organizações, e recursos sejam disponibilizados a sua aplicação. Com isso, é possível notar os seguintes benefícios: redução de incidentes e acidentes, diminuição da frequência de erro humano e suas consequências, ganho de eficiência, redução de custos e trabalhadores mais produtivos.

Segundo Crowl (2007), com o objetivo de reduzir os índices de acidentes na indústria, o ser humano historicamente dedicou esforços para desenvolver soluções de engenharia mais avançadas, que fossem cada vez mais seguras e que reduzissem a probabilidade de acidentes. Bons resultados foram obtidos, porém a indústria atingiu

um nível de engenharia tão avançado que novas tecnologias não traziam mais diferenças tão significativas como no passado, em termos de redução de acidentes. Nesse momento, as organizações identificaram que boa parte dos acidentes que permaneciam acontecendo estava associada à gestão e cultura da organização: descumprimento de regras, inexistência de procedimentos padronizados, falta de treinamento das equipes, cultura organizacional que focava na produtividade etc. Assim, os especialistas entenderam que o próximo passo para redução das taxas de acidentes deveria ser estabelecer um sistema de gestão da organização robusto, que foque na segurança dos seus trabalhadores e da comunidade local. Dessa forma, a organização como um todo trabalharia em prol da segurança, deixando de ser algo somente considerado na engenharia dos equipamentos.

Excelentes resultados foram atingidos com essa mudança cultural e com o tempo as empresas se adaptaram a essa nova forma de gerenciar seus processos organizacionais, atingindo um nível de estabilidade novamente. Buscando entender as características dos acidentes que continuavam a ocorrer com maior frequência, especialistas entenderam que agora a falha humana no nível dos indivíduos eram as causas mais comuns: cansaço, ergonomia, tarefas repetitivas, distrações, situações novas. Com isso, o foco de melhoria mais recente foi incorporar os fatores humanos na engenharia e nos sistemas de gestão da organização para gerar melhores condições de trabalho para as pessoas e assim reduzir as chances de falha. Esse movimento ao longo do tempo está esquematizado na Figura 5.

Figura 5 – Gráfico ilustrativo da incorporação dos fatores humanos na indústria



Fonte: Crowl, 2007 (Adaptado)

Para exemplificar a Figura 5, a planta de Grangemouth da BP (JOYNER, 2004 apud CROWL, 2007) identificou que a grande maioria de seus incidentes estavam associados à falha humana. Com isso, várias políticas e iniciativas foram implementadas para melhorar os fatores humanos nos níveis do indivíduo, da atividade e da organização. Após três anos, houve um aumento na confiabilidade da planta de 10%, redução de 25% em seus custos (ganho relacionado à produtos fora da especificação e trabalho) e melhoria nos indicadores de segurança em 200%.

### 3.3 FATORES HUMANOS EM UMA PLANTA QUÍMICA

Como já relatado nos capítulos anteriores, é mais vantajoso financeiramente abordar as questões relacionadas aos fatores humanos no início do projeto de construção de uma planta química. Se essas questões foram tratadas em fases posteriores, a complexidade de resolução aumenta, demandando mais tempo, custo e esforço. Particularmente, se o problema for identificado após um acidente, o custo desta tratativa provavelmente será muito mais alto. Exemplo: no desenvolvimento de

um novo sistema de controle, o engenheiro de projeto inseriu diversos sistemas sonoros com a premissa de que, quanto mais alarmes, mais informações o operador receberá e mais seguro será o processo. Porém, na prática, a grande quantidade de alarmes dificulta o operador a identificar e diagnosticar o que não está funcionando adequadamente. Nesse caso, o custo do acidente certamente excederá o custo de esforço proativo para eliminar os alarmes desnecessários.

Apesar da abordagem mais adequada aos fatores humanos ser no início do projeto, é importante também que essa avaliação seja feita continuamente durante a operação e manutenção de uma planta química. É comum que alguns itens não tenham sido identificados no planejamento do projeto, assim como é comum aparecerem novos itens com o passar do tempo, devido ao ambiente industrial ser um ambiente dinâmico.

A seguir, Crowl (2007) provê uma tabela (Tabela 1) das fases nas quais os fatores humanos existem no ciclo de vida de uma planta química e essa tabela pode ser usada como base para a elaboração de um sistema de gestão de segurança de processo que envolva fatores humanos. O ciclo de vida de uma planta química apresenta as quatro etapas abaixo:

1. Design e execução do projeto
2. Operação da planta
3. Manutenção da planta
4. Descomissionamento

Tabela 1 – Fatores humanos no ciclo de vida de uma planta química.

		Design	Operação	Manutenção	Descomissionamento
1	Design de equipamentos do processo	✓	✓	✓	
2	Sistemas de controle de processo	✓	✓		
3	Design do centro de controle	✓	✓		
4	Operações remotas	✓	✓		
5	Design das instalações e estações de trabalho	✓	✓		
6	Interface homem-computador	✓	✓		
7	Portos-seguro	✓	✓		
8	Identificação	✓	✓	✓	✓
9	Treinamento		✓	✓	
10	Comunicação	✓	✓	✓	✓
11	Design e uso da documentação	✓	✓	✓	✓
12	Fatores ambientais	✓	✓	✓	
13	Carga de trabalho e níveis hierárquicos	✓	✓	✓	✓
14	Questões de turnos de trabalho		✓	✓	
15	Manual de manuseio de materiais	✓	✓	✓	✓
16	Cultura de segurança		✓	✓	
17	Segurança comportamental		✓	✓	
18	Planejamento de projeto, design e execução	✓			✓
19	Procedimentos operacionais	✓	✓	✓	✓
20	Manutenção	✓	✓	✓	
21	Práticas de trabalho seguras e sistema de permissão de trabalho	✓	✓	✓	
22	Gestão de mudanças	✓	✓	✓	✓
23	Análise qualitativa de perigos	✓	✓		
24	Avaliação quantitativa de risco	✓	✓		
25	Sistemas de segurança	✓	✓	✓	✓
26	Gerenciamento com competência	✓	✓		✓
27	Preparo e resposta à emergência	✓	✓		
28	Investigação de eventos		✓	✓	

Fonte: Crowl, 2007 (Adaptado)

Na etapa “design de equipamentos do processo”, por exemplo, os fatores humanos devem ser considerados em três das quatro fases da planta. No momento do design do equipamento, os engenheiros devem projetá-lo de forma que seja seguro ao ser humano: ser robusto, não ter partes com movimento expostas, atender as normas legislativas do país, possuir alarmes, possuir redundâncias, botões de emergência etc. Na operação do equipamento, deve-se definir as atividades de forma que sejam seguras e ergonômicas para o trabalhador. Para a manutenção do equipamento, este deve ser viável de ser adentrado pelo trabalhador com segurança: capacidade de desenergizar a máquina, sem partes cortantes expostas, todas as partes de fácil acesso ao manutentor, peças leves, redundância, boa iluminação, facilidade de limpeza etc.

### 3.4 FALHA HUMANA

Historicamente tem sido comum tratar a “falha humana” como causa de acidentes catastróficos pois sempre há alguma interação humana envolvida no evento, seja por erro no design de um equipamento, operação, manutenção, construção etc. A falha humana no final da cadeia pode de fato ser a causa final de um evento, porém normalmente não será a causa raiz visto que muitas camadas de proteção têm que falhar para que o acidente ocorra de fato. Normalmente muitos fatores contribuintes estão atrelados ao evento, não existindo assim uma única causa. O ser humano pode falhar de várias formas e Reason (1990) as dividiu em diferentes tipos: deslizos, lapsos, erros e violações.

De acordo com Reason (1990), tais tipos de falhas são definidos da seguinte maneira:

Deslizos estão relacionados à execução falha de uma ação, onde a pessoa sabe exatamente o que deve fazer, porém por algum motivo cometeu um erro durante a atividade. Um exemplo é um operador cometendo um erro de digitação em um sistema de controle sem perceber, mesmo tendo a intenção de digitar o número correto.

Lapsos são associados à falha de memória. Normalmente acontecem durante a execução de atividades rotineiras onde há perda de concentração por algum motivo e alguma etapa do processo é esquecida. Exemplos: esquecer de apertar um botão.

Erros ocorrem quando a execução é correta, porém o planejamento falha em atingir o seu objetivo inicial (ou por ser inapropriado para a situação, ou a situação mudou e o que foi planejado já não se aplica mais). Um exemplo pode ser a interpretação errada de variáveis de processo levando à tomada de decisões erradas.

Já violações são situações em que o trabalhador, por escolha própria, age em desacordo com as regras e procedimentos organizacionais. Um exemplo pode ser um operador realizando uma atividade de forma diferente da forma descrita no procedimento padrão operacional porque ele julga que o procedimento está desatualizado ou trabalhar da forma descrita no documento é impraticável. É

importante frisar que ele não busca causar danos ou prejudicar a empresa, como é no caso da sabotagem (CROWL, 2007).

Para exemplificar alguns dos casos apresentados, em abril de 2004 ocorreu um acidente na fábrica da Formosa Plastics Corporation, em Illinois, onde um operador teve um lapso e em seguida executou uma violação, que acarretou em um acidente catastrófico com cinco fatalidades. De maneira resumida: o operador deveria abrir duas válvulas do reator 306, que estava sendo lavado com água, para que esta escoasse. Dito isso, ao se direcionar para a base do tanque, o operador se confundiu e executou tal tarefa no reator 310, que continha uma mistura reacional sob alta pressão e temperatura. Esse erro pode ser caracterizado como um lapso, pois o operador conhecia a tarefa e estava ciente do que deveria fazer e como proceder, entretanto, confundiu o local - no caso, o reator - onde ela deveria ser executada, no momento da execução. Quando tentou abrir as válvulas do reator errado, uma delas não abriu pois havia em vigência um sistema de segurança que não permitia que tal válvula fosse aberta automaticamente com o reator pressurizado. Nesse momento, ao invés do operador buscar entender o motivo da válvula não abrir como deveria, ele “bypassou” o sistema de segurança e, por conta própria, abriu a válvula, realizando uma manobra não descrita em procedimento com as mangueiras do equipamento. Com isso, a válvula foi aberta, o conteúdo do reator 310 escoou pelo chão da fábrica, provocando uma explosão após alguns minutos (CSB, 2007b). Considerando que o operador ignorou o sistema de segurança do reator, esse erro foi uma violação. É importante ressaltar que não era objetivo do operador prejudicar a empresa ou seus colegas.

Nota-se que essas falhas não ocorrem ao acaso e normalmente é possível encontrar causas raiz para todos os tipos acima e só assim esses desvios serão tratados. Porém, vale ressaltar que a maioria das tentativas de mudança do comportamento humano é falha, pois assume-se que as pessoas desempenham suas funções no vácuo. Se você inserir um excelente trabalhador em um sistema pobre e falho, o sistema prevalece (IOSH, 2021).

Exemplos de causas para falha humana (IOSH, 2021):

- a. Procedimentos operacionais complexos ou mal definidos, que podem resultar na compreensão errada pelos funcionários, ou tarefas não otimizadas ou busca por atalhos.
- b. Design de equipamento falho, trazendo complexidade às tarefas rotineiras.
- c. Situações novas, não conhecidas ou não usuais, que podem gerar necessidade de improvisação.
- d. Interface de equipamento mal planejada e de difícil compreensão, resultando em dificuldade de interpretação das informações do processo.
- e. Tarefas repetitivas e triviais, gerando fadiga e estresse.
- f. Tarefas onde o tempo para execução é insuficiente, resultando em funcionários executando tarefas com pressa, atenção reduzida, e tendência à busca por atalhos.
- g. Sinais, alarmes ou instruções de difícil compreensão, dificultando a compreensão das informações relevantes do processo.
- h. Ambiente de trabalho agressivo (calor, barulho, iluminação, ventilação, dificuldade de acesso etc.), gerando fadiga, cansaço, estresse, redução na atenção.
- i. Distrações;
- j. Execução de múltiplas tarefas ao mesmo tempo; tirando o foco das atividades.
- k. Alta carga de trabalho, que ao longo do tempo torna os colaboradores cansados e mais tendenciosos a buscar atalhos.
- l. Baixa competência; onde um operador pode não ter as devidas qualidades para execução de determinadas tarefas.

- m. Falta de conhecimento das regras, resultando no descumprimento das mesmas.

### 3.5 CULTURA DE SEGURANÇA

Hoje em dia, grande parte das organizações entendem e reconhecem o valor de desenvolverem uma forte cultura de segurança. A cultura de uma organização influencia drasticamente a maneira com que seus funcionários pensam e se comportam no trabalho, impactando diretamente sobre a ocorrência ou ausência de incidentes. Por conta disso, hoje a cultura de segurança é reconhecida como um elemento significativo relacionado aos fatores humanos.

Muitas investigações de grandes acidentes na indústria concluem que a organização envolvida possuía uma cultura de segurança fraca. A alta competitividade e busca por produtividade nos dias atuais podem resultar em um sistema de segurança falho onde a organização considera a produtividade como o fator mais importante do negócio, mesmo que isso não seja comunicado de forma explícita. Com isso, regras de segurança tendem a ser quebradas no dia a dia da operação, e mais cedo ou mais tarde algum processo crítico de segurança falhará. Em empresas de cultura fraca, é comum encontrar trabalhadores não seguindo os procedimentos e assumindo riscos inapropriados que não cabem a eles assumir. Em março de 2005, houve uma grande catástrofe em uma refinaria da BP, no Texas, com quinze fatalidades e um prejuízo financeiro que excedeu um bilhão e meio de dólares. Esse caso pode ser considerado como um bom exemplo de cultura de segurança insatisfatória. O relatório final da CSB (2007a) concluiu que a empresa negligenciava a segurança das suas instalações, priorizando a redução dos custos de operação, o atendimento ao orçamento estabelecido e tratando a produtividade como foco principal. Com isso, a manutenção preventiva dos equipamentos era básica ou inexistente, o treinamento das equipes era precário e o investimento em melhores condições de segurança era insatisfatório. A refinaria operava suas atividades normalmente, mesmo com diversas condições inseguras já mapeadas pela equipe técnica de segurança. Auditorias e estudos internos acusaram os riscos existentes nas instalações e relataram a necessidade de urgência nas tratativas, porém não

obtiveram sucesso pois a liderança executiva da empresa se mostrava plenamente tolerante às condições inseguras existentes nas instalações da fábrica. Nos trinta anos anteriores à essa catástrofe, 23 fatalidades já haviam ocorrido somente na refinaria do Texas.

O Comitê consultivo do Reino Unido para a Segurança das Instalações Nucleares produziu uma definição de cultura de segurança amplamente aceita e abrangente (HSE, 1999):

“cultura de segurança é o produto de valores individuais e de grupo, atitudes, percepções, competências e padrões de comportamento que determinam o compromisso, o estilo e a proficiência de gestão de HSE (Health, Safety and Environment) de uma organização. Organizações com cultura de segurança positiva são caracterizadas por comunicações fundadas na confiança mútua, por percepções compartilhadas da importância da segurança e pela eficácia das suas medidas preventivas.”

É importante destacar que organizações com forte cultura de segurança costumam ser bem-sucedidas em todos os âmbitos de seu negócio, sendo a segurança o seu pilar fundamental (HSE, 1999).

A seguir, estão listadas algumas características práticas de uma cultura de segurança positiva (CROWL, 2007):

- a) Hardware: Design da planta, condições de trabalho e limpeza adequados e percepção de baixo risco graças à confiança nos sistemas de engenharia;
- b) Sistemas de gestão: Confiança nas regras de segurança, procedimentos e medidas impostos, priorizando a segurança frente à lucro e produtividade, além de dispor de treinamentos satisfatórios, boa comunicação e aprendizado organizacional;
- c) Pessoas: Participação ativa dos funcionários nas questões de segurança, proporcionando maior confiança aos trabalhadores para lidar

com os riscos, bem como o comprometimento efetivo da gestão com o fator segurança;

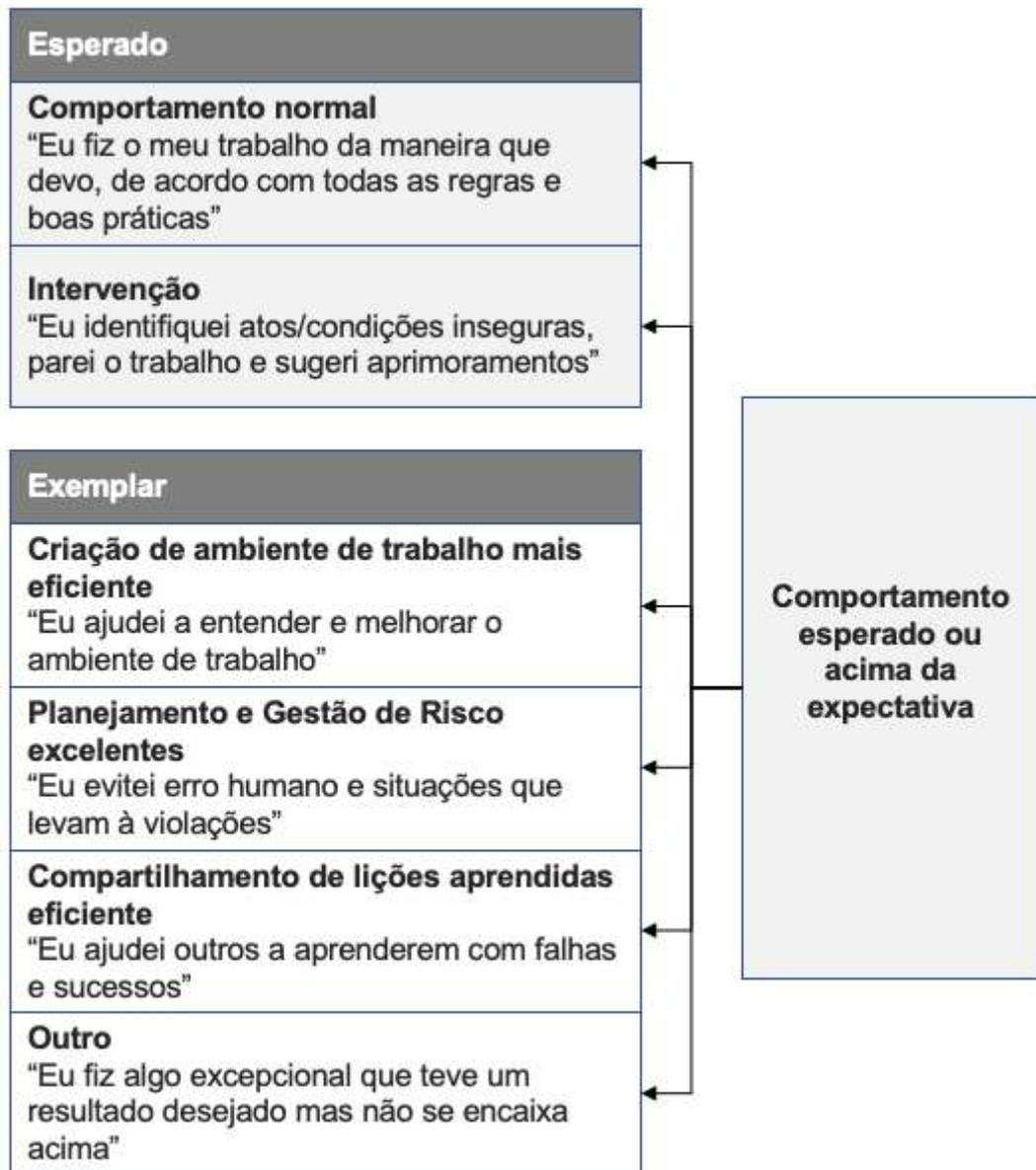
- d) Comportamento: Internalização do compromisso e responsabilidade individual por segurança, comunicando sempre de maneira objetiva, direta e frequente sobre segurança, com abordagem cautelosa ao risco;
- e) Fatores de climas organizacionais: ambientes propícios e com baixos níveis de estresse, proporcionando alto nível de satisfação no trabalho.

