

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Rafael Ferreira de Sousa Gomes Soares



NATECHS E SEGURANÇA DE PROCESSOS – O ACIDENTE DA
ARKEMA EM CROSBY, TX

RIO DE JANEIRO

2023

Rafael Ferreira de Sousa Gomes Soares

NATECHS E SEGURANÇA DE PROCESSOS – O ACIDENTE DA ARKEMA EM
CROSBY, TX

Monografia apresentada à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Orientador(es): Carlos André Vaz Junior

Rio de Janeiro

2023

Gerar a página da ficha catalográfica em <http://fichacatalografica.sibi.ufrj.br/> e substituir esta página por ela, no documento final.

Se o documento vier a ser impresso, esta página deverá ser impressa no verso da anterior (folha de rosto).

Rafael Ferreira de Sousa Gomes Soares

NATECHS E SEGURANÇA DE PROCESSOS – O ACIDENTE DA ARKEMA EM
CROSBY, TX

Monografia apresentada à Escola de Química da
Universidade Federal do Rio de Janeiro, como
parte dos requisitos necessários à obtenção do grau
de Engenheiro Químico.

Aprovado em 21 de dezembro de 2023 por:

Karen Signori Pereira, D. Sc

Natália Ornellas Lobo Rodrigues, UFRJ.

Orientado por:

Carlos André Vaz Junior, D.Sc., EQ/UFRJ

Rio de Janeiro

2023

RESUMO

SOARES, Rafael. **NATECHS E SEGURANÇA DE PROCESSOS – O ACIDENTE DA ARKEMA EM CROSBY, TX**. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

A ocorrência dos eventos *Natech* se acentuou ao longo dos últimos anos, como resultado dos efeitos manifestados pelo aquecimento global com o incremento dos eventos climáticos extremos ao redor do globo. O estudo das variações climáticas, bem como a utilização dos conceitos de segurança de processos, é de extrema importância para a identificação e gerenciamento dos riscos inerentes às práticas industriais. Nesta obra se conceituou fundamentos de segurança de processos e abordou fatos que corroboram a narrativa de que o aquecimento global tem aumentado a frequência e severidade da consequência dos eventos climáticos. Após isso, relacionou-se essa nova dinâmica climática com os acidentes na indústria, explicando as suas peculiaridades a partir de uma revisão da bibliografia disponível. Ademais, aprofundou-se a análise ao realizar um estudo de caso envolvendo o acidente decorrente dos efeitos da passagem do Furacão Harvey na planta da Arkema em Crosby, no Texas. Caracterizou-se o Furacão que acometeu a região em 2017 e toda a estrutura, procedimentos e operação da planta da companhia no Texas. Logo após, realizou-se o detalhamento e sequenciamento dos fatos ocorridos durante o acidente para, ao final do trabalho, se tornar possível identificar os pontos de melhoria e propor novas abordagens no gerenciamento de emergências na unidade industrial.

Palavras-chave: *Natech*, mudanças climáticas, segurança de processos, Furacão Harvey, Arkema.

ABSTRACT

SOARES, Rafael. **NATECHS E SEGURANÇA DE PROCESSOS – O ACIDENTE DA ARKEMA EM CROSBY, TX.** Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

The occurrence of Natech events has increased in recent years as a result of the effects of global warming and the increase in extreme weather events around the world. The study of climatic variations and the use of process safety concepts is extremely important for identifying and managing the risks inherent to industrial practices. In this study, the fundamentals of process safety were conceptualized and facts that corroborate the narrative that global warming has been increasing the frequency and severity of the consequences of climatic events were addressed. Thereinafter, this new climate dynamic was then related to accidents in the industry, explaining their peculiarities as of a review of the available bibliography. Furthermore, the analysis was deepened by carrying out a case study involving the accident resulting from the effects of Hurricane Harvey at the Arkema plant in Crosby, Texas. The Hurricane that hit the region in 2017 and the entire structure, procedures and operation of the company's plant in Texas were characterized. Afterwards, the facts that occurred during the accident were detailed and sequenced in order to be possible, at the end of the study, to identify points for improvement and propose new approaches to the industrial unit's emergency management.

Keywords: Natech, climate change, process safety, Hurricane Harvey, Arkema

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 : Tolerância ao risco ALARP.....	17
Figura 2: Hierarquia de controles.....	18
Figura 3: Temperatura terrestre dos anos 1 a 2020.....	20
Figura 4: Mudanças na temperatura global e influência dos efeitos naturais e antropológicos.....	21
Figura 5: Rotas de emissão de GEE até 2100.....	22
Figura 6: Alteração na temperatura por RCP.....	23
Figura 7: Projeção de mudança de precipitação segundo as RCP 2.6 e 8.5.....	24
Figura 8: Eventos NaTechs por categoria de fenômenos naturais.....	27
Figura 9: Classificação de 18 (dezoito) eventos Natechs com base na altura da lâmina d'água (h).....	28
Figura 10: Tipologia de acidentes provocados por inundações.....	29
Figura 11: Estudo da Swiss Re com histórico de sinistros.....	29
Figura 12: Distribuição global de negócios da Arkema.....	33
Figura 13: Localização geográfica da planta da Arkema em Crosby.....	34
Figura 14: Imagem de satélite da Planta da Arkema, Crosby, TX.....	35
Figura 15: Relação entre a temperatura dos peróxidos orgânicos e suas faixas de periculosidade.....	37
Figura 16: FISPQ de peróxido orgânico Luperox 231 fabricado pela Arkema.....	38
Figura 17: Evaporador no interior do ABT.....	39
Figura 18: Condensador para retirada do calor do refrigerante.....	39
Figura 19: Geradores de emergência.....	40
Figura 20: Tanque de nitrogênio líquido.....	41
Figura 21: Semirreboque Refrigerado.....	42
Figura 22: Tanque de Diesel localizado embaixo do semirreboque refrigerado.....	43
Figura 23: Identificação dos geradores, ABTs, transformadores e região elevada na planta de Crosby.....	45
Figura 24: Zona de evacuação ao redor da planta da Arkema.....	50
Figura 25: Planta da Arkema em Crosby (círculo preto) e rotas entre Houston e Beaumont através da Highway 90 (linha cinza) e Interstate 10 (linha azul).....	51
Figura 26: Matriz de risco perda de refrigeração nos Armazéns de Baixa Temperatura.....	56

Figura 27: Mapa de alagamento do terreno da Arkema em Crosby.....	57
Figura 28: Metodologia para avaliação dos cenários envolvendo eventos Natechs.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação de frequência de risco.	14
Tabela 2: Severidade de consequências.....	15
Tabela 3: Exemplo de Matriz de Risco.....	15
Tabela 4: Ranking de furacões mais custosos.....	32
Tabela 5: Químicos despejados no transbordamento da ETE.....	49