### 3.6 FATORES HUMANOS EM BOW TIE

Em *Bow Tie*, questões relacionadas a fatores humanos podem surgir de diversas formas, mas normalmente aparecem como partes de uma barreira preventiva, um fator de degradação ou um controle de degradação. A forma convencional de se pensar em fatores humanos em análises *Bow Tie* é considerando a falha humana, onde o ser humano é visto predominantemente como um perigo ou fraqueza do sistema. Porém, simplesmente indicar a falha humana como uma ameaça ou causa de falha de uma barreira não valoriza as contribuições positivas que o homem pode agregar ao sistema. Há maneiras mais modernas de avaliação que integram tanto os aspectos positivos como os negativos do comportamento humano (CCPS, 2018).

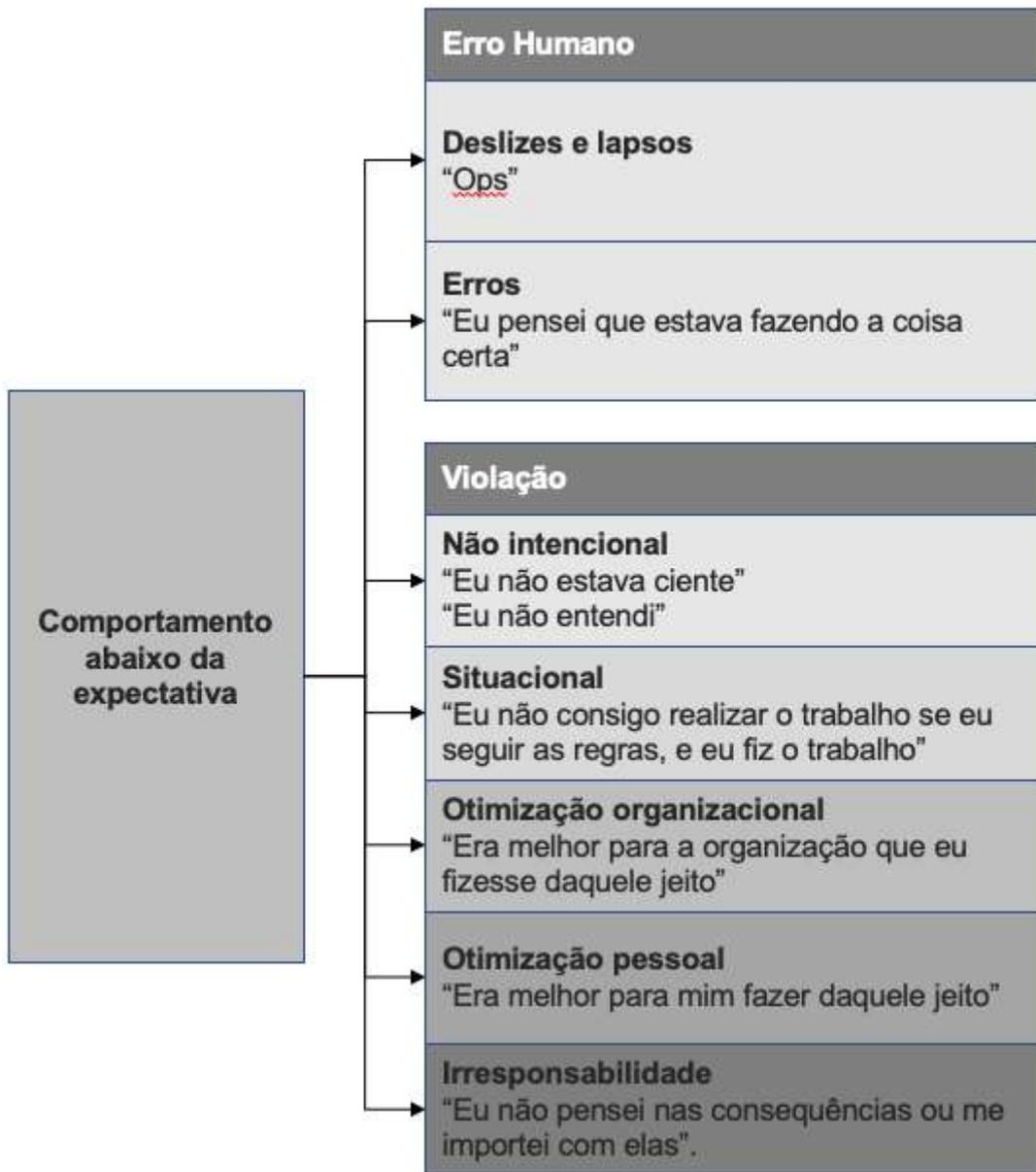
A Figura 6 e 7 demonstram alguns comportamentos do ser humano no trabalho classificados em positivos e negativos:

Figura 6 – Tipos de comportamento humano classificados como positivos



Fonte: CCPS, 2018 (Adaptado)

Figura 7 – Tipos de comportamento humano classificados como negativos

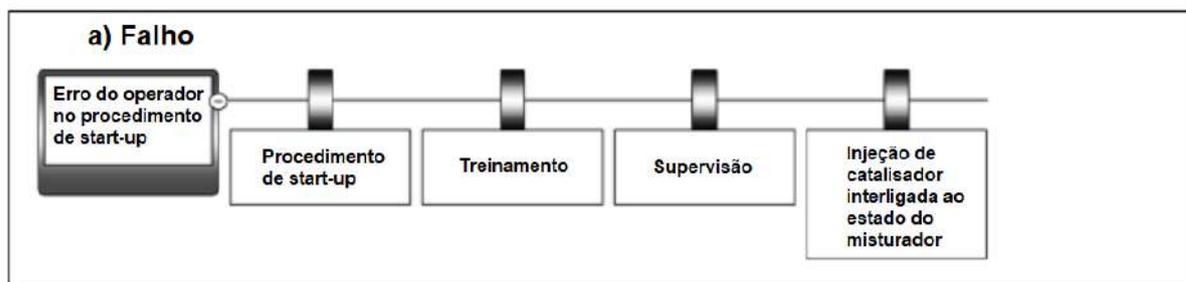


Fonte: CCPS, 2018 (Adaptado)

Em *Bow Tie*, o termo "falha humana" já foi usado como uma ameaça onde todo um caminho principal foi atribuído a ele, porém, segundo CCPS (2018) essa abordagem não é ideal. O termo é muito vago e impreciso para ser considerado como uma ameaça, gerando dificuldade em definir um fluxo de barreiras eficiente e que atenda aos critérios de validação. Em geral, tratar a falha humana como uma ameaça em um sistema tende a gerar falhas na metodologia. A Figura 7 apresenta uma fração de *Bow Tie* onde o erro do operador no procedimento de *start-up* de um equipamento é tratado como ameaça. A partir disso, são estabelecidas barreiras para prevenir que

esse erro ocasione o evento principal, e a maioria foca em atuar sobre o comportamento humano: procedimento, treinamento, supervisão. A eficácia dessas barreiras depende da atuação do operador, algo que é prejudicial para a integridade do sistema. Para o leitor do *Bow Tie*, ao analisar o diagrama e notar quatro barreiras associadas a essa tarefa, pode-se ter uma falsa sensação de que há quatro barreiras vigentes, porém na prática só existem duas: o operador executar a tarefa conforme procedimento e a interligação da injeção de catalisador. Além disso, considerando que uma barreira deve ser capaz de prevenir por si só um acidente, não podemos considerar treinamento e procedimento como barreiras, visto que são somente recursos para que o operador execute a tarefa da maneira correta. Um treinamento pode não ter sido compreendido pelo operador, e um procedimento é somente um papel com as tarefas descritas. Classificá-los como barreiras não atende aos requisitos definidos no capítulo 2. Somado a isso, a ameaça “erro do operador no procedimento de start-up” é muito vaga: podem existir infinito erros, e essas barreiras não contemplam todos eles.

Figura 8 – Abordagem deficitária da falha humana em um diagrama *Bow Tie*

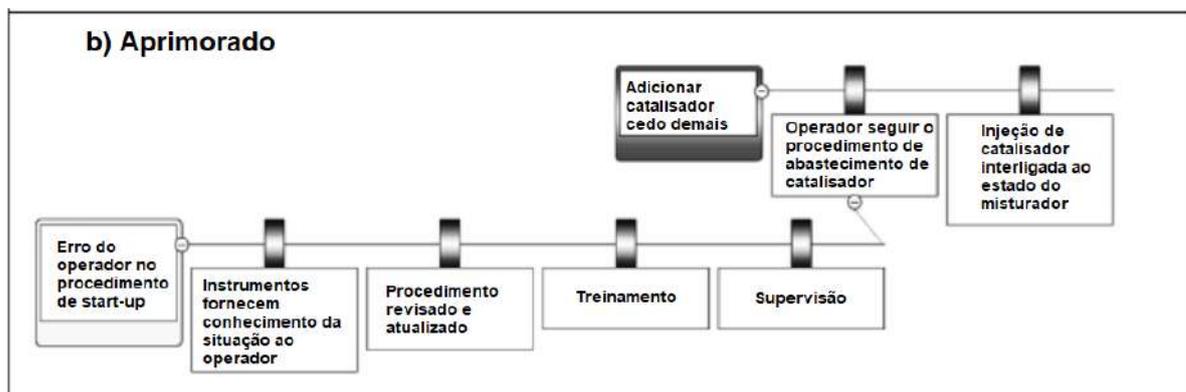


Fonte: CCPS, 2018 (Adaptado)

A maneira mais correta de tratar a falha humana em avaliações de risco *Bow Tie* é alocando-a como um fator de degradação, capaz de degradar ou invalidar uma barreira. Isso permite que as organizações enxerguem a necessidade de construir barreiras robustas que consideram controles de degradação contra a própria falha humana, reduzindo assim a probabilidade do ser humano falhar. Na Figura 9, está representada a mesma situação acima, porém aborda a falha humana como um fator de degradação para uma barreira existente. É importante notar que, nesse caso, a avaliação está mais rica, as barreiras mais claras, há a definição de controles de degradação e o caminho como um todo é mais robusto (CCPS, 2018). A ameaça ao processo, que é o operador adicionar o catalisador cedo demais, agora está mais

clara. Dessa forma, os gestores da unidade podem ser mais objetivos em definir e gerenciar as barreiras desse sistema. Fica evidente também que só há duas barreiras sobre esse processo, e o que deve ser feito para garantir que a barreira “operador seguir o procedimento de abastecimento do catalisador” funcione. Para isso, deve haver no local instrumentos que informam o operador da condição do sistema, o operador deve estar treinado no procedimento revisado em frequência pré-estabelecida, e deve haver supervisão da atividade. Tudo isso deve estar funcionando bem para que a barreira permaneça íntegra. Outro objetivo dessa abordagem é mostrar que, se o treinamento do operador não está em dia, por exemplo, a efetividade da barreira está comprometida e só existirá no sistema uma barreira confiável. Na abordagem anterior, essa mesma situação deixaria o leitor com a sensação de que ainda haveria três barreiras operando.

Figura 9 – Abordagem aprimorada da falha humana em um diagrama *Bow Tie*



Fonte: CCPS, 2018 (Adaptado)

Alguns exemplos de falhas humanas em *Bow Ties* falhos e aprimorados são apresentados a seguir, bem como formas de controle de degradação:

a) Em *Bow Ties* falhos:

i) Tipo de falha: Deslize

Controle de degradação: Aptidão para o trabalho

ii) Tipo de falha: Lapso

Controle de degradação: Supervisão

iii) Tipo de falha: Erro

### Controle de degradação: Treinamento

#### b) Em *Bow Ties* robustos e aprimorados:

##### i) Tipo de falha: Deslize

Controles de degradação: Programa de teste de álcool e drogas, gerenciamento de fadiga, terapia para estresse, força humana e planejamento de carga de trabalho, avaliação de condicionamento físico

##### ii) Tipo de falha: Lapso

Controles de degradação: Fatores humanos considerados no design do processo, treinamento de habilidades, supervisão ativa, gerenciamento de fadiga, programas de encorajamento de trabalho em equipe e cultura de segurança

##### iii) Tipo de falha: Erro

Controles de degradação: Design do processo, fatores humanos no design do processo, competência (habilidades), treinamento de atualização, avaliação periódica do programa de treinamento

Ao adotar uma abordagem mais robusta quando se diz respeito a controles de degradação em *Bow Ties* aprimorados, as chances de falha se tornam reduzidas e, ainda que esta ocorra, provavelmente a identificação da origem pela equipe de gestão de segurança de processos será mais simples e rápida.

Tratando de fatores humanos positivos e desejados (não é o caso das falhas), estes podem sim ser classificados como barreiras do sistema, mas é obrigatório que eles sejam aptos a prevenir completamente o acidente, ser eficientes, independentes e auditáveis. Como barreiras humanas sempre são ativas, também é necessário que a barreira possua os elementos detectar-decidir-agir. Na prática, é muito mais comum que os fatores humanos envolvidos no processo não atendam a todos esses critérios e por isso eles são considerados como controles de degradação. Um exemplo é o uso de LOTO (*Lock-out Tag-out*) na indústria. Nessa ferramenta, o trabalhador é responsável por desenergizar fontes de energia e bloquear o seu acionamento com

algum instrumento que somente ele pode desbloquear. Dessa forma, ele garante que durante a execução de sua tarefa nenhuma outra pessoa poderá energizar o equipamento, colocando sua vida em risco (MUTAWA, 2002). Um exemplo comum dessa ferramenta é um mecânico realizando uma manutenção corretiva dentro de uma máquina que é ligada por chave. Ao lado da máquina há uma caixa dedicada ao procedimento de LOTO, onde o mecânico guarda a chave de acionamento durante a execução de suas atividades. Ele a tranca com um cadeado que somente ele mesmo pode abrir e, dessa forma, nenhum outro trabalhador poderá ligar a máquina. Esse processo pode ser pensado como uma barreira, mas na verdade a barreira de fato é o corte de energia de uma máquina e o LOTO é um controle de degradação que garante que o corte da energia está sendo mantido.

Os fatores humanos positivos também podem estar inseridos dentro de uma barreira ativa que contenha os elementos de detecção-decisão-ação. Um exemplo é: alarme com resposta do operador em até 15 minutos. Nesse caso, o alarme é o elemento de detecção, o operador é o elemento de decisão e a sua resposta é o elemento de ação. Fatores que podem degradar a capacidade do operador de tomada de decisão podem ser incluídos na análise *Bow Tie* como fatores de degradação, e controles de degradação podem ser atribuídos. Esses controles de degradação não atendem aos requisitos para serem considerados barreiras de fato, mas eles reduzem a probabilidade de erro e são partes importantes do sistema de segurança (CCPS, 2018).

## **4 ESTUDO DE CASO: VAZAMENTO DE FOSGÊNIO EM PLANTA DA EMPRESA DUPONT**

O estudo de caso trata de um acidente ocorrido no sábado dia 23 de janeiro de 2010 na planta da empresa DuPont, em Belle, West Virginia, envolvendo o vazamento de fosgênio: um gás tóxico, incolor e altamente corrosivo. As informações disponibilizadas no relatório final de investigação da CSB (Chemical Safety Board), em 2011, foram base para o presente capítulo.

### **4.1 INTRODUÇÃO AO ACIDENTE**

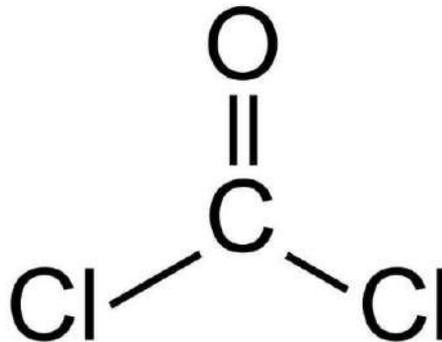
Fundada em 1802, originalmente responsável pela fabricação de pólvora, a DuPont Company é uma empresa multinacional americana, atuante em diversas vertentes no setor químico, abrangendo fibras sintéticas, lubrificantes a base de petróleo, produtos farmacêuticos, materiais de construção, materiais de embalagem especiais e produtos químicos para indústria e agricultura. A planta de Belle, West Virginia, no caso, é responsável pela fabricação de vários produtos químicos especiais e agrícolas desde 1926 (KLEIN, 2009).

A CSB (2011) relata que, na tarde de sábado do dia 23 de janeiro de 2010, um vazamento de fosgênio extremamente tóxico ocorreu em um dos armazéns de produtos químicos da fábrica. Diante disso, um operador foi exposto ao químico, uma vez que esse vazamento ocorreu no exato momento em que fazia a verificação do peso do cilindro. Apesar de ter recebido atendimento médico hospitalar imediatamente, o funcionário apresentou graves complicações de saúde rapidamente, vindo a óbito no dia seguinte.

## 4.2 O COMPOSTO FOSGÊNIO E SUAS CARACTERÍSTICAS

O fosgênio também é conhecido como cloreto de carbonila, de fórmula química  $\text{CCl}_2\text{O}$ , conforme apresentado na Figura 10. Seus pontos de fusão e ebulição são  $-118\text{ }^\circ\text{C}$  e  $8,3\text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente. O fosgênio, por ser três vezes mais denso que o ar, forma plumas de emissão concentradas que tendem a se depositar no solo e se acumular em áreas baixas. À temperatura e pressão ambiente é um gás incolor de odor similar ao de frutas em fase de decomposição. De acordo com Stevenson (2014), o fosgênio foi usado como arma química durante a Primeira Guerra Mundial (28 de julho de 1914 a 11 de novembro de 1918) por ser um gás altamente tóxico, sendo o principal agente químico utilizado, respondendo por aproximadamente 80% das 100.000 vítimas induzidas por gás.

Figura 10 – Fórmula estrutural da molécula de fosgênio



Fonte: Brainly, 2020

O principal uso do fosgênio é na produção de diisocianato de tolueno, um precursor das resinas de poliuretano usadas para fazer espumas, elastômeros e revestimentos. Também é usado na fabricação de herbicidas, pesticidas, corantes e produtos farmacêuticos. Além de sua produção industrial, possíveis fontes de fosgênio atmosférico são: emissões fugitivas, decomposição térmica de hidrocarbonetos clorados e foto-oxidação de cloroetilenos. A exposição ao fosgênio pode ocorrer em incêndios envolvendo certos compostos orgânicos clorados, encontrados em muitos solventes domésticos, removedores de tinta e fluidos de limpeza a seco ou lã, cloreto de polivinila e outros plásticos (DOIG, 1964).

VAISH (2013) explica que a exposição ocorre por inalação e pelo fato de que o fosgênio é um gás levemente solúvel em água e que, devido a isso, pode não ocorrer irritação significativa do trato respiratório e nos olhos, levando a uma exposição mais prolongada. O fosgênio exerce sua toxicidade pela acilação de proteínas, bem como através da liberação de ácido clorídrico. Os grupos amino, hidroxila e sulfidrilas nas proteínas parecem ser o alvo da acilação, levando à inibição acentuada de várias enzimas relacionadas ao metabolismo energético e à quebra da barreira ar-sangue. Portanto, ao ser inalado, ataca diretamente as proteínas nos alvéolos pulmonares, o que interrompe a troca de oxigênio no sangue, causando asfixia. A Tabela 2 apresenta a relação de concentração por tempo de exposição, bem como os danos que podem ser provocados.