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	10
1.2 OBJETIVO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE SEGURANÇA DE PROCESSOS E GERENCIAMENTO DE RISCOS	12
2.1.1 Identificação dos riscos	13
2.1.2 Classificação e análise dos riscos	13
2.1.3 ALARP e implementação de barreiras.....	16
2.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS: AUMENTO DA PRECIPITAÇÃO, INUNDAÇÕES E CICLONES TROPICAIS	19
2.3 <i>NATECHS</i>	25
3 O ACIDENTE DE CROSBY.....	31
3.1 FURACÃO HARVEY	31
3.2 ARKEMA E SUA PLANTA EM CROSBY NO TEXAS	32
3.2.1 Sistema de refrigeração elétrico	39
3.2.2 Geradores de emergência.....	40
3.2.3 Sistema de nitrogênio líquido	40
3.2.4 Semirreboques refrigerados	41
3.3 DESCRIÇÃO DOS FATOS.....	43
4 ANÁLISE DAS FALHAS EM SEGURANÇA DE PROCESSOS	55
4.1 ANÁLISE DO HISTÓRICO DE INUNDAÇÕES NA REGIÃO E INCORPORAÇÃO DESSE RISCO DURANTE A AVALIAÇÃO DOS PERIGOS.....	56
4.2 EVITAR QUE UM MODO DE FALHA COMUM ACOMETA OS SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO.....	59
4.3 INCORPORAÇÃO DA AVALIAÇÃO DE RISCOS <i>NATECH</i> DURANTE A CONFECCÃO DO PLANO DE RESPOSTA À EMERGÊNCIA	60
5 CONCLUSÃO.....	64
6 REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As ações antropológicas de queima de combustíveis fósseis desde a Revolução Industrial resultaram em um rápido incremento da concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera. Esses gases atuam retendo calor na atmosfera terrestre, porém com sua grande concentração provocam o aumento das temperaturas do ar e dos oceanos da Terra. Esse aquecimento exacerbado altera os padrões climáticos e intensifica as condições climáticas extremas. Ondas de calor sem precedentes em terra e no oceano, chuvas intensas, enchentes severas, períodos prolongados de seca, incêndios florestais extremos e inundações generalizadas durante furacões são alguns dos eventos climáticos que tem se acentuado em frequência e intensidade nos últimos anos (NASA).

Desastres oriundos de eventos climáticos extremos são responsáveis por um enorme número de fatalidades e perdas financeiras globalmente. Unidades industriais e infraestruturas essenciais estão suscetíveis aos seus efeitos. O impacto desses fenômenos pode desencadear eventos denominados *Natechs*, provocando a liberação de substâncias tóxicas, incêndios e explosões, potencialmente gerando impactos na saúde, poluição ambiental e prejuízos econômicos. Por exemplo, em 2011 um terremoto e tsunami no Japão desencadeou a liberação de material radioativo em Fukushima impactando a vida de diversos seres humanos, em 2013 o Equador foi acometido por um deslizamento de terra que danificou seus gasodutos e poluiu o meio ambiente e em 2017 no Texas o Furacão Harvey provocou a liberação de diversos produtos perigosos no ambiente (KRAUSMANN et al., 2019).

Apenas em 2022, o mundo registrou perdas econômicas da ordem de 313 bilhões de dólares americanos e aproximadamente 31.300 pessoas faleceram devido a catástrofes ambientais, muitas delas exacerbadas pelas mudanças climáticas (REUTERS, 2023).

A segurança de processos desempenha um papel fundamental ao coibir e mitigar a ocorrência de eventos indesejados na indústria, sejam eles oriundos de eventos naturais ou não. Tal disciplina concentra-se no design e na engenharia de instalações, avaliações de risco, gestão de mudanças, inspeção, teste e manutenção de equipamentos, elaboração de barreiras de segurança eficazes, procedimentos e treinamento de pessoal. Falhas na correta aplicação dos conceitos de segurança de processos podem resultar em acidentes envolvendo a liberação de materiais potencialmente perigosos, incêndios e explosões, por exemplo. Como consequência,

podem desencadear impactos catastróficos, como múltiplos ferimentos e fatalidades nos seres humanos, perdas econômicas e ambientais significativas (BRITISH PETROLEUM, 2007).

1.2 OBJETIVO

Devido ao grande aumento na ocorrência de acidentes tecnológicos causados por desastres naturais nos últimos anos e seu altíssimo potencial de gerar consequências extremas ao meio ambiente, seres humanos e economia, o estudo desses fenômenos se torna imprescindível para identificação de falhas e pontos de melhoria na indústria.

O objetivo geral deste trabalho é - através do estudo de caso da sequência de eventos que culminaram no acidente envolvendo a decomposição de peróxidos orgânicos na Planta da Arkema em Crosby, TX, durante a passagem do Furacão Harvey - abordar conceitos pertinentes de segurança de processos e estudos acerca dos efeitos do aquecimento global para identificar os pontos de melhoria e propor uma nova abordagem para melhor incorporar a gestão do risco em eventos *Natech*.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Antes de devidamente se adentrar na exploração do presente trabalho, é de suma importância o esclarecimento dos conceitos fundamentais à sua elaboração e compreensão.

2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE SEGURANÇA DE PROCESSOS E GERENCIAMENTO DE RISCOS

Segurança de processos pode ser definida como um conjunto de diretrizes para manutenção da integridade de determinado processo ou sistema perigoso, através da aplicação de princípios de dimensionamento, engenharia e práticas operacionais adequadas. Está intimamente ligada à prevenção e controle de incidentes através da redução ou mitigação de riscos que tenham como resultado a potencial liberação de materiais perigosos ou energia, podendo acarretar efeitos tóxicos, incêndio, explosão, lesões graves, danos materiais, perda de produção ou impacto ambiental. (ISC, 2014)

Dentro de segurança de processos, temos por gerenciamento de riscos a terminologia utilizada para denominar o processo de identificação e avaliação de perigos bem como o estabelecimento de metas, criação e operacionalização de sistemas para controle dos riscos. Os perigos com que o gerenciamento de riscos está relacionado incluem aqueles decorrentes de eventos naturais, tecnológicos ou oriundos da atividade humana.

Organizações de todos os tipos e tamanhos sofrem influências à fatores internos e externos que tornam incerto se e quando elas atingirão seus objetivos. O efeito que essa incerteza exerce sobre os objetivos da organização é chamado de "risco" (ISO 31000,2009). No campo da engenharia, Aven (2010) afirma que tais incerteza e complexidade também se refletem na forma como os riscos são mais comumente definidos em normas e na literatura científica. Cita-se algumas das definições mais difundidas e aceitas de risco:

- uma medida da probabilidade e severidade de efeitos adversos.
- a combinação da probabilidade de um evento e suas consequências.
- igual ao tripete (S_i, P_i, C_i) , no qual S_i é o iésimo cenário, P_i é a probabilidade desse cenário se concretizar e C_i é a consequência do cenário, para qualquer $i=1,2, y, N$

Analisando as definições acima, pode-se concluir que o conceito de risco está intimamente ligado aos eventos iniciadores e suas probabilidades e consequências. Dessa forma, ele pode ser descrito como uma função dessas variáveis:

$$\text{Risco} = f \{ \text{Cenário, Probabilidade, Consequência} \}$$

A probabilidade, ou frequência relativa, está relacionada com a quantidade de vezes em que um evento pode ocorrer se determinado cenário fosse repetido por infinitas vezes. Enquanto isso, a gravidade das consequências de tal evento é comumente expressa pela severidade, que, por sua vez, se refere a intensidade, tamanho, extensão, escopo e outras medidas potenciais de magnitude em vidas de seres humanos, danos ao meio ambiente ou perdas financeiras. (AVEN, 2010)

2.1.1 Identificação dos riscos

Uma das etapas mais importantes no gerenciamento de riscos é a identificação dos mesmos. Essa etapa do projeto, idealmente, requer a participação de uma equipe multidisciplinar que contenha funcionários da operação, supervisão e administração da indústria, bem como que contenha conhecimento acerca do funcionamento dos equipamentos e das condições reais de operação do processo a ser analisado. (HAO et al. 2022)

Nesta etapa, a equipe possui diversas alternativas para identificação dos riscos, como a execução de inspeções de segurança *in loco*, investigação de acidentes e fluxogramas ou a realização de checklists roteirizados. Quanto mais métodos alternativos para identificação de riscos forem empregados, mais abrangente e eficaz será essa etapa do gerenciamento de riscos. (LOURENÇO, 2022).

2.1.2 Classificação e análise dos riscos

Após a identificação dos riscos, deve-se os avaliar qualita ou quantitativamente. A escolha do método mais adequado dependerá de diversos fatores, tais como o grau de precisão desejado para o resultado da análise, disponibilidade e qualidade de dados. Em geral, a análise qualitativa é mais indicada para grandes áreas nas quais não há extensão de dados confiáveis para suportar estimativas numéricas, sendo especialmente úteis para as avaliações iniciais. (DAI et al., 2000)

Já em cenários nos quais se dispõe de modelos matemáticos e coleta de dados confiáveis, a frequência de cada evento de risco identificado, a severidade de seu impacto e consequentemente seu grau de risco pode ser estimado a partir de modelos quantitativos. (SOUZA, 2020)

Ao utilizar métodos qualitativos, uma das formas mais difundidas na indústria para elencar os riscos é a utilização da Matriz de Risco. Essa simples ferramenta consiste em um

gráfico que exhibe as propriedades básicas de severidade e frequência de um evento adverso em seus eixos e a noção agregada de risco ao cruzar tais coordenadas de classificações (DUIJM, 2015). Por se tratar de uma ferramenta gráfica de fácil compreensão tanto para os operadores quanto para a direção da planta responsável pelo processo analisado, essa ferramenta é amplamente utilizada na indústria.

Nela, cada risco identificado na etapa anterior é analisado por uma equipe multidisciplinar com pleno conhecimento do processo e classificado de acordo com a sua frequência de ocorrência e severidade de suas consequências. A partir da sua classificação, é possível priorizar os riscos que devem ser mitigados e obter as primeiras conclusões acerca da tolerabilidade dos mesmos.

Uma das coordenadas da Matriz de Risco é a frequência, cuja classificação deve ser estimada a partir de dados históricos do *site* (em tradução livre, local) em questão, projeções para o futuro e data bases confiáveis (tais como agências regulatórias, órgãos de fiscalização, dentre outros). Uma vez em posse desses dados, a equipe deverá conferir valores de categoria de frequência para o risco analisado dentro de uma escala de 1 a 5, conforme demonstrado na tabela 1.

Tabela 1: Classificação de frequência de risco.

FREQUÊNCIA	Raro	Improvável	Possível	Provável	Frequente
Valor	1	2	3	4	5
Descrição	Ocorre menos de 1 vez a cada 100 anos	Ocorre pelo menos 1 vez a cada 10 anos	Ocorre pelo menos 1 vez a cada 5 anos	Ocorre ao menos anualmente	Pode ocorrer mais de 1 vez ao ano

Fonte: adaptado de Hao et al., 2020.

De forma análoga, a classificação da severidade da consequência de determinado risco também deve ser estimada. Ainda que esta possa ser aferida com relação a diversas medidas, neste trabalho abordaremos apenas sua classificação quanto aos danos aos seres humanos e ao meio ambiente, através de estimativas das consequências de determinado risco e considerando o pior cenário possível. Os valores de categoria de severidade para os determinados riscos analisados se encontram na tabela 2.

Tabela 2: Severidade de consequências.

SEVERIDADE	Desprezível	Marginal	Crítica	Catastrófica
Valor	1	2	3	4
Segurança Pessoal	Uma pessoa é levemente machucada	Uma ou mais pessoas são gravemente machucadas	Uma pessoa é morta	Mais de uma pessoa é morta
Danos ao meio ambiente	Nenhum dano ao meio ambiente	Danos leves ao meio Ambiente	Dano considerável ao meio ambiente	Dano permanente ao meio ambiente

Fonte: adaptado de CETESB, 2011.

Após a avaliação de todos os riscos identificados nas etapas anteriores, bem como após a aferição de suas frequências e severidades, cruzam-se tais informações na Matriz de Risco, determinando-se, assim, a tolerabilidade ao risco estudado (ANAC, 2019). Um exemplo de Matriz de Risco muito utilizado na indústria está ilustrado na tabela 3.

Tabela 3: Exemplo de Matriz de Risco.

Matriz de Risco		Severidade			
		Desprezível	Marginal	Crítica	Catastrófica
Frequência	Frequente	Moderado	Moderado	Intolerável	Intolerável
	Provável	Moderado	Moderado	Intolerável	Intolerável
	Possível	Tolerável	Moderado	Moderado	Intolerável
	Improvável	Tolerável	Tolerável	Moderado	Moderado
	Raro	Tolerável	Tolerável	Tolerável	Moderado

Fonte: adaptado de Wang, 2020.

Na indústria, não existe segurança absoluta ao passo que os riscos são inerentes a todos os processos químicos, ou seja, não podem ser completamente eliminados. Em alguma etapa da fase de projeto ou da avaliação de riscos utilizando-se da Matriz de Risco, classificamos o mesmo de acordo com as suas características como tolerável, moderado ou intolerável (CROWL, 2015).

Os riscos toleráveis são aqueles classificados como extremamente baixos e controlados, os quais a planta está disposta a assumir para usufruir de determinado benefício do processo em

questão. Eles ainda podem ser taxados como insignificantes ou triviais por estarem presentes nas atividades cotidianas realizadas pelos indivíduos nos âmbitos pessoal e profissional (ANAC,2019).

Já os riscos moderados são aqueles que devem ser devidamente avaliados e controlados para manter o risco residual e, assim, devem ser revistos periodicamente para garantir que permaneçam dessa forma. Controles adicionais devem ser avaliados, visando a redução do nível de risco para o nível tolerável. Neste diapasão, é interessante que sejam implementadas todas as barreiras consideradas factíveis operacional e financeiramente (SOUZA, 2020). Barreiras de segurança são caracterizadas por Cozzani et al. (2021) como medidas aplicadas em determinado processo com o objetivo de evitar ou mitigar possíveis acidentes.