Tabela 2 – Relação de concentração, tempo e dano pela exposição ao fosgênio

<b>Concentração no ar (ppm)</b>	<b>Tempo de exposição (min)</b>	<b>Dano provocado</b>
1	< 60	Nenhuma irritação imediata
1	> 60	Edema pulmonar grave
3	170	Dose letal
4 a 10	> 60	Irritação nos olhos e trato respiratório
30	17	Dose letal
500	1	Dose letal

Fonte: Vaish, 2013 (Adaptado)

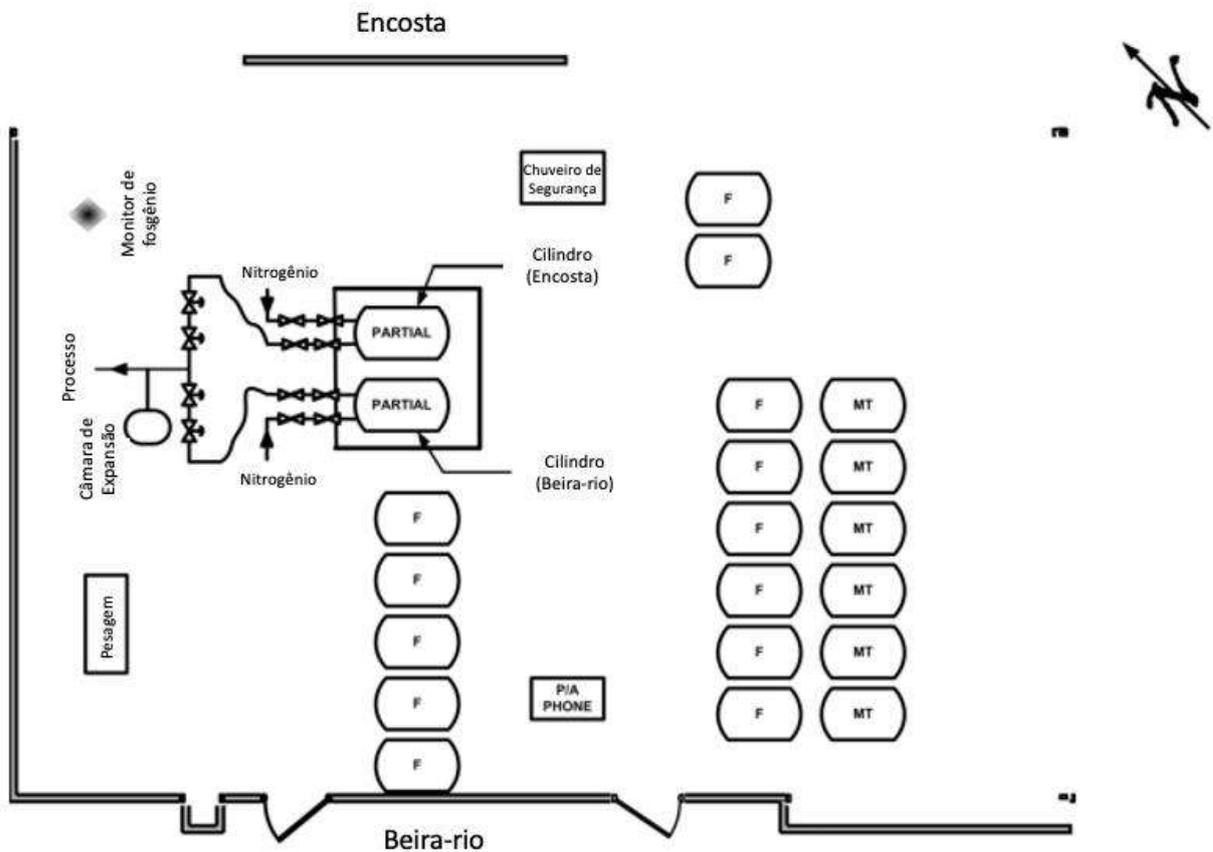
### 4.3 DESCRIÇÃO DO ACIDENTE

A CSB reporta em seu relatório de investigação que a ocorrência do vazamento de fosgênio foi o último evento de uma série de três ocorrências independentes, porém perigosas. Começou no dia 22 de janeiro de 2010, quando um alarme soou levando os operadores a descobrir que 2.000 libras (equivalente à 907,2 kg) de cloreto de metila, gás inflamável, havia vazado para a atmosfera por cinco dias, sem ser notado.

Na sexta, dia 22 de janeiro, os operadores da unidade SLM, onde o galpão de fosgênio estava localizado, perceberam uma alteração no fluxo de alimentação ao processo em um dos cilindros de fosgênio, encontrando dificuldades em ajustar o fluxo para a vazão correta. Para que o processo não sofresse severos impactos, eles realizaram uma manobra não-rotineira na linha, trocando o cilindro de alimentação, localizado no lado da encosta, pelo cilindro à beira-rio, restabelecendo assim o fluxo para a vazão correta de fosgênio. Dada essa alteração incomum, os operadores suspeitaram de que pudesse haver algum entupimento na linha de alimentação ou alguma válvula de controle de alimentação danificada.

Na manhã seguinte, dia 23, os trabalhadores da unidade SLM solicitaram à equipe de manutenção a troca da mangueira do cilindro de fosgênio localizado no lado da encosta, devido a alteração de fluxo identificada no dia anterior. A equipe, por sua vez, efetuou a remoção e descontaminação do conjunto de válvulas. Após tal procedimento, a mangueira revelou uma ruptura em seu revestimento de aço inoxidável trançado e, além disso, a parte interna estava notoriamente danificada. O operador, ao perceber os danos, informou aos seus colegas o estado crítico do material e que estaria, possivelmente, prestes a romper definitivamente. Eles, por sua vez, acordaram entre si de que reportariam o caso aos supervisores na segunda-feira, para que estes pudessem conduzir e direcionar uma devida investigação, já que os próprios funcionários informaram à CSB que nunca tinham visto uma mangueira em estado tão crítico quanto aquele. A liberação de fosgênio em si ocorreu na tarde do mesmo dia 23, após o rompimento de uma mangueira conectada a um dos cilindros de fosgênio. A Figura 11 ilustra o galpão de armazenagem do químico, bem como a localização e disposição dos cilindros no dia do evento.

Figura 11 – Unidade SLM: Galpão de fogsênio e localização dos cilindros cheios (F) e vazios (MT) no dia do evento



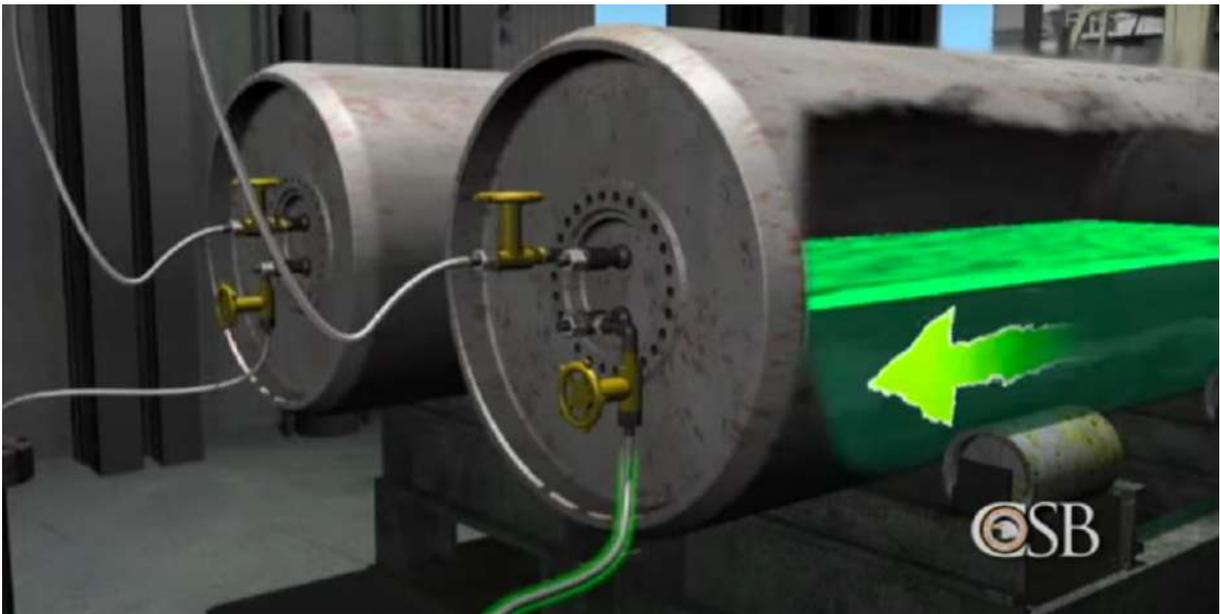
Fonte: CSB, 2011 (Adaptado)

O fogsênio, recebido por fornecedor em cilindros de 1 tonelada, era armazenado no “galpão de fogsênio” – estrutura coberta, parcialmente murada, onde ocorrem as operações de transferência e armazenagem de fogsênio (Figura 11). Todos os equipamentos utilizados para estes fins encontravam-se dentro ou próximo a esta estrutura. Mangueiras com revestimento interno de politetrafluoroetileno (PTFE), popularmente conhecido como Teflon®, eram utilizadas para conectar o cilindro de fogsênio aos demais equipamentos.

Uma das mangueiras transferia fogsênio líquido para um vaporizador e a outra fornecia nitrogênio, a 70 psig, para o cilindro (Figura 12). Quando a balança, via monitoramento eletrônico de pesagem, identificava um cilindro quase vazio, um alarme notificava o operador para fazer a troca por outro cilindro cheio e este deveria estar devidamente paramentado com o EPI padrão indicado para a atividade (capacete rígido, botas de segurança, óculos de proteção, roupas resistentes à chamas e crachá com dosímetro de fogsênio). Esta manobra era finalizada abrindo as

válvulas para o cilindro cheio e fechando as válvulas para o cilindro vazio. As mangueiras permaneciam acopladas nesta operação e, o resquício de fosgênio líquido da mangueira previamente em uso, era purgado com nitrogênio. Em condições normais de operação da planta, o processo consumia de dois a três cilindros de fosgênio por dia.

Figura 12 – Ilustração do fluxo de transferência do fosgênio líquido dos cilindros em uso.



Fonte: Phosgene Accident Animation (UNSCSB, 2011)

Problemas de escoamento foram identificados em uma das mangueiras de transferência no dia anterior, 22 de janeiro, porém, para que não houvesse interrupções nos processos da planta, trocou-se os cilindros da operação de transferência e uma das válvulas de um dos cilindros parcialmente cheio foi fechada, porém a mangueira, conectada a ele, não foi devidamente purgada, permanecendo, então, com fosgênio líquido. Dessa forma, o líquido remanescente, aquecendo, provocou o aumento de pressão no interior da mangueira.

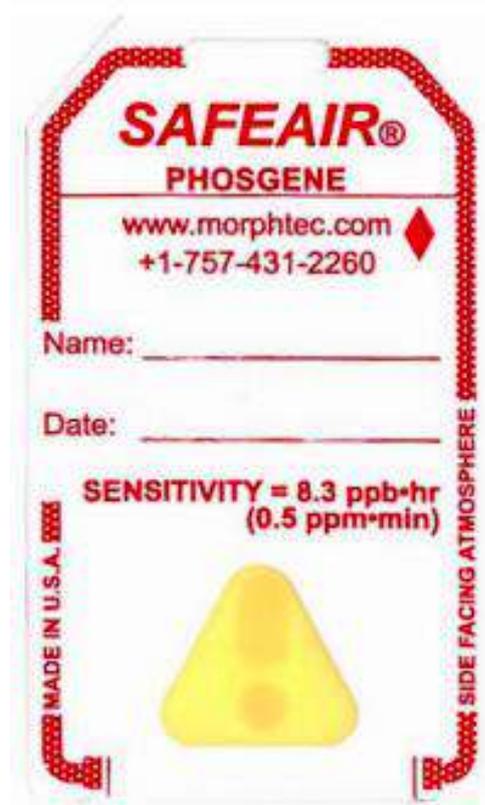
Conforme relatado à CSB (2011), quando o acidente ocorreu, um operador estava no galpão de fosgênio inspecionando o nível de líquido no cilindro à beira rio (Figura 11), uma vez que o cilindro ativo estava quase vazio e precisaria ser trocado. O aumento da pressão interna da mangueira resultou na sua ruptura, pulverizando o fosgênio líquido remanescente nas regiões do peito e face do operador. Apesar dos equipamentos de proteção individual (EPIs) estarem em uso e de acordo com as

orientações e normas vigentes de segurança de processos da planta, eles não eram suficientemente apropriados para o nível de contaminação e periculosidade atrelados ao manuseio do químico em questão.

Imediatamente após o ocorrido, o operador solicitou assistência pelo telefone da unidade SLM e um colega de trabalho, que respondeu ao chamado, percebeu que o dosímetro de fosgênio da vítima (Figura 13) estava descolorido, o que indicava uma provável exposição. Este, então, direcionou o operador exposto ao motorista da unidade para que pudessem transportá-lo até o centro médico da fábrica para avaliação e tratamento do quadro. Enquanto estava a caminho do centro médico, o guarda do portão da frente foi avisado por rádio e aconselhado a solicitar uma ambulância para a emergência médica. O trabalhador exposto, enquanto estava no centro médico esperando pela ambulância, optou por lavar seu rosto e suas mãos, mas não há nenhuma evidência ou registro de que ele foi colocado em um chuveiro de segurança para lavar, como instruído pelos procedimentos de emergência, ou que qualquer atividade de descontaminação tenha sido feita, além da falsa descontaminação por lavagem de mãos e rosto. Assim que a ambulância chegou ao local, os médicos socorristas foram levados para atender o operador exposto e conduzi-lo ao hospital.

Apesar de ter recebido atendimento médico hospitalar imediatamente, o operador apresentou graves complicações de saúde rapidamente, vindo a óbito no dia após a dada exposição, 24 de janeiro de 2010. Outros dois operadores também foram expostos ao fosgênio, porém sem ferimentos ou complicações de saúde. De acordo com a CSB, presume-se que 2 kg de fosgênio foram vazados para o ambiente nesse evento.

Figura 13 – Dosímetro de fosgênio.

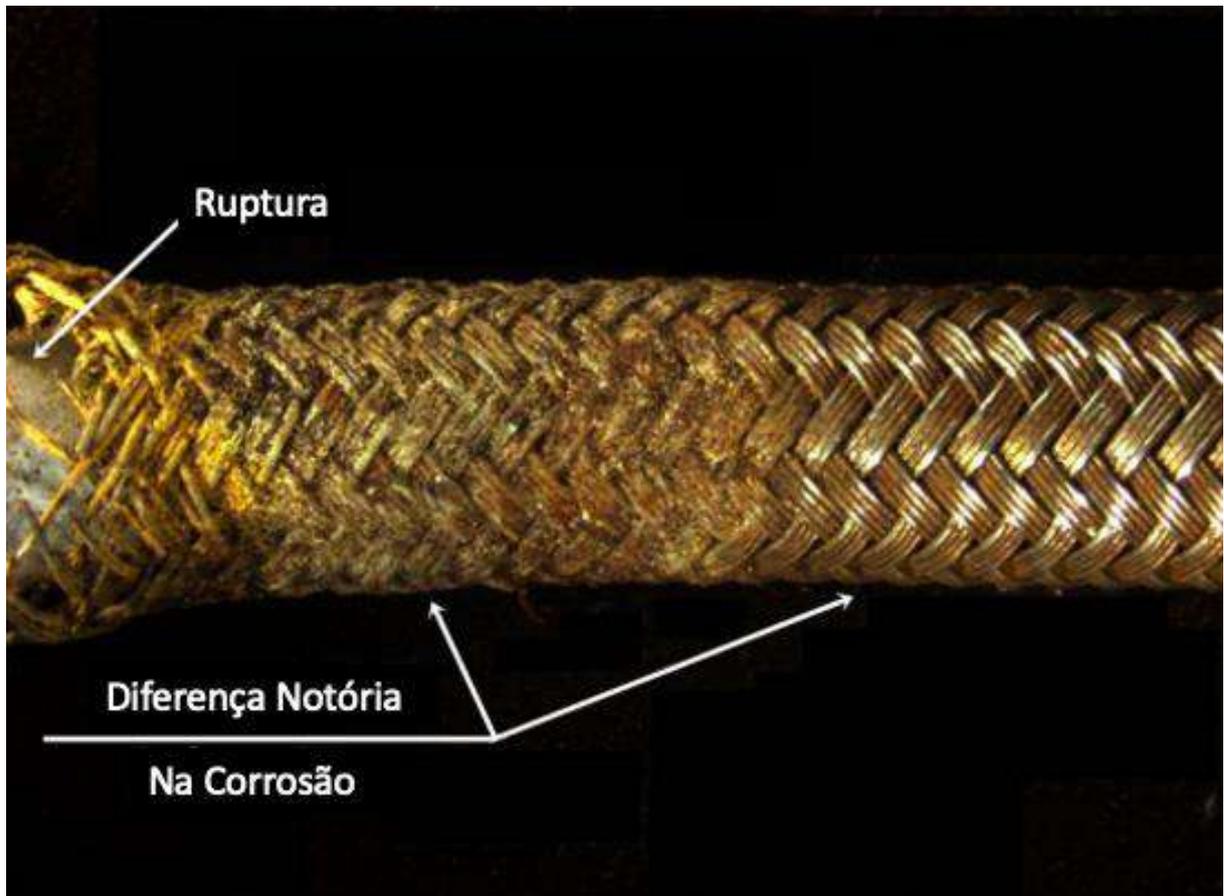


Fonte: CSB, 2011.

A CSB informa em seu relatório que o material utilizado na confecção da mangueira de transferência possuía alta permeabilidade, sendo esta apontada como ponto chave para a ocorrência do acidente. O Teflon®, presente no revestimento interno da mangueira, era permeável e suscetível a vapor de fosgênio, se difundindo através do tubo. A fita adesiva utilizada para fixar a etiqueta contribuiu para a retenção do gás fosgênio no exterior do aço inoxidável sobretrancado e o ácido clorídrico (HCl), proveniente do fosgênio, aumentou o ataque corrosivo. Como a etiqueta adesiva funcionava como uma barreira, aprisionando o fosgênio que permeava através do interior da mangueira, a concentração ácida resultante era muito maior sob a etiqueta do que em qualquer outro lugar da mangueira (Figura 14). E, devido essa degradação, a recomendação era de que a manutenção, segundo o procedimento de operação padrão de segurança do processo (POPs), fosse feita a cada 30 dias, com a substituição das mangueiras de transferência dos cilindros de fosgênio. No entanto, segundo a investigação da CSB, havia mais de 7 meses desde a última troca das mangueiras relacionadas ao acidente. Essa demora na troca foi justificada, pela

equipe da DuPont, devido a mudança do software responsável pelo gerenciamento de manutenção, o qual não sinalizou a necessidade da troca do material no devido intervalo de tempo.

Figura 14 – O efeito da etiqueta na corrosão do aço inoxidável da mangueira de transferência



Fonte: CSB, 2011 (Adaptado)

Ademais, no dia anterior ao acidente, as válvulas de isolamento da mangueira de fogsênio do cilindro à beira-rio foram fechadas, retendo o fogsênio líquido na mangueira entre as válvulas que isolaram o cilindro do processo. A forte corrosão do revestimento de aço inoxidável, juntamente com o tempo de serviço da mangueira e a expansão térmica do fogsênio líquido isolado, fez com que a mangueira falhasse catastroficamente. Quando esta falha ocorreu, o trabalhador foi severamente exposto enquanto caminhava por perto para verificar o estado do cilindro adjacente em serviço (CSB, 2011).

## 4.4 ANÁLISE DOS FATORES CONTRIBUENTES

### 4.4.1 Mangueiras de Teflon ®

Conforme a CSB (2011) expõe em seu relatório, o vazamento ocorreu após a corrosão e rompimento da mangueira de fosgênio, uma vez que seu material (aço inoxidável e revestimento interno de Teflon ®) era suscetível à corrosão pelo químico utilizado. Muitos fatores humanos estão relacionados ao acidente, contribuindo diretamente para que o mesmo ocorresse, começando pelo fato da empresa, já em 1987, ter o conhecimento de que a utilização de tais mangueiras, trançadas de aço inoxidável e revestidas de Teflon ®, indicava perigo eminente ao processo. Na época, o especialista da DuPont recomendou fortemente a troca por mangueiras revestidas com Monel, uma liga de níquel de alta resistência mecânica, alta resistência à corrosão atmosférica e ácida. Porém, o mesmo salientou que, apesar do Monel ser mais caro que a mangueira de Teflon ® utilizada, duraria ao menos três vezes mais até que fosse necessária sua manutenção e substituição – enquanto as usadas precisariam ser substituídas a cada trinta dias. Ainda assim, a empresa decidiu por não aderir à mudança recomendada.

O Procedimento Operacional Padrão de Segurança (POPS) da DuPont exige que as mangueiras sejam substituídas a cada 30 dias. Porém, a mangueira rompida estava em serviço havia sete meses, segundo a investigação. Ainda que o processo contasse com o apoio de um sistema informatizado, responsável por indicar e alertar o operador quando as mangueiras deveriam ser trocadas, tal sistema passou por uma modificação previamente, sem reconfiguração, culminando na omissão da ordem de serviço necessária. Embora o plano de manutenção das mangueiras tenha prescrito um cronograma regular de troca a cada 30 dias, as ordens de serviço mostram que a frequência de troca não era sistemática nem previsível (Figura 15). Ao menos três vezes, de 2006 a 2010, as mangueiras de fosgênio foram deixadas em serviço de 3 a 7 meses. As ordens de serviço para a troca das mangueiras indicam que as mangueiras de transferência de aço inoxidável, conectadas no momento do acidente, já estavam em serviço há 7 meses (Figura 15).

Figura 15 – Registro de frequência de troca das mangueiras de fosgênio

<b>Hose Change-out Frequency</b>		
<b>Month/Year</b>	<b>Phosgene Hoses</b>	<b>Phosgene Used</b>
Jul-05	Changed	Phosgene Used
Aug-05	Changed	
Sep-05	Changed	
Oct-05	Changed	
Nov-05	Changed	
Dec-05		
Jan-06		Phosgene Used
Feb-06		Phosgene Used
Mar-06	Changed	Phosgene Used
Apr-06		Phosgene Used
May-06		Phosgene Used
Jun-06	Changed	Phosgene Used
Jul-06	Changed	Phosgene Used
Aug-06		
Sep-06		
Oct-06	Changed	
Nov-06	Changed	
Dec-06		
Jan-07		Phosgene Used
Feb-07		Phosgene Used
Mar-07	Changed	Phosgene Used
Apr-07		Phosgene Used
May-07	Changed	Phosgene Used
Jun-07		Phosgene Used
Jul-07		Phosgene Used
Aug-07		
Sep-07	Changed	
Oct-07		
Nov-07		
Dec-07		
Jan-08		Phosgene Used
Feb-08		Phosgene Used
Mar-08		Phosgene Used
Apr-08	Changed	Phosgene Used
May-08	Changed	Phosgene Used
Jun-08		Phosgene Used
Jul-08	Changed	Phosgene Used
Aug-08	Changed	
Sep-08		
Oct-08		
Nov-08		
Dec-08		
Jan-09	Changed	Phosgene Used
Feb-09		Phosgene Used
Mar-09		Phosgene Used
Apr-09		Phosgene Used
May-09		Phosgene Used
Jun-09	Changed	Phosgene Used
Jul-09		Phosgene Used
Aug-09		
Sep-09		
Oct-09		
Nov-09		
Dec-09		
Jan-10		Phosgene Used

Fonte: CSB, 2011.

Além da alteração no software do sistema de alerta informatizado da troca das mangueiras sem a devida reconfiguração para a periodicidade indicada de 30 dias, alguns supervisores também confiavam que o coordenador alertasse e sinalizasse a necessidade de manutenção para, então, iniciar o serviço, segundo reportado no relatório da CSB (2011).

#### **4.4.2 Sistema SAP**

A DuPont utilizava o módulo de manutenção do software de planejamento de recursos empresariais, SAP, para programar a troca das mangueiras de fogsênio em intervalos pré-determinados de 30 dias. O sistema SAP estava programado para emitir as ordens de serviço de substituição das mangueiras para que uma possível liberação de fogsênio fosse evitada; assim, o compromisso de manter os dados precisos e atualizados no banco de dados é crucial para proteger toda a companhia e população contra a exposição ao químico envolvido.

No final do ano de 2006, segundo a CSB (2011), os dados do SAP ligados à frequência de troca das mangueiras de fogsênio foram alterados e, conseqüentemente, o sistema parou de emitir automaticamente as ordens de serviço de troca das mangueiras, porém os funcionários desconheciam que o SAP não estava funcionando devidamente. A CSB solicitou informações adicionais sobre a mudança, mas a DuPont não conseguiu determinar quem alterou os dados do SAP, por que foram alterados, ou quando a mudança foi executada. Nenhuma redundância, tal como uma folha de verificação semanal de manutenção crítica do equipamento ou etiqueta de inspeção, garantiu que as mangueiras fossem trocadas na frequência pré-estabelecida. Com o SAP não mais emitindo as ordens de serviço, o sistema não acionou as notificações de manutenção para troca das mangueiras nos intervalos previamente determinados.

Além disso, nota-se também que não existia um processo de verificação de troca das mangueiras bem estabelecido e funcionando, onde o operador, por exemplo, verificasse quando fora realizada a última manutenção ou troca. Caso fosse estabelecida tal rotina no processo, a equipe seria capaz de identificar, dado os

registros da Figura 15, que a última troca foi realizada em junho de 2009 e que seria extremamente necessário realizar a manutenção e substituição da mangueira o quanto antes. Um segundo sistema, onde pudesse ser feito o registro de manutenção ou mesmo um formulário em papel poderiam ter sido utilizados como ferramentas redundantes para evitar a plena dependência de um sistema automatizado que, ao falhar, coloca toda a segurança do processo em risco.

#### 4.4.3 Equipamento de Proteção Individual (EPI)

Os procedimentos padrão de operação e segurança (POPS) da DuPont, informados à investigação da CSB, incluem dois níveis de EPI necessários para o trabalho no galpão de fosgênio, de acordo com o estado de conexão dos cilindros. Quando os cilindros de fosgênio estão conectados ao processo e não há interrupções nas linhas de fosgênio, os EPIs exigidos na unidade de Belle são: um capacete rígido, sapatos de segurança com biqueira de aço, óculos de segurança, roupas resistentes a chamas (FRC) e um crachá com dosímetro de fosgênio (Figura 13). O trabalho com este nível de proteção inclui:

1. Entrada no galpão de fosgênio para verificar pesos da balança do cilindro;
2. Abrir e fechar válvulas para mudar de um cilindro para outro, e
3. Operar o guindaste ao carregar e descarregar cilindros cheios ou vazios no galpão de fosgênio.

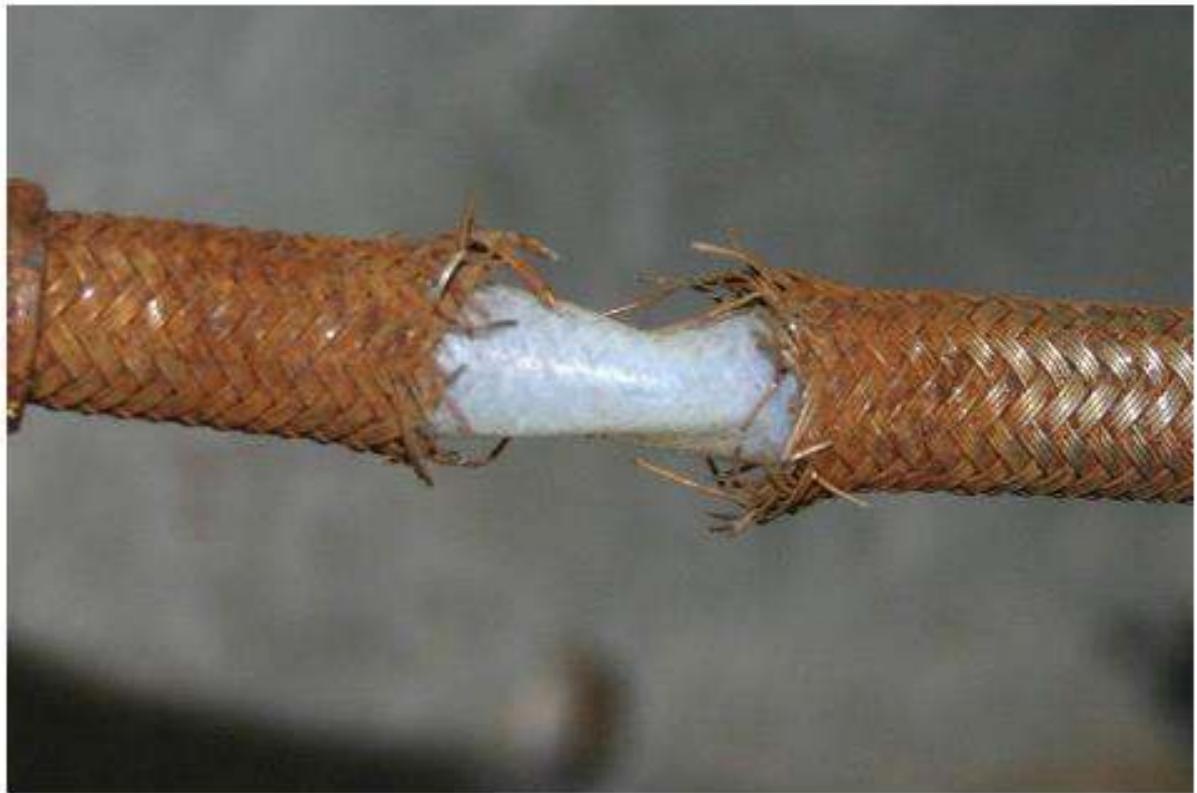
Além disso, o POPS para desconectar o cilindro de fosgênio exige que os operadores utilizem um *chemical suit* (luvas, botas e capuz) com ar respirável fornecido, além dos EPIs listados acima, durante a execução do trabalho. No decorrer de todas as operações de interrupção da linha de fosgênio (nos casos de troca dos cilindros, por exemplo), outro operador, usando EPI padrão, permanece do lado de fora do galpão para monitorar o fornecimento de ar respirável do operador que executa a atividade. No momento do evento, o funcionário fatalmente exposto ao fosgênio estava vestindo o EPI padrão, dado que a tarefa que ele estava executando era a de

pesagem do cilindro, sem interrupção da linha de fosgênio. Segundo os padrões operacionais da DuPont, ele estava cumprindo com os níveis de proteção e segurança exigidos para a atividade, não sendo obrigatório o uso de *chemical suit*, com fornecimento de ar, durante tal tarefa. Porém, tendo em vista o acidente ocorrido, tanto a tarefa de pesagem quanto toda a tarefa de rotina que envolvesse um mínimo de contato possível com o fosgênio deveria ser incluída na lista de atividades que demandam proteção mais robusta, haja visto a periculosidade e potencial risco tóxico do químico em questão.

#### **4.4.4 Incidente anterior com fosgênio**

A CSB (2011) aponta que, na manhã do evento, os operadores solicitaram à manutenção a substituição da mangueira de fosgênio do cilindro da encosta, devido a suspeita de restrição de fluxo. Embora o cilindro ainda estivesse parcialmente cheio, ele foi removido de serviço e substituído pelo cilindro cheio, à beira-rio. A mangueira de abastecimento de fosgênio do cilindro da encosta e o conjunto de válvulas foram removidos e descontaminados por imersão em água. Quando a mangueira foi removida da água, a etiqueta de identificação adesiva branca havia caído, revelando uma trança de aço inoxidável quebrada e um revestimento de PTFE colapsado, uma possível causa da restrição do fluxo (Figura 16).

Figura 16 – Mangueira danificada do cilindro de fosgênio da encosta. A etiqueta adesiva que cobria a seção danificada descolou durante o procedimento de descontaminação.



Fonte: CSB, 2011

Um operador declarou à CSB que quando viu a seção danificada da mangueira, reportou a seus colegas de equipe o fato, enfatizando que a mesma estava perto de romper e que eles tiveram sorte de tê-la encontrado e trocado a tempo. Esta descoberta não foi classificada como um quase acidente (*near miss*) ou incidente, dado que os supervisores responsáveis da área não foram alertados sobre o defeito identificado. Na investigação da CSB, os operadores disseram que nunca tinham visto uma mangueira de aço inoxidável, usada nos cilindros de fosgênio, corroída de tal forma, até o ponto de ruptura. Embora tenham ficado surpresos e preocupados com tal descoberta, eles planejaram reportar aos supervisores sobre o caso na segunda-feira de manhã, cerca de 48 horas depois, já que a equipe de supervisão não trabalhava aos fins de semana. Além disso, os operadores disseram que esperavam que os supervisores conduzissem uma investigação completa; entretanto, como o incidente ocorreu em um sábado, o evento não foi devidamente investigado.

Quanto a esse relato, sugere-se que, caso houvesse uma equipe supervisora trabalhando aos finais de semana e um sistema em vigor onde os operadores pudessem reportar e registrar os incidentes ocorridos nos finais de semana, a supervisão tomaria conhecimento em tempo hábil e a investigação do quadro poderia ter sido devidamente iniciada antes do evento com o vazamento de fosgênio ocorrer, apesar de não garantir que o mesmo teria sido completamente evitado. Se tratando de questões de segurança atreladas a um químico extremamente tóxico como o fosgênio, a implementação de equipes de supervisão nos finais de semana seria uma atitude organizacional ideal, de forma a prevenir e/ou amenizar possíveis acidentes. A Figura 17 traz um comparativo do estado das mangueiras que estavam em uso nos cilindros da encosta e à beira-rio com uma mangueira nova.

Figura 17 – Comparação das mangueiras (de cima para baixo): Mangueira rompida (beira-rio), mangueira de fluxo restrito (encosta) e mangueira nova com etiqueta de identificação anexada.



Fonte: CSB, 2011

#### 4.4.5 Planejamento de trabalhos não-rotineiros

Os operadores relataram à CSB que encontraram dificuldade em manter o fluxo necessário de fogsênio de um dos dois cilindros na balança de pesagem no dia anterior ao incidente. A vazão de fogsênio do cilindro para o processo foi inadequada e, por isso, eles realizaram uma manobra não-rotineira de troca do fluxo de fogsênio do cilindro da encosta para o cilindro à beira-rio para restabelecer um fluxo constante de fogsênio. Dada a dificuldade encontrada na atividade, os operadores suspeitaram que uma mangueira estivesse entupida ou uma válvula de controle de alimentação automática estivesse danificada. De acordo com CSB (2011), as operações não-rotineiras são caracterizadas por práticas esporádicas, podendo ser planejadas e programadas ou ocorrer sem programação.

Para minimizar a interferência do fluxo de fogsênio no processo, os operadores mudaram o fluxo para o cilindro à beira-rio, que funcionou como esperado, fornecendo a vazão normal adequada. Quando as válvulas para cada uma das respectivas mangueiras de transferência foram fechadas, o fogsênio líquido não foi devidamente expurgado, conforme requerido no POPS para atividade de mudança de um cilindro para outro. A CSB aponta que, como os operadores não estavam plenamente conscientes dos perigos da expansão térmica, o fogsênio líquido permaneceu nas mangueiras enquanto os cilindros eram trocados. Dessa forma, os operadores envolvidos nestas operações não-rotineiras tentaram manter as atividades do processo em estado estável, já que o POPS não tratava da restrição do fluxo de manuseio.

É indicado que todas as informações pertinentes aos químicos envolvidos nos processos sejam fornecidas e de fácil acesso aos operadores de tal processo a qualquer momento, inclusive questões relacionadas à mudanças de estado, variações de pressão e temperatura. Isso torna o trabalho mais claro e fornece condições mais apropriadas para que o operador analise criticamente a sua atividade em caso de possíveis não conformidades. Uma vez que o time é detentor de conhecimento robusto acerca do produto químico, se tornam profissionais mais bem preparados para enfrentar situações anormais e eventos atípicos como o tratado em item anterior.

#### 4.4.6 Galpão de Fosgênio

Segundo JOHNSON (2011), na década de 80, a DuPont considerou fazer uma modificação no galpão onde o fosgênio era armazenado, cercando a área de armazenamento e incluindo depuradores de ar, impedindo assim que o fosgênio entrasse na atmosfera em caso de vazamento. Na época, a empresa constatou que tal mudança traria mais segurança para a população local e para os trabalhadores, porém não passou de mais uma medida não adotada pela empresa, como o caso da substituição das mangueiras de Teflon® por Monel, já abordada. JOHNSON (2011) também relata que, em 2000, uma análise de segurança de processo da empresa reconheceu a necessidade do sistema de depuração para o fosgênio, porém o conselho administrativo adiou o trabalho, prorrogando quatro vezes entre os anos de 2004 e 2009. O galpão contava apenas com ventilação natural, fluindo através da abertura da parede.

O fosgênio é utilizado em larga escala em outras plantas da DuPont e, no relatório apresentado pela CSB, a fábrica de Mobile, no Alabama, foi apontada como exemplo. A planta em Mobile utiliza os mesmos cilindros de fosgênio de capacidade de 1 tonelada e mangueiras também trançadas de aço inoxidável revestidas de Teflon®, semelhantes às usadas na planta de Belle. Todavia, as mangueiras utilizadas em Mobile são mais curtas, capazes de lidar com temperatura e pressão máximas de operação maiores. Além disso, os cilindros do galpão de fosgênio são armazenados em uma sala fechada, cujo ar é ventilado para um depurador de emergência, criando assim uma leve pressão negativa, que limpa o fluxo antes de eliminá-lo à atmosfera. Este sistema de depuração possui capacidade de capturar e filtrar vapores de um cilindro inteiro. O purificador de emergência tem acionamento automático por meio de sensores de detecção de vazamentos. Além disso, os operadores da planta de Mobile entram na área do cilindro de fosgênio sob as mesmas exigências de EPI de Belle para isolar e trocar os cilindros. Entretanto, em Mobile, para capturar e depurar os vapores de fosgênio no caso de uma possível liberação, o operador liga o sistema de depuração de emergência antes de entrar no local. Assim como em Belle, a planta de Mobile possui analisadores de fosgênio localizados dentro e ao redor da unidade para monitorar continuamente as concentrações. Em Mobile, os sensores no galpão de

fosgênio ativam alarmes sonoros locais dentro do próprio galpão e uma luz intermitente acende no exterior para alertar os funcionários. Caso nenhum operador esteja presente no galpão quando o alarme for ativado, o purificador de ar de emergência aciona automaticamente. O analisador instalado e em atividade na planta de Belle no galpão de fosgênio não possuía alarme sonoro para alertar o pessoal da área; em vez disso, os procedimentos de Belle exigiam que o operador da fábrica notificasse verbalmente o pessoal sobre a liberação e somente os operadores no galpão de fosgênio podiam ativar o interruptor para o alarme luminoso de alerta, se tratando de um procedimento totalmente manual e dependente de ação humana.

O sistema de depuração e os alarmes automatizados instalados em Mobile são exemplos de controles de nível superior que protegem os trabalhadores, quando comparados aos instalados em Belle. Mobile tinha alarmes automatizados, enquanto Belle confiava na ação do operador para ativação de alarmes e alertar o time sobre uma suspeita ou liberação efetivamente real. Mobile implementou o sistema de depuração, um exemplo de controle de engenharia, com o objetivo de gerenciar as concentrações de fosgênio no galpão de fosgênio no caso de uma liberação. O projeto do galpão de fosgênio da planta de Belle contava apenas com a ventilação natural para dispersar gases fosgênicos, potencialmente prejudicando o pessoal dentro e ao redor do galpão, assim como a comunidade local.

Se tratando do mesmo químico dentro da mesma empresa, apesar de plantas diferentes, a abordagem na segurança de processo, manuseio e uso do fosgênio deveria ser a mesma ou tratada no mesmo nível de segurança em todas as unidades. Quando comparadas as duas plantas, é evidente que em Mobile, caso ocorresse qualquer tipo de vazamento de fosgênio, a planta estaria melhor estruturada e preparada para evitar a ocorrência de um evento catastrófico como visto na planta de Belle. Segundo RIBEIRO (2006) uma prática comum no mercado de trabalho é o *benchmarking*, considerado uma das ferramentas mais eficazes de transferência de conhecimento e inovação em organizações, sendo ainda mais relevante quando usado para apoiar estratégias de melhoria contínua, provocando um impacto positivo na competitividade. E, se tratando de impacto positivo, a DuPont adotando essa prática, estaria melhorando como um todo sua cadeia de produção em suas várias plantas espalhadas ao redor do mundo.

#### 4.4.7 Alarmes

De acordo com a CSB, a unidade SLM, onde o galpão de fosgênio estava localizado, possuía 12 sensores de fosgênio instalados, dentro e ao redor da unidade, para amostragem e registro contínuo (a cada 30 segundos) das concentrações do químico. Tais concentrações eram detectadas através de analisadores com sensor de difusão eletroquímica na faixa de 0,05 a 1 ppm. Os 12 sensores estavam distribuídos pela unidade SLM da seguinte maneira: Um sensor de fosgênio instalado no galpão de fosgênio, seis no edifício da unidade, dois fora do edifício, três na fronteira da unidade, ao longo do rio Kanawha, a aproximadamente 36,6 metros de distância do galpão de armazenamento de fosgênio. As leituras do analisador eram monitoradas pelo sistema de controle distribuído (DCS) na sala de controle da unidade SLM e, quando ocorria uma detecção de concentrações superiores ao limite inferior de 0,05 ppm, alarmes sonoros e visuais eram acionados no posto de trabalho do operador da mesa de controle. O relatório de investigação da CSB pontuou que não foram encontradas evidências de alarmes sonoros ou visuais em serviço no galpão no momento do vazamento de fosgênio.