Por fim, o risco intolerável é classificado como inaceitável independentemente dos benefícios associados à atividade. Tal classificação indica que as barreiras presentes no processo são insuficientes, demandando a implementação de novas formas de controle ou processo alternativo com o objetivo de reduzir o nível de risco para a região moderada ou tolerável. Do contrário, deve haver razões excepcionais para que a atividade ou a prática continuem sob essas circunstâncias (ANAC,2019).

Após a identificação e classificação dos riscos, a análise preliminar de riscos finaliza com a implementação das devidas medidas de controle e mitigação de riscos que se demonstraram necessárias e viáveis para reduzi-los sempre que possível, sobretudo quando o seu nível for taxado como intolerável (DAI et al. 2000).

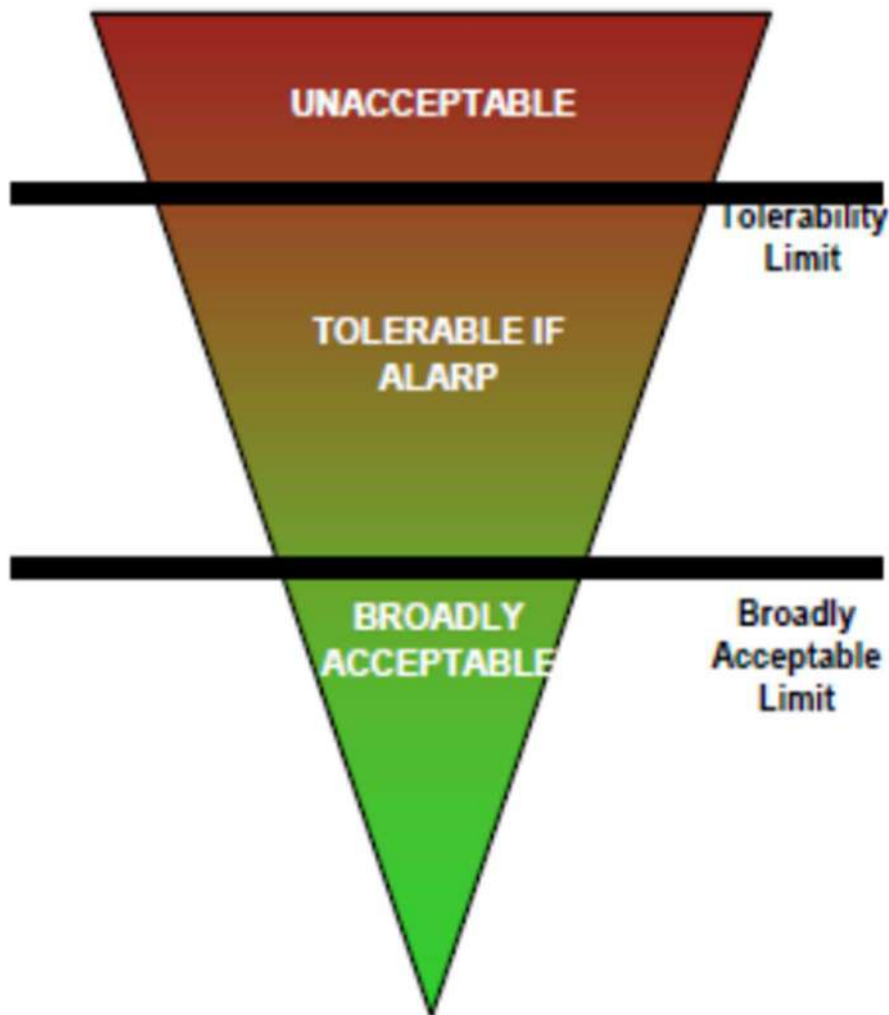
2.1.3 ALARP e implementação de barreiras

Os engenheiros responsáveis por processos em uma planta não devem medir esforços para minimizar os riscos envolvidos, sempre considerando as restrições econômicas e operacionais do mesmo. Esse preceito do gerenciamento de riscos está intimamente ligado ao conceito de ALARP (do inglês, *as low as reasonably practicable*), cuja tradução livre é: tão baixo quanto razoavelmente possível.

Conforme citado anteriormente, é manifesto que não há como eliminar todos os riscos dentro de uma indústria química. Entretanto, seguindo a política ALARP, ilustrada na Figura 1, os riscos podem ser reduzidos até determinado nível e, para ultrapassá-lo faz-se necessário investimentos altamente custosos que poderiam até economicamente inviabilizar o processo dentro da planta (AVEN et al., 2009).

Ao garantir-se a redução de um risco ao ALARP é balanceado os sacrifícios para atingir-se tal redução do nível de risco *versus* o benefício desta redução, no qual o ponto de equilíbrio ocorre no chamado ALARP. Desta forma, é aconselhável que todas as barreiras razoavelmente possíveis sejam implementadas no processo.

Figura 1 : Tolerância ao risco ALARP.

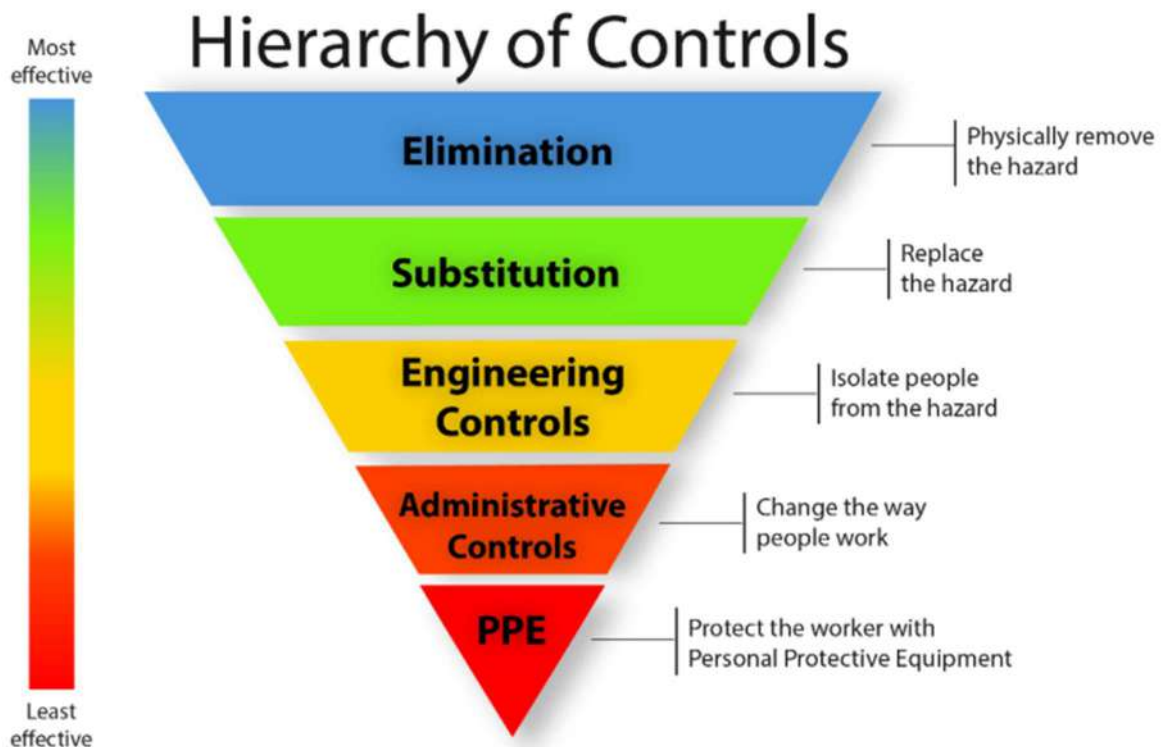


Fonte: Kannan 2020.