No dia do evento, o vazamento ativou os alarmes da sala de controle em 4 dos 12 analisadores instalados na unidade. O analisador do galpão de fosgênio registrou uma variação de concentração acima do limite inferior durante 50 minutos após o vazamento. Dois dos três monitores dos sensores localizados na fronteira da unidade acionaram alarmes e outro monitor, localizado no exterior do edifício da unidade SLM, registrou uma alteração na concentração próximo ao horário de ocorrência do vazamento.

É de se esperar que dentro do galpão de armazenamento de fosgênio fossem instalados mais sensores de fosgênio do que apenas um. Se tratando de uma prática comum em segurança de processos, a inclusão de mais sensores espalhados no galpão de fosgênio traria redundância para o processo, e caso um sensor falhasse, outros estariam disponibilizados para fazer seu papel. Além disso, um sistema de alarme no próprio galpão seria mais uma opção de segurança, uma vez que o soar do alarme no local alertaria os funcionários que naquela área estaria vazando fosgênio e que eles deveriam evacuar a instalação o mais rápido, tendo o menor contato possível

com o produto químico. O alarme também informaria outras pessoas desinformadas que aquela área não deveria ser acessada até segunda ordem.

Os alarmes de liberação de fosgênio da unidade SLM eram ativados manualmente pelo operador da sala de controle, mediante notificação do pessoal externo ou caso um analisador de fosgênio ativasse um alarme na mesa de controle. A orientação da NFPA (*National Fire Protection Association*) estabelecia que os alarmes de emergência manuais, quando ativados, soassem para alarmes locais, alertando os ocupantes na área e ao redor. O galpão de fosgênio não continha alarmes que pudessem ser ativados localmente. Os operadores que suspeitassem de uma liberação deveriam se comunicar verbalmente com o operador de controle, que então ativaria um alarme sonoro. Na ausência de notificações automáticas de alarme, o pessoal da área e ao redor corre o risco de exposição, como foi o caso no dia do evento. A NFPA afirma que, para sistemas de detecção de gases, os alarmes devem ativar um alarme local audível e visual, simultaneamente. No galpão que ocorreu o evento, o sistema de detecção de gases instalado ativava os alarmes apenas na sala de controle da unidade SLM caso as concentrações excedessem os limites já citados e os detectores de gás não indicavam localmente, de forma sonora ou visual, a detecção de uma dada concentração perigosa.

#### **4.4.8 Comitê Guardiã de Material Altamente Tóxico de Fosgênio**

O Comitê Guardiã de Material Altamente Tóxico de Fosgênio da DuPont tem como foco o gerenciamento, tratamento e manuseio seguro do fosgênio nas instalações da empresa, assim exposto pela CSB. A DuPont possui vários comitês guardiões para materiais altamente tóxicos (*Highly Toxic Materials – HTMs*) utilizados em seus processos. O comitê é composto por representantes, conhecidos como guardiões do fosgênio, de todas as instalações da DuPont que produzem ou consomem fosgênio. Participam, também, os gerentes dos processos envolvidos, representantes de saúde e segurança corporativa, engenheiros e especialistas em higiene industrial. O Comitê Guardiã é responsável por realizar reuniões duas vezes

ao ano com o objetivo de compartilhar aprendizados e discutir questões de manuseio do fogsênio.

A DuPont tem um manual HTM para o fogsênio, um protocolo da empresa que inclui requisitos e diretrizes para o projeto e operação segura de processos que geram ou utilizam fogsênio. O objetivo principal do manual é reduzir a probabilidade do fogsênio prejudicar e causar danos a nível social, afetando funcionários e ou a população ao redor da planta. As exigências do manual são obrigatórias para todas as instalações da DuPont com fogsênio capaz de impor um risco significativo externo, conforme determinado por uma análise das consequências químicas da exposição externa. O Comitê de Fogsênio realiza uma auditoria aproximadamente a cada 3 anos de todas as instalações que utilizam o químico contra as exigências e diretrizes estabelecidas no manual do fogsênio HTM. O órgão auditou a unidade SLM, na planta de Belle, em setembro de 2006; a próxima auditoria estava programada para o dia 25 de janeiro de 2010, exatos dois dias após o incidente da liberação de fogsênio. Considerando que três anos é tempo suficiente para que haja muitas mudanças dentro de uma organização, a frequência estabelecida de auditorias do Comitê pode não ter sido suficiente para identificar irregularidades relacionadas ao processo do fogsênio.

Na auditoria de 2006 exposta no relatório da CSB, o comitê não detectou não conformidades, mas fizeram recomendações a serem seguidas, como por exemplo acrescentar planos de inspeção com o objetivo de detectar corrosão na tubulação de Teflon revestida. A equipe constatou que as mangueiras em uso no sistema de alimentação de fogsênio não eram dos tipos recomendados para o serviço de fogsênio pela norma DuPont, mas não exigiu efetivamente que fizessem a troca pelas mangueiras apropriadas e recomendadas. Além disso, o time observou que as linhas de fogsênio líquido no galpão apresentavam sinais de corrosão externa moderada e que a umidade do local deveria ser tratada para que o potencial de corrosão fosse reduzido ao máximo. Como se tratavam de recomendações, e não exigências, o Comitê não declarou a obrigatoriedade de desenvolver um plano de ação para resolução e melhoria dos pontos levantados e a planta continuou com o uso das mangueiras que o padrão da empresa não recomendava.

#### 4.4.9 Análise de Risco

O relatório da CSB aponta que o time de engenharia da DuPont, em 1988, estudou duas opções de uso do fosgênio nas instalações da Belle: recebendo o químico em cilindros de um fornecedor externo ou investindo na construção de uma planta de geração de fosgênio para produção no próprio local. Para entender melhor os perigos envolvidos em cada projeto, os engenheiros da DuPont realizaram uma avaliação de risco considerando quatro casos:

1. Operação com alimentação de fosgênio líquido dos cilindros
2. Vaporização da alimentação dos cilindros
3. Instalação de uma planta para fabricar fosgênio a partir de CO e Cl<sub>2</sub>
4. Isolamento da planta de fosgênio (em um edifício totalmente isolado com um purificador de ar)

A partir de cada caso, o time fez uma análise preliminar dos riscos de fatalidade envolvidos em cada um, considerando fatalidades no local da planta e fora por 10.000 anos (Tabela 3).

Tabela 3 – Análise preliminar de risco feita pela equipe de Engenharia da DuPont, em 1988.

<b>Caso</b>	<b>Fatalidades no Local/10.000 anos</b>	<b>Fatalidades fora do Local/10.000 anos</b>
1	244	10,5
2	154	0,22
3	16,7	0,007
4	2,3	0,006

Fonte: CSB, 2011 (Adaptado)

O caso 4 foi estimado como sendo o de menor risco, mas a avaliação de risco concluiu que o investimento estaria fora das circunstâncias da empresa, optando então pelo caso 3: a planta de geração de fosgênio a partir de CO e Cl<sub>2</sub>. Contudo, o projeto foi abandonado durante a construção e o Caso 2 passou a ser a configuração

vigente em Belle. É importante ressaltar que o Caso 2 apresenta aproximadamente 9 vezes mais chance de fatalidade que o Caso 3.

#### **4.4.10 Gestão do conhecimento**

De acordo com a Sociedade Brasileira de Gestão do Conhecimento (SBGC), memória corporativa "é todo o dado, informação e conhecimento criado durante a existência de uma organização. Inclui os processos organizacionais, artefatos utilizados, responsabilidades e tecnologias empregadas, visando registrar de forma acessível o acervo de conhecimento da organização". Leavitt e March (PEREIRA, 2013) tratam a memória corporativa como "Regras, procedimentos, tecnologias, crenças e culturas são conservadas através de sistemas de socialização e controle. São recuperados através de mecanismos dentro de uma estrutura de memória. Tais instrumentos organizacionais não só gravam a história, mas também formam seu caminho futuro, e os detalhes desse caminho dependem significativamente do processo pelo qual a memória é mantida e consultada". Já para Ackerman e Malone (1990) "Memória organizacional como uma capacidade da organização para se beneficiar de experiências passadas, respondendo de forma mais efetiva, rápida ou acurada, diante de um problema do presente".

Os funcionários da DuPont relataram à CSB que muitos dos trabalhadores detentores de considerável conhecimento e expertise nas operações e manutenção da planta haviam se aposentado ou estavam se aproximando da idade de aposentadoria. De 2005 até o final de 2009, 82 funcionários da unidade se aposentaram e 14 foram desligados da corporação. A perda de conhecimento específico da fábrica, ou "perda de memória corporativa", contribuiu para vários incidentes na indústria (CCPS, 1995), pois novas contratações não podem substituir anos de experiência; assim, as empresas devem treinar e supervisionar novos funcionários até que adquiram competências de trabalho para trabalhar com segurança. Um funcionário do departamento de manutenção disse aos investigadores da CSB que o time de manutenção reportou a quatro diferentes líderes de manutenção nos últimos 5 anos antes do evento de janeiro de 2010. Outros funcionários

expressaram a preocupação de que as novas contratações gastaram muito pouco tempo aprendendo com funcionários veteranos.

Os investigadores da CSB revisaram e compilaram dados da força de trabalho da planta da DuPont em Belle e, ao longo dos 4 anos, entre janeiro de 2005 e junho de 2010, houveram 85 aposentadorias totalizando 2.572 anos de experiência com uma média de 30 anos de serviço por funcionário. Entre os 85, 20 foram do departamento de manutenção, contribuindo para uma perda total de 713 anos de conhecimento e experiência.

## 5 APLICAÇÃO DE BOW TIE PARA A UNIDADE SLM DA PLANTA DE BELLE DA DUPONT

### 5.1 CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA BOW TIE PARA A UNIDADE

A unidade SLM da planta de Belle da Dupont, onde ocorreu o acidente com o fogsênio, possui diversos fatores que comprometem a segurança da unidade. Neste capítulo será elaborada uma proposta de diagrama *Bow Tie* para o processo de alimentação de fogsênio à linha de produção da unidade baseado no sistema vigente da época. O objetivo foi verificar quais barreiras falharam para a ocorrência do acidente, entender os fatores humanos relacionados com essas falhas e propor ideias que possivelmente manteriam o sistema de segurança válido, impedindo a ocorrência do evento. É importante ressaltar que só é possível desenvolver um diagrama *Bow Tie* de qualidade e de boa representatividade se todo o processo e suas variáveis forem conhecidas, o que não é o caso. Após o acidente e suas investigações, muitas informações da planta de Belle foram compartilhadas com o mundo, mas nem tudo foi a público. Portanto o objetivo deste capítulo não é ser completamente assertivo no *Bow Tie* completo, mas evidenciar que essa ferramenta poderia ter sido aplicada para a prevenção de eventos indesejados.

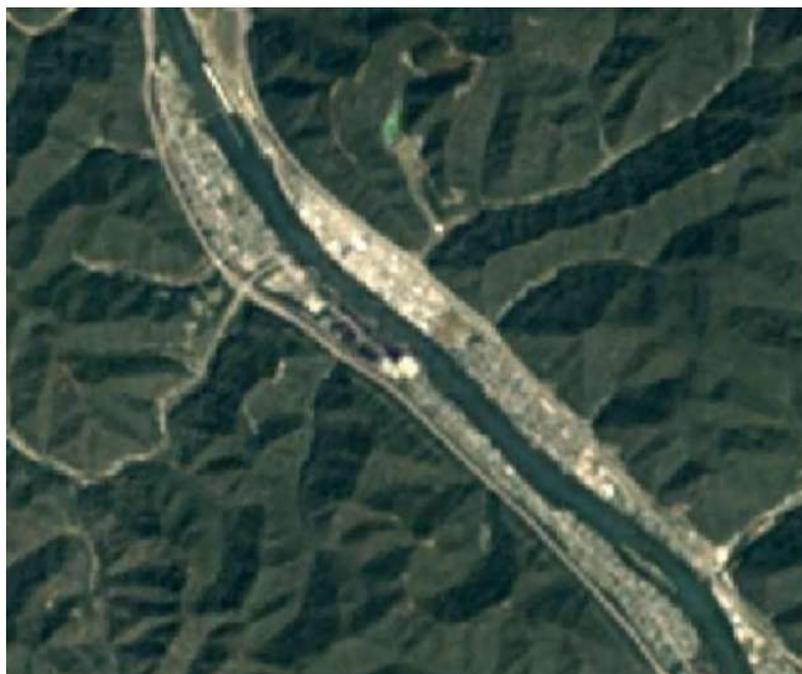
A primeira etapa da elaboração de um *Bow Tie* é definir o perigo do processo, que é o início do diagrama. No caso, será considerado como “Perigo” o manuseio de fogsênio no processo produtivo da unidade. O fogsênio é um composto químico tóxico para o ser humano mesmo em baixas concentrações e o processo produtivo da unidade possuía fases onde o operador manuseava cilindros contendo o composto. De acordo com a CSB, o fogsênio possui uma dose letal de 3 ppm por 170 min. Na Figura 18 está sendo ilustrado o primeiro passo na criação do diagrama, que é a definição do perigo que será analisado dentro do processo.

Figura 18 – Perigo do processo como sendo o manuseio do fosgênio.



O “Evento Principal” no *Bow Tie* é o acontecimento que a organização busca garantir que nunca ocorrerá pois pode ter desdobramentos catastróficos. O vazamento de fosgênio do processo será o evento principal nesse *Bow Tie*. O perigo relacionado ao uso do fosgênio é a sua liberação para o ambiente devido à sua alta toxicidade, podendo acarretar danos à saúde do ser humano. A inalação do fosgênio é a forma mais provável de exposição e pode resultar em falhas no sistema respiratório do indivíduo. Como o fosgênio é um gás a temperatura ambiente e tóxico, mesmo em baixas concentrações, a liberação para a atmosfera se torna crítica pois as correntes de ar podem carregar o composto para áreas mais populosas, com potencial de comprometer a saúde de comunidades vizinhas e se tornar um problema de saúde pública. No caso, a planta de Belle está localizada em uma área não isolada, com presença industrial, comercial e residencial (Figura 19 e 20).

Figura 19 – Visão superior, via satélite, da região de Belle, em 2010. Local relativamente povoado, com indústrias e outras construções ao longo do Rio Kanawha.



Fonte: Google Earth

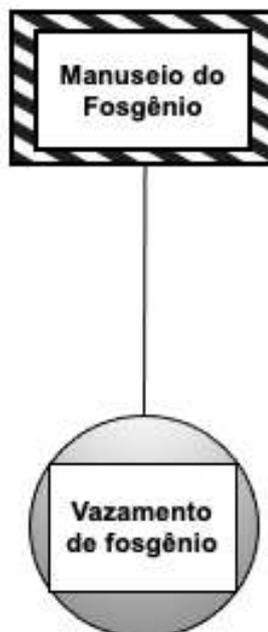
Figura 20 – Visão superior, via satélite, da região de Belle, em 2022. A marcação no mapa mostra a localização da planta da Dupont (Chemours Belle Plant).



Fonte: Google Earth

Na Figura 21 consta a representação do vazamento de fosgênio como evento principal.

Figura 21 – Evento principal considerado como sendo “Vazamento de fosgênio”.

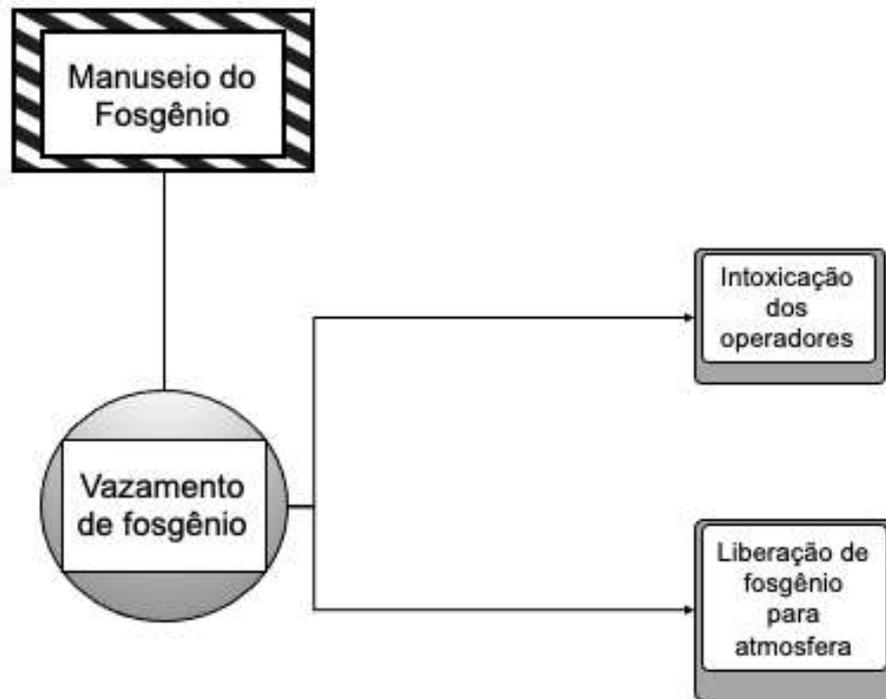


As “Consequências” a serem incluídas no diagrama são cenários negativos que podem acontecer após a perda de controle do “Perigo”. Definir todas as consequências não é um processo trivial, pois prever tudo que pode acontecer com a

ocorrência do evento principal envolve muitas variáveis, muitas delas desconhecidas. Como o *Bow Tie* é uma metodologia gráfica e visual, a abordagem é incluir apenas as principais consequências para manter o diagrama visualmente simples e compreensível. Considerando o acidente ocorrido e relatado no Capítulo 4, é evidente que a primeira consequência a ser citada é a intoxicação dos operadores da unidade. Como a toxicidade está relacionada à concentração, baseado em modelos já estabelecidos e validados de dispersão de gás, como o de Pasquill Gifford (CROWL; LOUVAR, 2014), entende-se que quanto mais próximo do ponto de vazamento maior a concentração do composto tóxico, portanto, em caso de vazamento, os operadores que trabalham próximos aos cilindros de fosgênio serão expostos a concentrações mais elevadas do químico.

Uma outra consequência é a liberação de fosgênio para a atmosfera, porém é humanamente impossível prever tudo que pode acontecer em decorrência do fato. Contudo, a inclusão desse cenário no *Bow Tie* é especialmente importante por dois motivos. Primeiro, pois pode gerar contaminação da população localizada próxima à origem do vazamento. O fosgênio é um gás incolor, e de acordo com o relatório da CSB, o ser humano só é capaz de sentir o odor do fosgênio a partir de 0,4 ppm, porém a concentração em que o mesmo passa a ser considerado insalubre em uma jornada de trabalho de 8 horas é de 0,1 ppm (CSB, 2011). Ou seja, podem existir situações onde o ser humano está sendo contaminado por fosgênio, porém não consegue sentir o seu cheiro. Ademais, o índice IDLH (*Immediately Dangerous to Life or Health Air Concentration* ou Imediatamente Perigoso à Vida ou à Saúde), que representa a concentração máxima de uma substância no ar, na qual um trabalhador saudável, do sexo masculino, pode ficar exposto por 30 minutos e ainda ser capaz de escapar sem perda da vida ou dano irreversível à saúde, do fosgênio é de 2 ppm (CDC, 2014). O outro motivo é a localização da planta de Belle, situada em uma área com outras indústrias ao seu redor. Não se sabe como o fosgênio pode impactar os processos dessas outras empresas ao redor, porém é possível preventivamente supor que o fosgênio em forma de gás pode reagir com outros compostos e as consequências podem ser infinitas. Portanto, a liberação do químico para a atmosfera está sendo considerada como outra “Consequência” do “Evento Principal”, ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Consequências consideradas caso haja perda de controle do perigo associado.

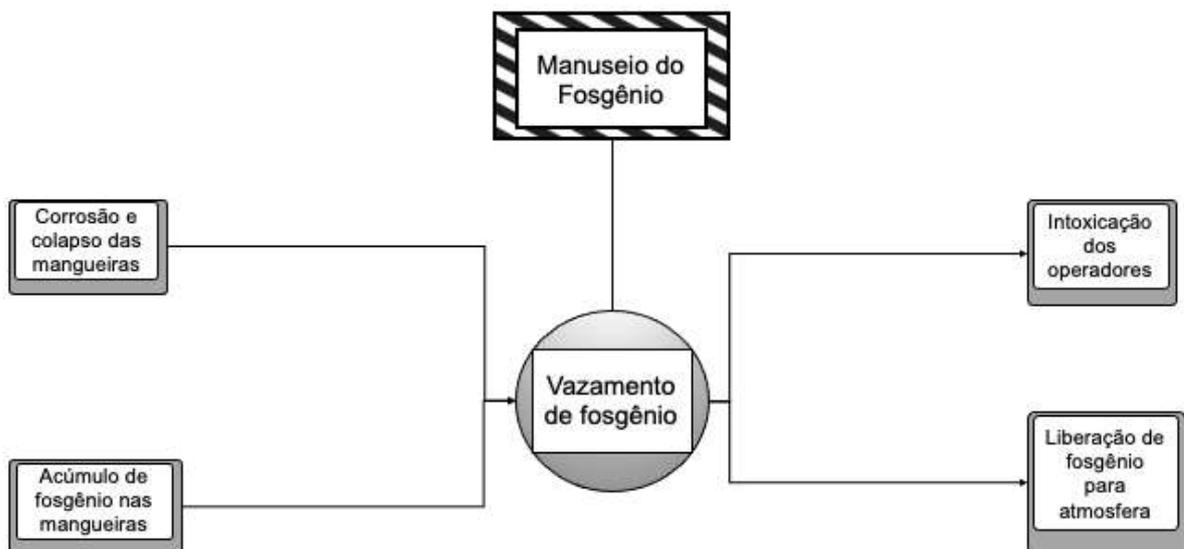


As “ameaças” à segurança do processo são os fatores que podem originar a perda de controle do perigo, com potencial de ocasionar o evento principal. No cenário estudado, foram identificadas algumas ameaças que poderiam resultar no vazamento de fosgênio. Diretamente conectado à elas estão as “barreiras de prevenção”, que são as medidas que a organização implementou buscando garantir que aquela ameaça não ocasionará o evento principal.

Como o acidente ocorreu devido ao rompimento de uma mangueira de transferência do fosgênio, a corrosão da mangueira será considerada como uma ameaça ao processo. A Dupont possuía conhecimento que a mangueira era um fator importante na garantia da segurança da unidade SLM e por isso definiu em procedimento operacional padrão a troca de tais mangueiras a cada 30 dias. Para isso, existia uma rotina no SAP que emitia ordens de serviço nessa frequência que notificavam a equipe de manutenção a fazer as trocas. Contudo, foi identificado que em 2006 houve uma alteração no software que interrompeu a emissão dessas ordens e assim permaneceu até o momento do vazamento. Apesar da Dupont ter conhecimento que uma barreira era necessária para garantir a integridade das mangueiras, não havia nenhuma barreira vigente nos anos que precederam o evento.

O processo de troca da alimentação dos dois cilindros em atividade na unidade também contém em si uma ameaça ao processo caso seja executado de maneira errada. Segundo o relatório da CSB, a troca era feita quando o cilindro esvaziava por completo. Estes eram posicionados em cima de uma balança e um alarme na sala de controle da unidade indicava ao operador quando o cilindro estava quase vazio, baseado em seu peso. Nesse momento, o operador efetuava a troca do cilindro de alimentação do processo. No procedimento correto, segundo a CSB, o operador fechava as duas válvulas do cilindro vazio e abria as duas válvulas do cilindro completamente cheio ao lado. A mangueira do cilindro vazio era então purgada com nitrogênio permitindo que fosse desconectada. Em condições normais de operação, essa atividade acontecia de duas a três vezes por dia. No caso do acidente, a válvula da mangueira foi fechada sem ser purgada, aumentando a pressão no interior da mangueira conforme o líquido remanescente aquecia. Após um tempo, a mangueira colapsou e liberou fosgênio remanescente para o ambiente. Portanto, no diagrama *Bow Tie*, o acúmulo de fosgênio nas mangueiras é uma ameaça à segurança do processo (Figura 23).

Figura 23 – Ameaças consideradas, à esquerda do diagrama, que podem ocasionar a perda de controle do perigo.



Em um processo com um sistema de segurança robusto existem barreiras ligadas tanto às ameaças quanto às consequências para prevenir ou mitigar o evento principal. No caso estudado é possível identificar algumas barreiras em vigência no

momento do acidente, mas nem todas as ameaças e consequências possuíam tratativas. Abordando a ameaça “Corrosão e colapso das mangueiras”, a organização possuía duas formas de reduzir o risco do rompimento das mangueiras de fosgênio. Primeiro, estabelecia em um manual os materiais que deveriam ser usados nas mangueiras; segundo, definiu em procedimento operacional de segurança que houvesse uma rotina de troca de mangueiras a cada 30 dias. A partir do relatório de investigação da CSB, é possível concluir que a unidade SLM utilizava mangueiras em desacordo com o descrito no manual e as mangueiras eram trocadas esporadicamente, não havendo um processo robusto vigente. Devido a tal negligência por parte da empresa, esses fatores não serão considerados como barreiras uma vez que não estavam implementados na planta de Belle. Não foram identificadas outras barreiras que prevenissem a ocorrência do vazamento devido à corrosão e colapso das mangueiras. Quanto à ameaça “Acúmulo de fosgênio nas mangueiras”, a purga com nitrogênio que era executada pelos operadores será considerada como uma barreira preventiva pois reduz a probabilidade de ocorrência da ameaça se praticada corretamente. Essa atividade estava descrita no procedimento operacional de segurança de troca de cilindros e é possível inferir pelo relatório da CSB que o mesmo era seguido, apesar do acidente.

Para a consequência “Intoxicação dos operadores” existiam duas barreiras mitigadoras no processo: uso de EPI e o sistema de alarmes. Como descrito em procedimento operacional de segurança, a operação na unidade SLM demandava o uso obrigatório de EPIs, onde o acervo variava de acordo com a atividade a ser executada. A CSB relata que, durante o acidente, o operador estava utilizando os EPIs obrigatórios para a atividade de pesagem do cilindro. Havia também na unidade um sistema de sensores que detectava a concentração de fosgênio no ambiente e emitia um alerta para o operador na sala de controle, para que ele acionasse alarmes visuais e sonoros e notificasse o vazamento de gás aos seus colegas da unidade e ao restante da fábrica. Os alarmes indicavam a necessidade de evacuação daquela área. Apesar da sua eficiência depender de ação humana, o sistema de alarme da unidade SLM também pode ser considerado uma barreira mitigadora.

Em relação à outra consequência mapeada, “Liberação de fosgênio para a atmosfera”, o design do galpão de fosgênio não foi projetado para conter vazamentos.

Como o fosgênio é um gás nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP) e o galpão era aberto, o fosgênio tinha total condições de se difundir pelo ar ambiente e atingir a atmosfera. Não haviam barreiras mitigadoras para esse cenário (Figura 24).

Figura 24 – Representação das ameaças e consequências, à esquerda e direita, respectivamente, bem como suas barreiras de prevenção e mitigadoras para o caso no diagrama *Bow Tie*.



Com a definição das barreiras existentes, é possível seguir para o próximo passo: entender quais fatores afetam negativamente e quais contribuem para a sua integridade. Em outras palavras, serão definidos os fatores de degradação das barreiras e seus controles de degradação, com base no relatório de investigação da CSB.

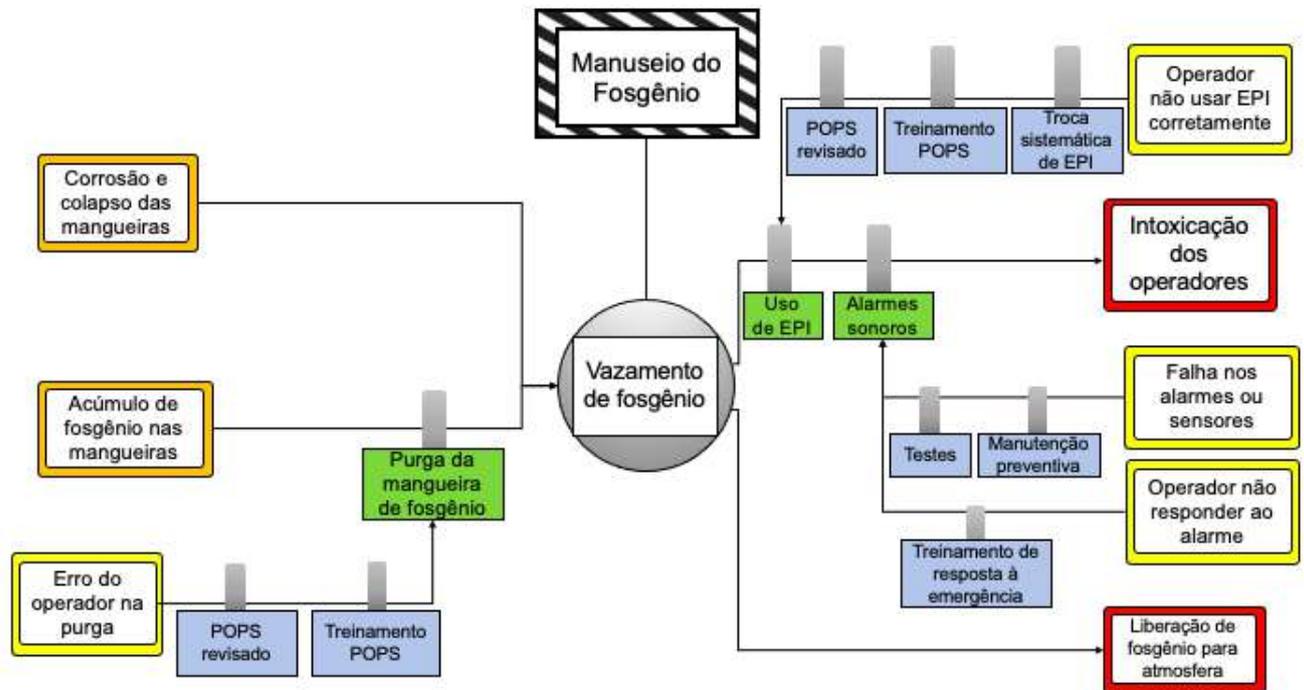
A barreira “Purga da mangueira de fosgênio”, definida no *Bow Tie* da Figura 24, é responsável por eliminar o fosgênio remanescente nas mangueiras e é uma tarefa executada pelos operadores da unidade. Essa tarefa estava descrita no procedimento operacional padrão de segurança da unidade: após o cilindro em operação esvaziar completamente, o operador fechava suas válvulas e abria as válvulas do cilindro cheio ao lado. Depois, realizava a purga da mangueira com nitrogênio para garantir que não havia fosgênio acumulado no cilindro ou na mangueira e, dessa forma, o operador poderia substituir o cilindro na balança com segurança. Considerando que a atividade é completamente dependente da execução correta do operador, o seu erro será

considerado como um fator de degradação dessa barreira, já que compromete a sua atuação. Para mitigar a possibilidade do operador errar no processo de troca do cilindro, havia em vigência um procedimento operacional padrão que descrevia o processo, e nele a atividade de purga estava inserida e descrita. Porém, não havia a atividade de dupla checagem, que consiste em uma pessoa executar a operação e uma segunda checar essa operação que foi feita; é uma forma clássica em segurança de processos de reduzir a chance de erro humano.

Quanto à barreira “Uso de EPI obrigatório”, há dois fatores de degradação. Primeiro, o operador não utilizar os devidos EPI por algum motivo compromete a barreira, e por isso havia na unidade um documento que determinava quais EPIs eram obrigatórios, dependendo da atividade a ser realizada no galpão de foscênio. Segundo, o EPI não estar em condições ideais de utilização pode invalidar a sua capacidade de proteger o funcionário. Na investigação da CSB nada foi comentado sobre a qualidade dos EPI utilizados pelos operadores, portanto, assume-se que não foram identificadas nenhuma inconsistências relacionadas a esse tema e que havia na unidade um sistema de gerenciamento de EPIs em funcionamento.

Já o sistema de alarmes também conta com dois fatores de degradação: um humano e um de hardware. Se o operador na sala de controle não responder adequadamente ao que for indicado pelo alarme, o sistema não surte efeito. Por isso, esse operador deve estar devidamente capacitado e treinado para tomar as devidas providências quando o alarme soar indicando vazamento de foscênio. Isso poderia ser atingido com um procedimento de emergência bem estabelecido e o treinamento periódico do operador responsável por executá-lo. Por outro lado, se o alarme ou os sensores que o ativam falham, o operador não conseguirá identificar que algo está errado com o processo. Para isso, a planta deveria ter em vigor sistemas que garantam o bom funcionamento dos sensores e alarmes, onde houvesse manutenção preventiva e periódica destes equipamentos, assim como testes que validassem a integridade do sistema. A CSB cita evidências de que os alarmes na sala de controle indicaram concentrações de foscênio elevadas em vários pontos da fábrica. Com o levantamento de todas essas informações, o diagrama *Bow Tie* final para o sistema da unidade SLM foi elaborado e está representado na Figura 25.

Figura 25 – Representação final do diagrama *Bow Tie* para o processo de manuseio do fosgênio da unidade SLM.



## 5.2 AVALIAÇÃO DO BOW TIE DESENVOLVIDO

Com o estudo da metodologia *Bow Tie* e avaliação minuciosa do cenário completo do acidente foi possível desenvolver o diagrama da Figura 25. Nele estão representados todos os itens de *Bow Tie* de forma simples e objetiva. É importante ressaltar que a base para a elaboração foi o relatório do acidente, e imagina-se que nem todos os fatores de segurança da unidade foram contemplados pela CSB. É plausível considerar que haviam, além do que foi incluído no diagrama, outras condições inseguras na unidade que não foram divulgadas ao público. Portanto, para elaborar um diagrama *Bow Tie* completo da unidade e que represente fielmente o seu sistema de segurança, é necessário um conhecimento mais avançado do processo e suas variáveis. Como nem todas as informações da planta da Dupont foram divulgadas, o *Bow Tie* se restringe às informações descritas no relatório do acidente.

O objetivo do *Bow Tie* é informar, visualmente, um leitor sobre como o sistema de segurança daquele processo funciona e como seus fatores se relacionam entre si, buscando deixar evidente quais são as barreiras existentes naquele sistema, o que compromete a integridade delas e o que deve ser feito para garantir que elas se mantenham íntegras (CCPS, 2018). Dito isso, a aplicação da metodologia se mostrou útil na representação do cenário estudado, pois a partir dele é possível identificar que:

- a. O processo possui poucas variáveis;
- b. Há poucas ameaças e consequências envolvidas, o que tende a tornar o sistema mais simples;
- c. Há uma ameaça que não possui barreiras preventivas atreladas, logo, pode ocasionar o evento principal;
- d. Há uma consequência que não possui barreira mitigadora atrelada, portanto caso o evento principal ocorra, nada impede a ocorrência do cenário indesejado, ou reduz sua magnitude;
- e. As barreiras existentes podem ser degradadas, porém existem controles que dificultam ou retardam a degradação.

Com uma análise macro do diagrama já é possível afirmar que a metodologia *Bow Tie* aplicada provê informação considerável para o sistema de gestão da unidade a respeito das condições de segurança do processo. Nesse cenário, fica evidente que nem todos os riscos existentes estão sendo devidamente abordados, portanto algo deve ser feito para eliminar as inconsistências encontradas. Supondo que um diagrama, como ilustrado na Figura 25, tivesse sido apresentado aos responsáveis pela planta de Belle, imagina-se que identificariam que o sistema não era robusto e ações deveriam ser tomadas para melhorar as condições existentes. Para atingir conclusões ainda mais assertivas e detalhadas, uma análise crítica das individualidades do diagrama é necessária.

### 5.3 FATORES HUMANOS E O BOWTIE DA UNIDADE SLM

Ao aplicar a metodologia, a recomendação de Crowl (2007) de considerar os fatores humanos como fatores ou controles de degradação foi seguida com o objetivo de gerar um diagrama mais robusto. Com isso, os fatores humanos não foram considerados como ameaças ao sistema, tampouco como barreiras. Com o diagrama *Bow Tie* elaborado é possível identificar que os fatores humanos apresentam interação com a maioria dos componentes do sistema de segurança da unidade, portanto a atividade humana pode comprometer a sua integridade de diferentes formas, assim como contribuir positivamente.

Os fatores humanos se apresentam neste *Bow Tie* em ambos os lados do diagrama, apresentando relações diretas tanto com as ameaças ao processo de manuseio do fogsênio, como com as consequências. Sobre as ameaças, a barreira preventiva “Purga da mangueira de fogsênio” era uma atividade executada pelo ser humano e era passível de falha, como ocorreu no evento do acidente. Essa falha consta no diagrama como um fator de degradação da barreira: a não execução da purga da mangueira no momento correto, explicitado no POPS, poderia ocasionar o vazamento de fogsênio, e a causa mais provável para esse processo falhar seria um erro do operador. Para garantir que o operador não errasse essa etapa de purga, um POPS revisado e atividades de treinamento contribuíam para a execução correta da atividade. Contudo, no evento do acidente, o que levou o operador à falha foi uma atividade não rotineira não contemplada no POPS, onde ele errou na avaliação do risco existente. Provavelmente o operador não possuía total conhecimento do motivo das suas atividades serem feitas daquela forma, e não tinha o treinamento necessário para entender os riscos associados, o que contribuiu para o acidente. Os dois controles de degradação existentes e descritos no *Bow Tie* (POPS revisado e Treinamento POPS) não foram suficientes para garantir a integridade do procedimento de purga da mangueira de fogsênio.

Em relação à corrosão e colapso das mangueiras, as mesmas eram trocadas esporadicamente, apesar de terem uma frequência definida nos manuais de operação, essa troca não era respeitada e seguida, muito por causa da falha no SAP

- que era justamente o sistema automatizado que emitia os alertas para o operador, sinalizando o momento que a troca deveria ocorrer. Com isso, seria importante a verificação periódica e devida manutenção e atualização do sistema automatizado já imposto. Dessa forma, com um processo automático funcionando devidamente, uma atividade a menos estaria suscetível à falha humana, uma vez que excluiria dos funcionários a responsabilidade de julgar e/ou avaliar quando as mangueiras deveriam ser trocadas, tornando o sistema mais confiável.

O uso do EPI corretamente pelo operador também está sujeito aos fatores humanos, uma vez que os responsáveis pelo uso dos equipamentos de proteção são os próprios funcionários. O uso inadequado pode ocorrer por: lapsos de memória onde o funcionário esquece de utilizar algum EPI durante a atividade, violação das regras, uso incorreto por falta de conhecimento, EPI defeituoso ou mal dimensionado. Dito isso, o uso inadequado de EPI pelo operador foi considerado como um fator degradante da barreira "uso de EPI" e para aumentar a sua confiabilidade foram incluídos controles de degradação que agem diretamente sobre a ação humana. Com um sistema robusto de troca de EPIs e os funcionários devidamente capacitados para entender o motivo de usá-los, espera-se que o uso seja consciente e correto.

A barreira "alarmes sonoros" possui interação entre hardware e seres humanos. O hardware detecta a concentração de fogsênio no ambiente e envia um sinal para o homem tomar a decisão e agir. Entretanto, essa tomada de decisão e consequente ação devem ser premeditadas dentro da organização. O funcionário já deve conhecer os cenários possíveis e como atuar em cada um deles. Para aumentar as chances do funcionário decidir e agir de forma correta, é necessário treinamento e reciclagem periódica para reduzir a probabilidade de erro. Se o funcionário não está pronto para responder à emergência conforme a organização determina, ele é um risco para a integridade dessa barreira mitigadora, uma vez que as suas ações são fundamentais na mitigação do evento ocorrido. Por conta disso, o operador não responder adequadamente ao alarme é um fator de degradação e deve haver um controle vigente para isso: treinamento periódico ao operador.