É notório que existem barreiras mais efetivas do que outras. A partir disso, o Instituto Nacional de Saúde e Segurança Ocupacional (do inglês, *The National Institute of Occupational Safety and Health* – NIOSH), desenvolveu a hierarquia de controles, ilustrada na Figura 2, como forma de auxiliar as companhias a determinarem quais ações garantirão os melhores resultados para a redução do nível de risco de determinado perigo. Ela categoriza as barreiras de controle em cinco níveis, cada qual com um maior ou menor grau de eficácia na segurança do processo. São elas, em ordem de eficiência:

1. Eliminar a fonte de risco: Opta-se por remover completamente a fonte de risco, evitando que haja exposição ao meio ambiente ou operadores, por exemplo.
2. Substituição: Utiliza-se uma alternativa mais segura ao procedimento operacional ou matéria prima empregada no processo analisado.
3. Controles de engenharia: Reduz ou previne que determinado risco seja concretizado, através da aplicação de barreiras de proteção física ou outras alterações estruturais no processo.
4. Controles administrativos: Diminuição da frequência e intensidade de exposição ao risco através de ajustes nas práticas de trabalho.
5. Equipamentos de Proteção Individual (EPIs): Utilização dos chamados EPIs durante a operação, como forma de minimizar os efeitos da severidade de consequência de determinado perigo.

Figura 2: Hierarquia de controles.



Fonte: extraído do NIOSH.

2.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS: AUMENTO DA PRECIPITAÇÃO, INUNDAÇÕES E CICLONES TROPICAIS

O Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (do inglês, *Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC), órgão criado em 1988 pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), caracteriza mudanças climáticas como qualquer mudança no clima ao longo do tempo, seja devido a variabilidade natural ou ao resultado da atividade humana. (PIELKE, 2004)

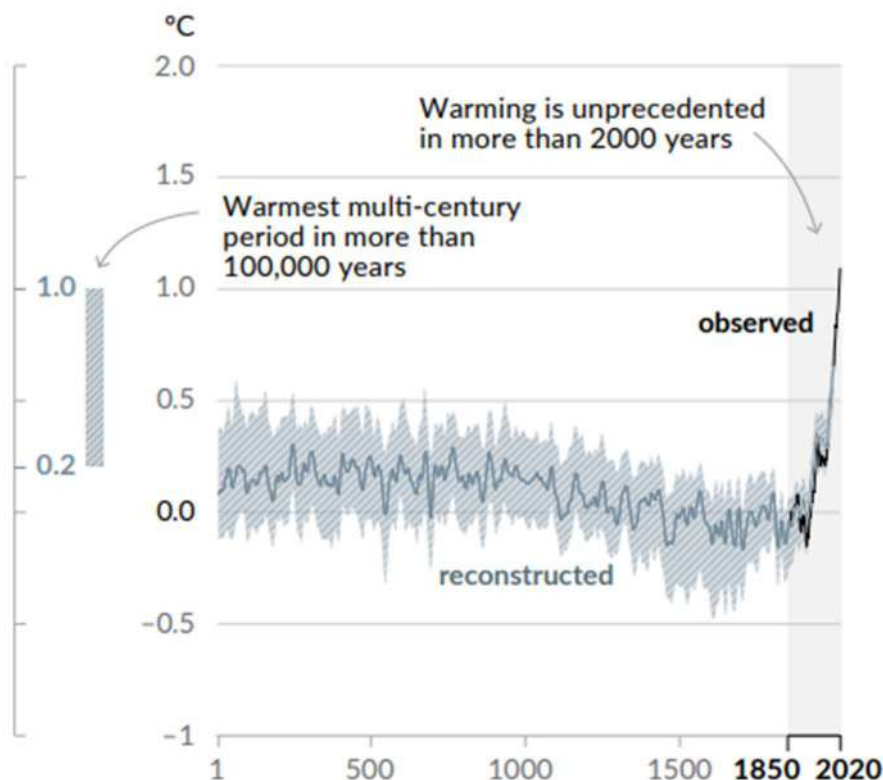
As mudanças climáticas podem ser oriundas de processos internos e/ou de influência externa. Algumas forças externas, tal como mudanças na radiação solar e no vulcanismo, ocorrem naturalmente e contribuem para a total variabilidade natural do sistema climático, porém há mudanças externas resultantes da atividade humana, como a mudança na composição da atmosfera que teve início com a revolução industrial (HEGERL et al., 2011).

Ainda, de acordo com o IPCC (2015), dentre essa série de mudanças climáticas estão o aumento da temperatura da superfície terrestre com aquecimento da atmosfera e dos oceanos, diminuição da neve e do gelo, aumento do nível do mar e o aumento das séries históricas de precipitação em algumas regiões do planeta. (XAVIER, 2017)

O IPCC (2007) também sinaliza que a maior parte do aumento observado nas temperaturas médias globais durante a segunda metade do século XX é o provável resultado da emissão descontrolada de gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono, metano e óxido nitroso, pela ação humana.

O aumento abrupto de temperatura ao longo dos últimos anos é claramente visível na Figura 3. A figura colacionada retrata mudanças na temperatura global e foram reconstruídas a partir de arquivos paleoclimáticos (linha cinza sólida, anos 1-1850) e de observações diretas (linha preta sólida, 1850-2020). A análise desta figura identifica que, nos últimos 100 anos, estamos vivenciando o período com maior taxa de aquecimento em mais de dois milênios (IPCC, 2021).

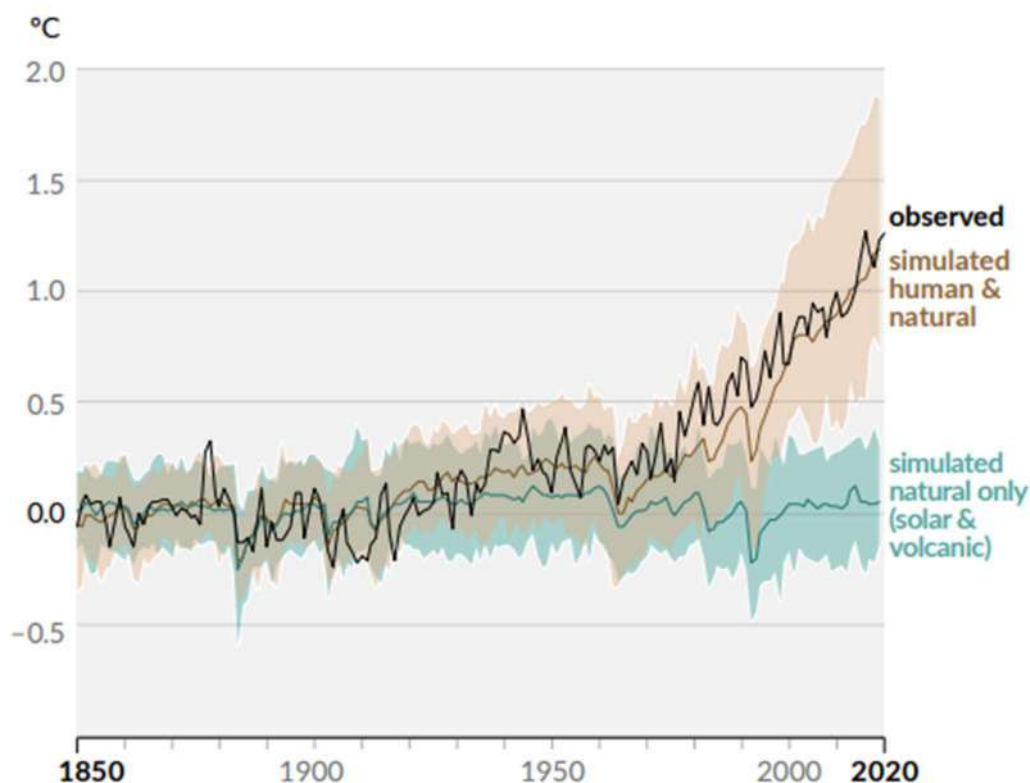
Figura 3: Temperatura terrestre dos anos 1 a 2020.



Fonte: IPCC 2021.

Já na figura 4 pode se observar a influência da ação humana nas mudanças climáticas ao longo dos últimos 170 anos. A linha preta representa a média da variação anualizada de temperatura observada globalmente no período citado. Já a linha marrom, é referente as simulações da Fase 6 do Projeto de Inter Comparação de Modelo Acoplado (do inglês, *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 - CMIP6*), no qual se identifica a resposta da temperatura assumindo tanto a influência humana quanto atividades naturais. Por fim, a linha verde demonstra a simulação no CMIP6 apenas para os aspectos naturais (atividade solar e vulcânica). Linhas coloridas sólidas mostram a média de modelos múltiplos, e sombras coloridas mostram a gama muito provável de simulações. A partir de tal imagem, fica nítida a influência dos seres humanos para as mudanças climáticas e aquecimento do globo terrestre, sendo responsáveis pelo incremento de mais de 1,1°C na temperatura mundial ao longo dos últimos 170 anos (IPCC, 2021).

Figura 4: Mudanças na temperatura global e influência dos efeitos naturais e antropológicos.



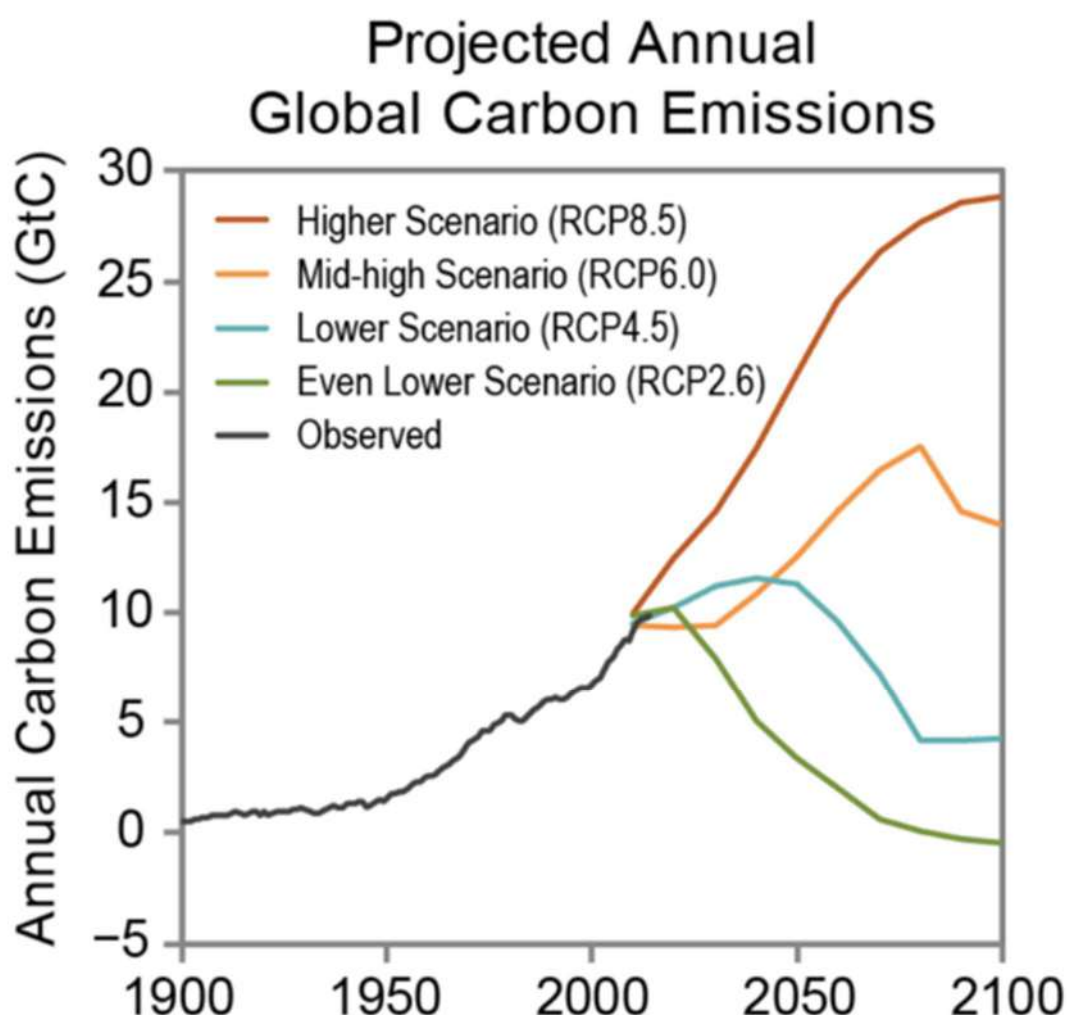
Fonte: IPCC 2021.