A liberação de fogsênio para o ambiente não possuía barreira atrelada por conta de fatores organizacionais. Durante o desenvolvimento do design da unidade, foram avaliados cenários mais seguros que o vigente na planta, porém, por questões

não divulgadas, a organização interrompeu a construção de uma planta interna de fabricação de fosgênio, cenário avaliado como de melhor custo-benefício. Nesse momento, poderia ter seguido com um cenário mais seguro que o planejado ou outro menos seguro. A empresa decidiu seguir com o uso de cilindros de fosgênio sem enclausuramento ou depurador de ar, cenário menos seguro e de menor custo. De acordo com a Tabela 3, a diferença entre os casos em relação à fatalidades fora da fábrica é de 0,14 em 10.000 anos, portanto, se tratando isoladamente do risco de liberação de fosgênio para a atmosfera é compreensível a decisão da empresa de seguir com o cenário de menor custo. De acordo com a avaliação da empresa, o cenário escolhido apresenta baixo risco para a população ao entorno da fábrica, já que apresenta somente 0,22 fatalidades a cada dez mil anos.

#### 5.4 PROPOSTA DE MELHORIAS NO SISTEMA DE SEGURANÇA DA UNIDADE SLM

As inconsistências de segurança encontradas a partir da elaboração do *Bow Tie*, apresentado na Figura 25, foram cruciais para entender que o sistema da unidade SLM era falho, e que existiam oportunidades para torná-lo mais robusto. Será, então, elaborada uma proposta de melhoria que possivelmente tornaria o cenário mais seguro.

Primeiramente, avaliando a ameaça que não possuía barreira atrelada, “Corrosão e colapso das mangueiras”, é importante citar que, até 2006, havia uma barreira vigente. O processo de emissão de ordens de serviço periódicas do sistema SAP para indicar aos funcionários da unidade a necessidade de troca das mangueiras de fosgênio era mandatário, pois a automação contribui para redução de chance de falha humana. Esse sistema de notificação somado a um processo de substituição da mangueira será considerado como barreira preventiva. Para essa barreira, será considerado que uma falha no SAP que interrompa esse fluxo periódico é um fator de degradação, e para garantir que a barreira permaneça íntegra, o SAP poderia ser

auditado periodicamente para garantir que as ordens continuariam sendo emitidas na frequência correta.

Tratando-se da ameaça “Acúmulo de fogsênio nas mangueiras”, seria importante incluir uma atividade de auditoria periódica do processo de purga, realizada por um supervisor, com o objetivo de verificar se o processo está sendo devidamente cumprido de acordo com o POPS. Essa atividade será adicionada ao *Bow Tie* como um controle de degradação. Além disso, entendendo o acidente ocorrido, é importante que seja incluído no procedimento operacional um item que aborde o que deve ser feito em casos de atividades não rotineiras, para que o operador entenda que há riscos existentes. Se o operador tivesse a orientação de, por exemplo, convocar os seus supervisores para avaliar condições não rotineiras, talvez alguém tivesse identificado a necessidade de adaptação do fluxo do processo com a nova condição.

Com o intuito de reduzir as chances de intoxicação dos operadores em caso de vazamento, era possível enclausurar a área do processo onde os cilindros de fogsênio se localizavam, com o objetivo de reduzir o contato com os funcionários da fábrica. Além disso, um depurador de ar também poderia ser instalado, como existe na unidade de Mobile, que é capaz de filtrar o ar e assim reduzir a possibilidade de contato do fogsênio gasoso com o ser humano. Essas medidas seriam úteis tanto para o contato imediato aos operadores próximos ao vazamento como para a liberação de fogsênio para a atmosfera. Um fator de degradação do depurador de ar seria o desgaste normal com o uso, e um controle de degradação coerente à isto seria manutenção preventiva do mesmo, em momentos de parada do processo do fogsênio.

Quanto ao uso de EPI obrigatório, uma auditoria periódica realizada por um responsável técnico de segurança da fábrica também contribuiria para garantir que os operadores da unidade utilizassem os EPI corretos e conforme o procedimento padrão, sendo então um controle de degradação para o fator “Operador não utilizar EPI corretamente”. Além disso, tendo em vista o acidente ocorrido, se a vítima imediata estivesse utilizando o acervo de EPIs mais robusto (utilizado para atividades específicas na unidade) é plausível pensar que talvez a contaminação não ocorresse com a severidade que foi e o colaborador, talvez, não fosse a óbito. O uso desses EPI's no dia a dia certamente traria mais complexidade para o operador executar suas

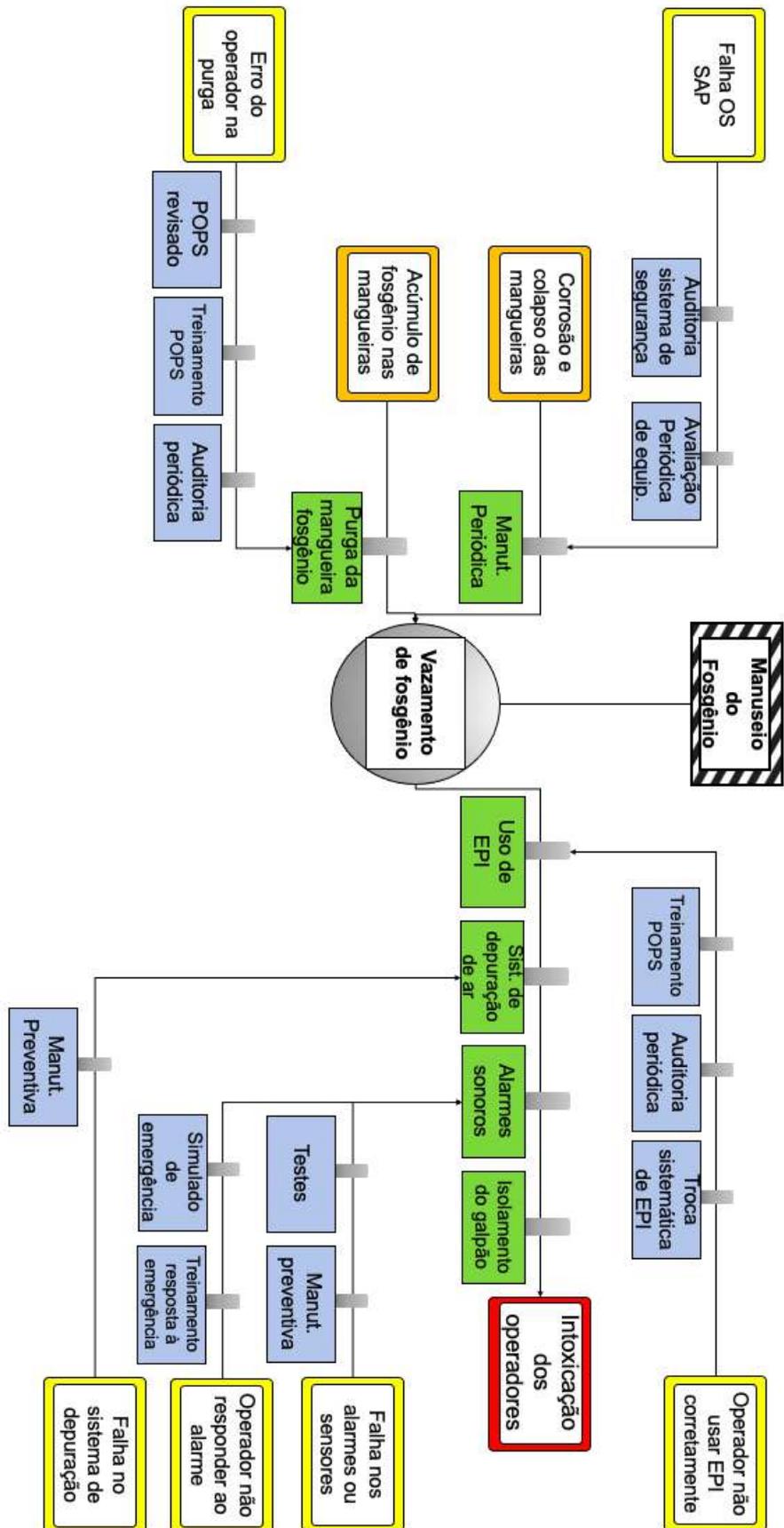
atividades, porém o deixaria menos suscetível à níveis de contaminação que podem causar danos mais severos à saúde.

Para fortalecer a resposta do operador à emergência, outro controle de degradação poderia ser incluído no sistema. Associado ao treinamento ao operador, poderia haver na fábrica simulados periódicos de emergência onde ele pudesse colocar em prática as orientações e vivenciar uma situação que simulasse uma emergência. No ambiente fabril, os funcionários do local costumam ser treinados em como proceder em casos de emergência, porém é importante que haja simulados práticos das situações que podem ocorrer para que o operador esteja mais preparado para um evento real. Treinamentos e experiências práticas de resposta à emergência são fundamentais pois preparam os funcionários a agirem sob pressão.

Como último passo, a consequência “Liberação de fogsênio para a atmosfera” deve ser abordada para que essa proposta de *Bow Tie* contemple todas as inconsistências identificadas no sistema. O objetivo do diagrama é representar apenas os principais riscos do processo, para mantê-lo sucinto e de fácil compreensão. Dito isso, considerando a análise de cenários realizada na fase de design da unidade, não há necessidade de incluir a liberação de fogsênio para a atmosfera como uma consequência no *Bow Tie*. De fato, é uma consequência do evento principal, mas seu índice de 0,22 fatalidades a cada 10.000 anos é baixo. Neste cenário, é estimado que ocorreria uma morte a cada 45.000 anos, aproximadamente. Com isso, entende-se que não há necessidade de incluir a liberação de fogsênio para a atmosfera no *Bow Tie*. O fato de não terem sido evidenciados problemas de saúde nas populações ao redor da fábrica também corrobora para a retirada desse item do *Bow Tie*.

Com essas medidas incluídas no sistema de segurança do processo do fogsênio, como mostrado na Figura 26, espera-se obter uma unidade mais segura para os trabalhadores da fábrica e da população vizinha. Não é possível afirmar que o acidente ocorrido em 2010 não aconteceria com a implementação dessas novas soluções propostas, porém, qualitativamente, a unidade se mostraria mais robusta, com mais barreiras e controles de degradação que dificultariam a ocorrência dos cenários indesejados.

Figura 26 – Representação final do diagrama *Bow Tie* sugerido para a unidade SLM.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A elaboração e desenvolvimento deste trabalho proporcionou uma análise dos fatores humanos aplicados à ferramenta *Bow Tie*, bem como as vantagens e percepção de algumas limitações quando aplicado a um acidente na indústria. Trata-se de uma ferramenta com diferentes possibilidades de abordagens e, de acordo com o caso aplicado, diferentes influências também sobre a segurança de processos.

O *Bow Tie* se provou uma metodologia simples e objetiva, focada na informação visual, indicando ao leitor quais são as partes mais importantes do sistema de segurança de um determinado processo, e o que deve ser bem controlado e mantido para que a integridade desse sistema permaneça nos níveis aceitáveis. É importante notar que a elaboração do *Bow Tie* deve ser associada a outras ferramentas de gestão da segurança, principalmente aquelas que qualificam e quantificam os riscos. Assim, os maiores riscos envolvidos no processo devem ser tratados e acompanhados de perto.

Para obter um diagrama *Bow Tie* que corresponde fielmente ao processo e que cobre todos os riscos inaceitáveis mapeados, é fundamental que haja uma avaliação do comportamento humano e como ele interage nesse ambiente. O ser humano é intrinsecamente sujeito à falha, e é mandatário que o sistema de segurança seja projetado para que seja à prova da falha humana. O ideal é que os fatores humanos sejam considerados em todas as fases da unidade, desde o design até o seu descomissionamento, com o objetivo de reduzir a probabilidade da falha humana resultar em um evento catastrófico.

Por outro lado, os seres humanos também são capazes de contribuir positivamente para os sistemas, fazendo parte de barreiras ou controles de degradação. Além disso, com a vivência e uma cultura de melhoria contínua, são os seres humanos que identificam e propõem novas soluções para o processo buscando ainda maiores níveis de segurança. Ao inserir os fatores humanos no *Bow Tie*, considerá-los como fatores e controles de degradação do sistema é uma abordagem mais moderna, pois mostra como o ser humano pode contribuir negativamente para a

integridade do sistema, ou como ele atua para garantir que o sistema se mantem íntegro, confiável e seguro.

O estudo de caso possibilitou analisar algumas das possíveis falhas atreladas a fatores humanos que levaram ao evento final ocorrido na planta da Dupont, em Belle, West Virginia. Como apresentado na proposta de melhoria do diagrama *Bow Tie* da unidade SLM, e de acordo com a sugestão de diagrama que estaria vigente na época, a ausência de comunicação eficaz entre os próprios colaboradores e as plantas mencionadas (Belle e Mobile), bem como a falta de robustez e capacitação do time de operação da unidade - quando se trata de análise de riscos críticos e suas prevenções -, foram pontos importantes percebidos através do presente estudo, para que falhas ocorressem, chegando ao evento final catastrófico.

Dessa forma, a proposta de melhoria no sistema supostamente vigente deu enfoque para as barreiras mitigadoras, com o objetivo principal de redução ou prevenção de danos e perdas, retomando o controle de todo o processo caso o evento principal viesse a ocorrer. Além disso, recursos de treinamento e simulados para preparo e capacitação do time operacional foram priorizados para que, em casos emergenciais, a equipe esteja mais bem preparada para agir de maneira rápida e eficaz. Com a finalização da proposta de *Bow Tie*, analisando visualmente o diagrama, percebe-se que existem diferenças relevantes quando comparado ao cenário vigente da época. Fica claro, também, quais são as barreiras do processo e como elas são mantidas íntegras. Por fim, baseado no *Bow Tie*, a organização é capaz de estabelecer um plano de gerenciamento dessa unidade para garantir que os fatores de degradação das barreiras estão sendo controlados, e as barreiras permanecem aptas a operar com qualidade quando necessárias.

Além disso, foi possível identificar que a empresa Dupont apresentava algumas falhas no seu Sistema de Gestão da Segurança, visto que alguns dos fatores que contribuíram para o acidente podem ser associados à negligência de condições inseguras existentes na planta. Essa análise não é possível de ser contemplada no *Bow Tie*, porém é importante citar que um ambiente de trabalho seguro não depende apenas de fatores técnicos. Por mais robusto que seja o *Bow Tie* de um processo, o mesmo não será completamente seguro se a organização não tiver um forte sistema de gestão. O CCPS (2016) elaborou o RBPS (*Risk Based Process Safety* ou,

traduzido, Segurança de Processos Baseada em Risco) consistindo em 20 elementos para melhor direcionamento em segurança de processos, assegurando cada vez mais um padrão de excelência em segurança, principalmente nas indústrias. Sendo assim, um sistema de gestão de segurança que tem como base o RBPS, organizado nos quatro pilares – Comprometimento à Segurança de Processos, Compreensão de Perigos e Riscos, Gerenciamento de Riscos e Aprender a partir da Experiência – tornaria o cenário mais robusto e mais bem preparado para contenção de eventuais imprevistos ou incidentes, com uma gestão bem mais embasada no que tange a segurança de processos. Sugere-se, com base no caso abordado, um foco maior por parte da corporação, com o objetivo de desenvolverem e fortalecerem o senso de gestão em segurança, mais bem fundamentado e pautado nos elementos de Compreensão de Perigos e Riscos e Comprometimento à Segurança de Processos, por exemplo.

Outro ponto, pontuado na proposta de Bow Tie para a unidade, é a importância de treinamento e revisão minuciosa dos POPS utilizados. Esses documentos são primordiais para a execução correta das tarefas e precisam estar muito bem escritos, bem estruturados, sem oportunidade para ambiguidade ou dupla interpretação, que podem provocar erros e incidentes, e devem ser desenvolvidos com o máximo de detalhes possível para que seja totalmente compreensível por todos os interessados e envolvidos. Esses documentos não podem ser negligenciados pela gestão de segurança, pois são imprescindíveis para um bom funcionamento e a correta execução dos procedimentos atrelados ao processo dentro de uma organização, de uma indústria.

É evidente que avaliar acidentes já ocorridos faz-se tomar posições e precauções mais bem estruturadas e robustas do que antes. Porém, é importante salientar que o que se observa com obviedade após o evento, muitas vezes é um cenário improvável de ser mapeado, dada a realidade vigente na época. Por isso, no que diz respeito a segurança de processos, é de suma importância que estudos e avaliação de riscos sejam constantes, de dentro ou fora de uma corporação, para que se construam sistemas e processos ainda mais robustos e seguros, levando em consideração o fator custo-benefício da empresa dentro de sua realidade como entidade corporativa. A busca por cada vez mais segurança nas empresas deve ser

um processo contínuo, e acidentes como o estudado são grandes oportunidades de aprendizado, uma vez que várias lições podem ser aprendidas com o ocorrido.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKERMAN, M. S.; MALONE, T. W. **Answer Garden: a tool for growing organizational memory**. In the Proceedings of the ACM Conference on Office Information Systems. Cambridge: April, 1990; p. 31-39. Disponível em: [www.eecs.umich.edu/~ackerm/pub/90b03/cois90.final.pdf](http://www.eecs.umich.edu/~ackerm/pub/90b03/cois90.final.pdf). Acesso em 06 jul. 2022.
- BARBOSA, Juarez. **Ferramenta de Gestão de Risco – Bowtie**. 2018. Disponível em: <https://consultoriaengenharia.com.br/confiabilidade-e-risco/ferramenta-de-gestao-de-risco-bowtie/>. Acesso em: 08 jun. 2022.
- CARVALHO NETO, Américo Diniz. **A OCORRÊNCIA DE ACIDENTES NO TRABALHO E SUA CORRELAÇÃO COM O ERRO E FATORES HUMANOS: estudo de caso: braskem :: unidade de insumos básicos bahia**. 2006. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Administração, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/8876/1/777.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2022.
- CCPS, 2018. 224 p. **Bow Ties in Risk Management: A Concept Book for Process Safety**. ISBN: 978-1-119-49039-5.
- CCPS, 1995. **Guidelines for Safe Process Operations and Maintenance**; American Institute of Chemical Engineers Center for Chemical Process Safety: New York, NY, 1995.
- CCPS, 2016. **Introduction to Process Safety for Undergraduates and Engineers**; Hoboken, New Jersey: John Wiley Sons, Inc., 2016. ISBN 978-1-118-94950-4. Disponível em: [https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/ip/BUKU%20MANAJEMEN%20SAFETY/SAFETY%20INDUS TRY/Introduction%20to%20process%20safety%20for%20undergraduates%20and%20engineers%20\(%20PDFDrive%20\).pdf](https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/ip/BUKU%20MANAJEMEN%20SAFETY/SAFETY%20INDUS TRY/Introduction%20to%20process%20safety%20for%20undergraduates%20and%20engineers%20(%20PDFDrive%20).pdf). Acesso em: 11 nov. 2022.
- CDC, 2014. **Phosgene IDLH**. Disponível em: <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/75445.html>. Acesso em: 02 nov. 2022.

CETESB. **Análise de risco tecnológico**. 2022. Disponível em:

<https://cetesb.sp.gov.br/analise-risco-tecnologico/conceito-de-risco/>. Acesso em: 08 ago. 2022.

CHEMICAL SAFETY BOARD (CSB). **BP America Refinery Explosion,**

**Investigation Report 2007**. Disponível em: <https://www.csb.gov/bp-america-refinery-explosion/>. Acesso em: 15 nov. 2022.

CHEMICAL SAFETY BOARD (CSB). **E.I. DuPont De Nemours & CO., INC. Belle, West Virginia. Methyl Chloride, Oleum, Phosgene Release, Investigation Report 2011**. Disponível em:

<https://www.csb.gov/assets/1/20/csb%20final%20report.pdf?13966https://www.csb.gov/dupont-la-porte-facility-toxic-chemical-release/>. Acesso em: 07 jun. 2022.