Diante do cenário das últimas décadas de nossa sociedade, torna-se imprescindível projetar os anos subsequentes. Segundo o relatório especial de ciências climáticas de 2017, do *U.S. Global Change Research Program*, as projeções acerca das mudanças climáticas são normalmente apresentadas para uma série de caminhos, cenários ou metas plausíveis que capturam as relações entre as escolhas humanas, emissões, concentrações e mudanças de temperatura. Alguns cenários são consistentes com a contínua dependência de combustíveis fósseis, enquanto outros só podem ser alcançados mediante a tomada de ações deliberadas para reduzir as emissões. A faixa resultante reflete a incerteza inerente à quantificação das atividades humanas (incluindo mudanças tecnológicas) e sua influência sobre o clima.

As emissões antropogênicas de GEEs são motivadas principalmente pelo tamanho da população, atividade econômica, estilo de vida, uso de energia, padrões de uso da terra, tecnologia e política climática. Muitos estudos usam modelos climáticos para prever as respostas esperadas a fatores externos - previsões essas que são geralmente representadas como padrões de variação no espaço, no tempo ou em ambos. Tais padrões, ou "impressões digitais", são geralmente derivados de mudanças simuladas por um modelo climático em resposta à

forçagem (NICHOLLS et al., 2005). Exemplos de modelos para projeções com base nesses fatores são as Rotas Representativas de Concentração (do acrônimo em inglês, *Representative Concentration Pathways* – RCP), que descrevem diferentes rotas no século XXI de emissões de GEEs e concentrações atmosféricas, emissões de poluentes atmosféricos e uso da terra. O IPCC em seu 5º relatório (2014) projeta 4 RCPs para simular as emissões e temperatura global ao longo do século XXI. Elas incluem 1 cenário rigoroso de mitigação (RCP2.6), 2 cenários intermediários (RCP4.5 e RCP6.0) e 1 cenário com emissões muito altas de GEE (RCP8.5), conforme se depreende da Figura 5.

Figura 5: Rotas de emissão de GEE até 2100.

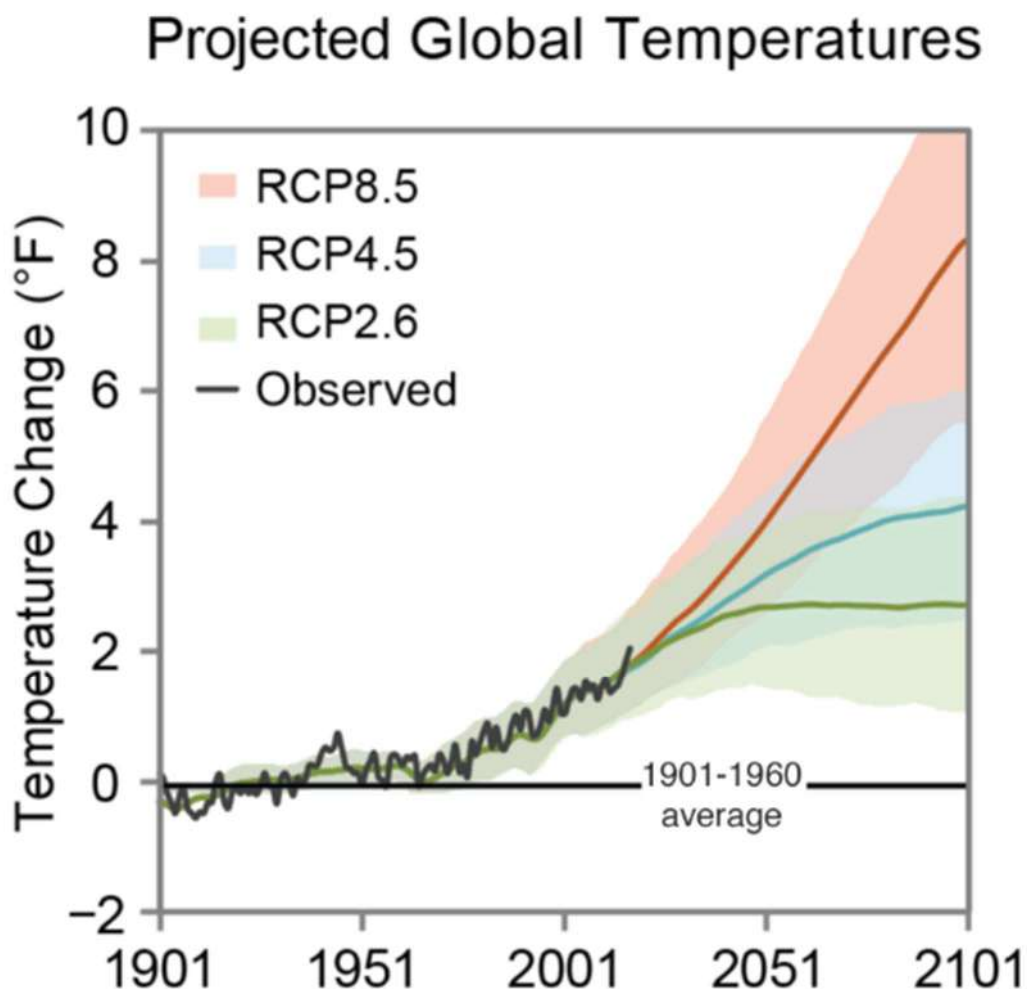


Fonte: extraído de NOAA.

Nos casos em que não são realizados esforços adicionais para mitigar as emissões temos as rotas que variam entre RCP 6.0 e RCP 8.5, enquanto a RCP 2.6 representa um cenário que

visa manter a variação da temperatura abaixo de 2°C quando comparado com os níveis pré-industriais. O resultado das simulações se encontra na figura 6.

Figura 6: Alteração na temperatura por RCP.



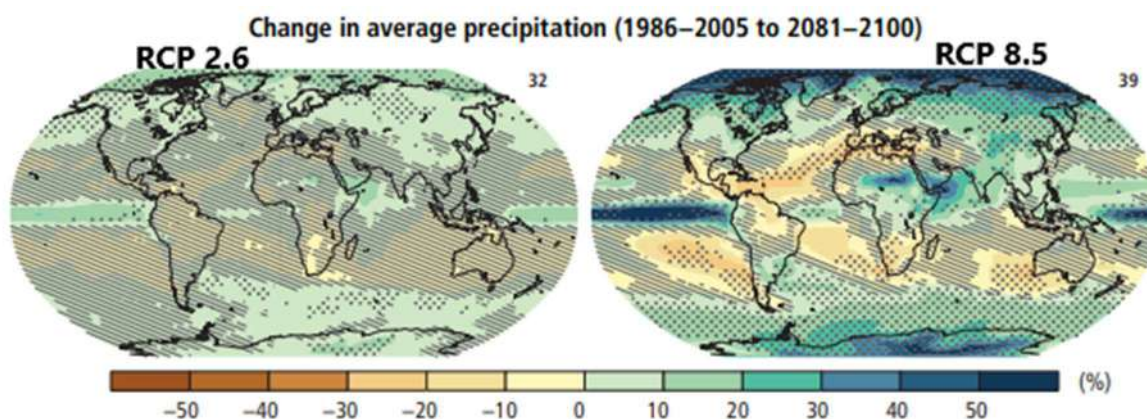
Fonte: extraído de NOAA.