CHEMICAL SAFETY BOARD (CSB). **Formosa Plastics Vinyl Chloride Monomer Explosion, Investigation Report 2007**. Disponível em:

[https://www.csb.gov/assets/1/20/formosa\\_il\\_report.pdf?13838](https://www.csb.gov/assets/1/20/formosa_il_report.pdf?13838). Acesso em: 13 nov. 2022.

CROWL, Daniel A(ed.). **Human Factors Methods for Improving Performance in the Process Industries**. New York: Wiley-Aiche, 2007. **ISBN: 978-0-470-1 1754-5**.

CROWL, Daniel A.; LOUVAR, Joseph F. **Segurança de Processos Químicos - Fundamentos e Aplicações**. LTC, 2014.

DE PAULA LOPES, Isadora Timbó. **Gestão de Riscos de Desastres: Integrando os Riscos de Acidentes Industriais à Gestão Territorial**. 2017. Tese de

Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em:

[http://www.ppe.ufrj.br/images/Isadora\\_Timb%C3%B3\\_de\\_Paula\\_Lopes.pdf](http://www.ppe.ufrj.br/images/Isadora_Timb%C3%B3_de_Paula_Lopes.pdf). Acesso em: 26 abr. 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: 9 maio. 2022.

DOIG, A. T., P. J. R. Challen. **Respiratory hazards in welding**. Annals of Occupational Hygiene, v. 7, n. 3, p. 223-31, 1964. Disponível em: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19652700503>. Acesso em: 08 jun. 2022.

FREITAS, Carlos Alberto de; SILVA, Adriano Real; AGUIAR, Diogo Silva de; SILVA, Marcio Manoel da; CARDOSO, Aline da Silva; MARTINS, Deocleciano Reis; ARRUDA, Antonio Carlos Santos de. **A evolução da segurança no trabalho aplicada na manutenção industrial 4.0**. Remipe - Revista de Micro e Pequenas Empresas e Empreendedorismo da Fatec Osasco, [S.L.], v. 6, n. 2, p. 229-251, 1 jul. 2020. <http://dx.doi.org/10.21574/remipe.v6i2.289>. Disponível em: <http://remipe.fatecosasco.edu.br/index.php/remipe/article/view/289>. Acesso em: 28 mar. 2022.

FREITAS, Carlos Machado de; DE SOUZA PORTO, Marcelo Firpo; MACHADO, Jorge Mesquita Huet (Ed.). **Acidentes industriais ampliados: desafios e perspectivas para o controle e a prevenção**. SciELO-Editora FIOCRUZ, 2000. Disponível em: <https://play.google.com/books/reader?id=J2xdDwAAQBAJ&pg=GBS.PA6&hl=pt-BR&lr=&printsec=frontcover>. Acesso em: 28 mar. 2022.

Hardy E. Kirk-Othmer Encyclopaedia of Chemical Technology. 2nd Ed. Supplement. 1971. Phosgene; pp. 674–83.

HSE (1999), “HSG48: **Reducing Error and Influencing Behaviour**” (Sudbury, UK: Health and Safety Executive). Disponível em: [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/58365685/hsg48-\\_REDUCING\\_ERROR\\_AND\\_INFLUNCING\\_BEHAVIOUR-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1660770773&Signature=WyL2o5V8mJlIKg4oTIK86iluMr5xQV35grEJ1C2sfx~x-nWMyI5WHiEgQoZoHsvCHh2IH3y9uzelKOvwFePncEGwIArcTjA7r9xMtlEsf1O2J8Ujq8BTe2ObgcOFBNHGXKcgnhh3o7TullCGtpwJBSZEYPjUcNEUXkOWOUdSyCnynApxBw66ksKS3McCnz0HkpPvi5K9wKZKd2x~5OhF4JjvnZAUZugWpiEpD1O2NLw1G461EmIURLveoc63wqaattPPugKxPOFuMMA8SyAg80n1y-G3wHoCD2IHBPC85i7ALCcwZY57rah5uWemXu1yVi7UZ4ntla5jrquZ~GYD~w\\_\\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/58365685/hsg48-_REDUCING_ERROR_AND_INFLUNCING_BEHAVIOUR-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1660770773&Signature=WyL2o5V8mJlIKg4oTIK86iluMr5xQV35grEJ1C2sfx~x-nWMyI5WHiEgQoZoHsvCHh2IH3y9uzelKOvwFePncEGwIArcTjA7r9xMtlEsf1O2J8Ujq8BTe2ObgcOFBNHGXKcgnhh3o7TullCGtpwJBSZEYPjUcNEUXkOWOUdSyCnynApxBw66ksKS3McCnz0HkpPvi5K9wKZKd2x~5OhF4JjvnZAUZugWpiEpD1O2NLw1G461EmIURLveoc63wqaattPPugKxPOFuMMA8SyAg80n1y-G3wHoCD2IHBPC85i7ALCcwZY57rah5uWemXu1yVi7UZ4ntla5jrquZ~GYD~w__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA). Acesso em 05 abr. 2022

INEA. **Estudos de análise de risco**. 2022. Disponível em:

[http://www.inea.rj.gov.br/Portal/Agendas/LicenciamentoAmbienta/Licenciamento-saiba-](http://www.inea.rj.gov.br/Portal/Agendas/LicenciamentoAmbienta/Licenciamento-saiba-mais/GestaodeRiscoAmbientaTec/AvaliaodeRiscoTecnologico/EstudosdeAnalisedeRisco/index.htm)

[mais/GestaodeRiscoAmbientaTec/AvaliaodeRiscoTecnologico/EstudosdeAnalisedeRisco/index.htm](http://www.inea.rj.gov.br/Portal/Agendas/LicenciamentoAmbientaTec/AvaliaodeRiscoTecnologico/EstudosdeAnalisedeRisco/index.htm). Acesso em: 08 ago. 2022.

IOSH webinars - **Human Factors**. Leicestershire, United Kingdom: Iosh, 2021. P&B.

Disponível em: [https://www.youtube.com/watch?v=\\_Uyb10BTvX0](https://www.youtube.com/watch?v=_Uyb10BTvX0). Acesso em: 11 jun. 2022.

JOHNSON, Jeff. **Investigating A Fatal Phosgene Leak**. Chemical & Engineering News, West Virginia, v. 89, n. 41, p. 1-4, out. 2011. Disponível em:

<https://cen.acs.org/articles/89/i41/Investigating-Fatal-Phosgene-Leak.html>. Acesso em: 09 maio 2022.

KIRCHSTEIGER, C. **Absolute and relative ranking approaches for comparing and communicating industrial accidents**. Journal Of Hazardous Materials, [S.L.], v. 59, n. 1, p. 31-54, mar. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3894(97)00063-0)

[3894\(97\)00063-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3894(97)00063-0). Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389497000630>. Acesso em: 05 maio 2022.

KLEIN, J. A. **Two centuries of process safety at DuPont**. Proc. Safety, Wiley

InterScience, Process Safety Program, vol. 28, n° 2, 2009. Disponível em:

<https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/prs.10309>. Acesso em 04 abr. 2022.

LEAVITT, B. e MARCH, J.G. **Organizational Learning**. Annual Review of Sociology, Palo Alto (California): Vol. 14, p. 319-340, 1988. Disponível em:

[http://faculty.fuqua.duke.edu/~charlesw/s591/Readings/Class07\\_Learning/levitt%26march\\_or\\_glearning\\_ars88.pdf](http://faculty.fuqua.duke.edu/~charlesw/s591/Readings/Class07_Learning/levitt%26march_or_glearning_ars88.pdf) . Acesso em 06 jul. 2022.

LOURENÇO, Luciano. **Risco, Perigo e Crise. Trilogia de base na definição de um modelo conceptual-operacional**. Realidades e desafios na gestão dos riscos-

Diálogo entre ciência e utilizadores, p. 61-72, 2014. Disponível em:

<https://www.uc.pt/fluc/nicif/Publicacoes/livros/dialogos/Artg06.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2022.

MONTOYA, Juan Bernardo; TELES, Paulo Sérgio. **MEMÓRIA ORGANIZACIONAL E MEMÓRIA INSTITUCIONAL: CONCEITO E APLICAÇÃO**. 2016. 20 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência da Informação, Unicamp, Campinas, 2016. Disponível em: <https://www.cmu.unicamp.br/viiiiseminario/wp-content/uploads/2017/05/Mem%C3%B3ria-Organizacional-e-Mem%C3%B3ria-Institucional-Conceito-e-aplica%C3%A7ao-UNESP-JUAN-BERNARDO-MONTOYA-PAULO-SERGIO-TELES.1>. Acesso em: 06 jul. 2022.

MORIARTY, David. **Practical Human Factors for Pilots**. London: Elsevier, 2015.

MUTAWA, Abdalla M.; TSUNEHARA, Ronald; GLASPEY, Lynda A. OSHA's lockout/tagout standards: A review of key requirements. **Professional safety**, v. 47, n. 2, p. 20, 2002. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/25e07a79518c65ee685605ccba2690d2/1?pq-origsite=gscholar&cbl=47267>. Acesso em 13 nov. 2022.

PEREIRA, Antonio Fernando de A. Navarro; QUELHAS, Osvaldo Luiz Gonçalves. **Os acidentes industriais e suas consequências**. In: 4th International Conference On Industrial Engineering and Industrial Management. 2010. p. 652-661. Disponível em: [http://adingor.es/congresos/web/uploads/cio/cio2010/HEALTH\\_AND\\_OCCUPATIONAL\\_SECURITY\\_MANAGEMENT\\_AND\\_ERGONOMICS//652-661.pdf](http://adingor.es/congresos/web/uploads/cio/cio2010/HEALTH_AND_OCCUPATIONAL_SECURITY_MANAGEMENT_AND_ERGONOMICS//652-661.pdf). Acesso em: 11 abr. 2022.

PEREIRA, Cláudio de Souza. **Memória Organizacional: conceito e práticas em construção**. ANPAD, 2013. Disponível em: [http://www.anpad.org.br/admin/pdf/2013\\_EnANPAD\\_ADI471.pdf](http://www.anpad.org.br/admin/pdf/2013_EnANPAD_ADI471.pdf). Acesso em 06 jul. 2022

Process Safety Glossary CCPS. **Risk**. 2022. Disponível em: <https://www.aiche.org/ccps/resources/glossary/process-safety-glossary/risk>. Acesso em: 08 ago. 2022.

REASON J. **Human Error**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

RIBEIRO, L.M.M. and Sarsfield Cabral, J.A. (2006), "**A benchmarking methodology for metalcasting industry**", *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 13 No. 1/2, pp. 23-35. <https://doi.org/10.1108/14635770610644556>

SANTOS, Dr<sup>a</sup> Evânia dos. **Systematic Inventory Evaluation for Risk Assessment**. Cabo Verde: Ministério do Ambiente, Habitação e Ordenamento do Território, 2013.

Disponível em:

[https://www.preventionweb.net/files/Relatorio%20SIERA\\_Cabo%20Verde.pdf](https://www.preventionweb.net/files/Relatorio%20SIERA_Cabo%20Verde.pdf).

Acesso em: 26 abr. 2022.

SBGC. **Memória corporativa**. 2022. Disponível em:

[http://www.sbgc.org.br/memoacuteria-](http://www.sbgc.org.br/memoacuteria-corporativa.html#:~:text=Tamb%C3%A9m%20conhecida%20por%20mem%C3%B3ria%20corporativa,acervo%20de%20conhecimento%20da%20organiza%C3%A7%C3%A3o)

[corporativa.html#:~:text=Tamb%C3%A9m%20conhecida%20por%20mem%C3%B3ria%20corporativa,acervo%20de%20conhecimento%20da%20organiza%C3%A7%C3%A3o](http://www.sbgc.org.br/memoacuteria-corporativa.html#:~:text=Tamb%C3%A9m%20conhecida%20por%20mem%C3%B3ria%20corporativa,acervo%20de%20conhecimento%20da%20organiza%C3%A7%C3%A3o). Acesso em 06 jul. 2022

SEQUEIRA, Daniel Guilherme Rodrigues. **Análise e avaliação de risco de incêndio através de diagramas "Bow-Tie"**. 2010. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Disponível em:

[https://run.unl.pt/bitstream/10362/10677/1/Sequeira\\_2010.pdf](https://run.unl.pt/bitstream/10362/10677/1/Sequeira_2010.pdf). Acesso em: 30 mar. 2022.

STEVENSON, D. **A história da Primeira Guerra Mundial: 1914-1918**. São Paulo: McGraw Hill, 2014. Disponível em:

[https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/37128023/202752186-1914-1918-La-Historia-de-La-Pr-Stevenson-David.pdf?1427428491=&response-content-](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/37128023/202752186-1914-1918-La-Historia-de-La-Pr-Stevenson-David.pdf?1427428491=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3D202752186_1914_1918_La_Historia_de_La_Pr.pdf&Expires=1661028756&Signature=eae5qyu923yKro0Fi-WeU7DSLwVnwBtK4KdcaOmvqe2F84hyQgMRkuOcOxT~SrZXIHQbqsz68IldCnuGNQDLsC-L-HJga5MrD661uB4JRqKcSuNEexMT1OCHsbUA6tOwc5kq2OKSakL~~mGASkgGPMqodqoTf-SVKcKlbC8oliDS272U29sKg7WLBGzMojqDvgVeosN6yN7b3xAMW4G6~9mK2RvvqN0gjk34NZw-n7UJnhYbv4ISUq2Sg6zctwfVOrLYnWSmgCOSpWDhpf7ZcvGf4S0mVEA7dUen9w0)

[disposition=inline%3B+filename%3D202752186\\_1914\\_1918\\_La\\_Historia\\_de\\_La\\_Pr.pdf&Expires=1661028756&Signature=eae5qyu923yKro0Fi-](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/37128023/202752186-1914-1918-La-Historia-de-La-Pr-Stevenson-David.pdf?1427428491=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3D202752186_1914_1918_La_Historia_de_La_Pr.pdf&Expires=1661028756&Signature=eae5qyu923yKro0Fi-WeU7DSLwVnwBtK4KdcaOmvqe2F84hyQgMRkuOcOxT~SrZXIHQbqsz68IldCnuGNQDLsC-L-HJga5MrD661uB4JRqKcSuNEexMT1OCHsbUA6tOwc5kq2OKSakL~~mGASkgGPMqodqoTf-SVKcKlbC8oliDS272U29sKg7WLBGzMojqDvgVeosN6yN7b3xAMW4G6~9mK2RvvqN0gjk34NZw-n7UJnhYbv4ISUq2Sg6zctwfVOrLYnWSmgCOSpWDhpf7ZcvGf4S0mVEA7dUen9w0)

[WeU7DSLwVnwBtK4KdcaOmvqe2F84hyQgMRkuOcOxT~SrZXIHQbqsz68IldCnuGNQDLsC-L-](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/37128023/202752186-1914-1918-La-Historia-de-La-Pr-Stevenson-David.pdf?1427428491=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3D202752186_1914_1918_La_Historia_de_La_Pr.pdf&Expires=1661028756&Signature=eae5qyu923yKro0Fi-WeU7DSLwVnwBtK4KdcaOmvqe2F84hyQgMRkuOcOxT~SrZXIHQbqsz68IldCnuGNQDLsC-L-HJga5MrD661uB4JRqKcSuNEexMT1OCHsbUA6tOwc5kq2OKSakL~~mGASkgGPMqodqoTf-SVKcKlbC8oliDS272U29sKg7WLBGzMojqDvgVeosN6yN7b3xAMW4G6~9mK2RvvqN0gjk34NZw-n7UJnhYbv4ISUq2Sg6zctwfVOrLYnWSmgCOSpWDhpf7ZcvGf4S0mVEA7dUen9w0)

[HJga5MrD661uB4JRqKcSuNEexMT1OCHsbUA6tOwc5kq2OKSakL~~mGASkgGPMqodqoTf-](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/37128023/202752186-1914-1918-La-Historia-de-La-Pr-Stevenson-David.pdf?1427428491=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3D202752186_1914_1918_La_Historia_de_La_Pr.pdf&Expires=1661028756&Signature=eae5qyu923yKro0Fi-WeU7DSLwVnwBtK4KdcaOmvqe2F84hyQgMRkuOcOxT~SrZXIHQbqsz68IldCnuGNQDLsC-L-HJga5MrD661uB4JRqKcSuNEexMT1OCHsbUA6tOwc5kq2OKSakL~~mGASkgGPMqodqoTf-SVKcKlbC8oliDS272U29sKg7WLBGzMojqDvgVeosN6yN7b3xAMW4G6~9mK2RvvqN0gjk34NZw-n7UJnhYbv4ISUq2Sg6zctwfVOrLYnWSmgCOSpWDhpf7ZcvGf4S0mVEA7dUen9w0)

[SVKcKlbC8oliDS272U29sKg7WLBGzMojqDvgVeosN6yN7b3xAMW4G6~9mK2RvvqN0gjk34NZw-](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/37128023/202752186-1914-1918-La-Historia-de-La-Pr-Stevenson-David.pdf?1427428491=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3D202752186_1914_1918_La_Historia_de_La_Pr.pdf&Expires=1661028756&Signature=eae5qyu923yKro0Fi-WeU7DSLwVnwBtK4KdcaOmvqe2F84hyQgMRkuOcOxT~SrZXIHQbqsz68IldCnuGNQDLsC-L-HJga5MrD661uB4JRqKcSuNEexMT1OCHsbUA6tOwc5kq2OKSakL~~mGASkgGPMqodqoTf-SVKcKlbC8oliDS272U29sKg7WLBGzMojqDvgVeosN6yN7b3xAMW4G6~9mK2RvvqN0gjk34NZw-n7UJnhYbv4ISUq2Sg6zctwfVOrLYnWSmgCOSpWDhpf7ZcvGf4S0mVEA7dUen9w0)

[n7UJnhYbv4ISUq2Sg6zctwfVOrLYnWSmgCOSpWDhpf7ZcvGf4S0mVEA7dUen9w0](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/37128023/202752186-1914-1918-La-Historia-de-La-Pr-Stevenson-David.pdf?1427428491=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3D202752186_1914_1918_La_Historia_de_La_Pr.pdf&Expires=1661028756&Signature=eae5qyu923yKro0Fi-WeU7DSLwVnwBtK4KdcaOmvqe2F84hyQgMRkuOcOxT~SrZXIHQbqsz68IldCnuGNQDLsC-L-HJga5MrD661uB4JRqKcSuNEexMT1OCHsbUA6tOwc5kq2OKSakL~~mGASkgGPMqodqoTf-SVKcKlbC8oliDS272U29sKg7WLBGzMojqDvgVeosN6yN7b3xAMW4G6~9mK2RvvqN0gjk34NZw-n7UJnhYbv4ISUq2Sg6zctwfVOrLYnWSmgCOSpWDhpf7ZcvGf4S0mVEA7dUen9w0)

cyDFa7PVRzDxH4ctJjJZ-XNhSp4X-mt8LePa4zl-bNTUZQ\_\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em 06 abr. 2022.

TARGOUTZIDIS, Antonis. Incorporating human factors into a simplified “bow-tie” approach for workplace risk assessment. **Safety Science**, [S.L.], v. 48, n. 2, p. 145-156, fev. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2009.07.005>.

TRANCHARD, Sandrine. **The new ISO 31000 keeps risk management simple**. International Organization for Standardization, ISO, 2018. Disponível em: <https://www.iso.org/news/ref2263.html#:~:text=Risk%20is%20now%20defined%20as,on%20an%20organization's%20decision%20making>. Acesso em: 08 ago. 2022.

TURK, Michelle Follette. **Gambling With Lives: A History of Occupational Health in Greater Las Vegas**. Nevada: University Of Nevada Press, 2020.

UNSCSB. Phosgene Accident Animation of January 23, 2010 **Phosgene Accident**. Belle, West Virginia: Uscsb, 2011. P&B. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=d5N8hxxJD7E>. Acesso em: 02 mar. 2022.

VAISH, A. K., Consul, S., Agrawal, A., Chaudhary, S. C., Gutch, M., Jain, N., & Singh, M. M. **Accidental phosgene gas exposure: A review with background study of 10 cases**. *Journal of Emergencies, Trauma, and Shock*, v. 6, n. 4, p. 271, 2013. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3841534/>. Acesso em: 02 mai. 2022.