Com o aumento da temperatura atmosférica e dos oceanos, a quantidade de água que se espera evaporar para o ar também aumenta. É dizer, quanto mais úmido o ar que se move sobre a terra ou converge para um sistema de tempestade, maior a probabilidade de produção de precipitação intensa. (EPA, 2022)

Ainda que as mudanças climáticas e o aquecimento do globo terrestre tenham afetado a intensidade e a frequência das precipitações, tais alterações não ocorreram uniformemente. Segundo Wasko et al. (2021), a precipitação média no mundo aumentou aproximadamente 2 (dois) mm/ano por uma década inteira em altas latitudes e no Pacífico Equatorial com tendência de seguir crescendo exponencialmente ao longo dos próximos anos à luz do cenário RCP8.5. Em muitas regiões secas de latitude média e subtropicais, a precipitação média sofrerá efeito

oposto sob o cenário RCP 8.5. Uma das mais graves consequências para esse cenário que tem se configurado, é a maior incidência de inundações (EPA, 2022). A projeção otimista (RCP 2.6) e pessimista (RCP 8.5) para as mudanças nas médias de precipitação se encontram na Figura 7.

Figura 7: Projeção de mudança de precipitação segundo as RCP 2.6 e 8.5.



Fonte: adaptado de IPCC 2015.

Diante do exposto, a Organização Mundial de Meteorologia (do inglês, *World Meteorological Organization* - WMO) indica que o número de desastres naturais nos últimos cinquenta anos quintuplicou, impulsionado pelas mudanças climáticas e pelas condições climáticas mais extremas. Neste cenário de mudanças climáticas, as inundações estão entre o tipo de desastre natural mais frequente e ocorrem quando um transbordamento de água submerge determinada área que normalmente se encontrava seca. De acordo com a WMO, ao longo da última década, entre 80% e 90% de todos os desastres documentados derivados de perigos naturais foram oriundos de inundações, secas, ciclones tropicais e tempestades severas.

As inundações são frequentemente causadas por fortes chuvas, rápida nevasca ou tempestade provocada por um ciclone tropical ou tsunami nas áreas costeiras (WHO, 2023) e podem ser divididas em 3 grupos:

- Inundações repentinas causadas por chuvas rápidas e excessivas que elevam rapidamente o nível da água de rios, riachos, canais.
- Inundações fluviais causadas quando a neve derrete ou há chuva incessante, excedendo a capacidade do rio.

- Inundações costeiras causadas por tempestades associadas a ciclones tropicais e tsunamis.

Outro fenômeno natural devastador que tem se acentuado nos últimos anos é a formação de ciclones e tempestades tropicais. Michener et al. (2014), em sua obra, estudaram os fatores para a formação dessas intempéries e identificaram que o aumento da temperatura submarina da água do mar, distância do equador, gradientes de alta temperatura do ar, baixos valores de corte vertical, alta umidade relativa na troposfera e níveis anteriores de atividade ciclônica estão diretamente correlacionadas. Como a evaporação aumenta exponencialmente com o aumento da temperatura das águas superficiais, foi inferido que mudanças climáticas induzidas pelo aquecimento do oceano e atmosférica poderiam aumentar a frequência e a intensidade das tormentas, bem como aumentar o tamanho das regiões afetadas por tais eventos. Muitos desses fatores também exercem influência no aumento da intensidade de precipitação observado e projetado globalmente.

2.3 NATECHS

Conforme anteriormente citado, as mudanças climáticas estão exercendo razoável influência nos fenômenos naturais, intensificando tempestades, inundações e ondas de calor e, conseqüentemente, aumentando a frequência desses eventos, de forma nunca antes registrada (PILONE et al, 2021). Neste contexto, torna-se imprescindível analisar na indústria os chamados eventos *Natechs* (*natural disasters triggering technological accident*) ou, em tradução livre, acidentes tecnológicos causados por desastres naturais.

Segundo o preceito padrão de segurança de processos, eventos com perda de contenção são atribuídos majoritariamente a falhas internas. No entanto, a análise da literatura recente acerca dos acidentes industriais indica que um número significativo de eventos graves envolvendo substâncias perigosas é oriundo de fatores externos, tais como fenômenos naturais, atos intencionais ou efeito cascata. (LEES, 1980).

Langer et al (2015) definem em sua obra o efeito cascata como uma cadeia imprevista de eventos, o qual ocorre quando determinado evento em um sistema exerce um impacto negativo em outros sistemas devido a uma dependência entre eles.

Embora esforços significativos tenham sido dedicados na literatura técnica à avaliação do efeito cascata, menos atenção foi dedicada à análise de acidentes provocados por eventos naturais, os *Natechs*, que são caracterizados pela perda de contenção de recipientes que

armazenam substâncias químicas e radiológicas pela ação de fenômenos naturais (COZZANI et al, 2016).

O estudo desses eventos teve início primeiramente em 1994 por meio de um artigo publicado por Showalter e Myers. Nele, além da primeira menção aos eventos *Natechs*, investigou-se a percepção das agências de gerenciamento de emergências dos estados norte-americanos acerca da relação entre desastres naturais e emergências tecnológicas, bem como realizaram a distinção entre evento natural, evento tecnológico e evento *Natech* (XAVIER, 2017).

Desse ponto em diante, o aumento dos estudos acerca dos eventos *Natechs* se deu de forma exponencial. Krausmann et al. (2019) apontam em seus estudos que os riscos de eventos *Natech* existem tanto em países desenvolvidos quanto em desenvolvimento, onde indústrias localizadas em áreas de risco de eventos naturais manipulam substâncias perigosas. Os acidentes *Natech* apresentam consequências graves por meio de efeitos sinérgicos entre os desastres naturais e tecnológicos.

Durante os últimos anos se tem observado um aumento no número de ocorrências de eventos naturais que podem provocar consequências severas nas atividades das indústrias (GHEORGHIU et al., 2014). Um estudo desenvolvido por Rasmussen em 1995, indicou que eventos naturais causam cerca de 3% dos acidentes industriais (apud NECCI et al., 2013).

Como a extensão geográfica de um desastre natural é frequentemente extensa (por exemplo, a zona de impacto de um furacão, terremoto ou inundação pode ser de centenas de quilômetros quadrados), muitas instalações industriais podem ser afetadas simultaneamente. Há muitos exemplos que ilustram essa simultaneidade. Um destes é a obra elaborada por Petrova (2011, apud XAVIER, 2017), na qual se destacou o terremoto de Neftegorsk que assolou a Rússia em 1995 e ocasionou aproximadamente 200 rupturas em dutos de petróleo, provocando a perda de contenção de milhares de toneladas de óleo na Ilha Sakalina.

Dessa forma, o número de incidentes com liberação de substâncias perigosas pode ser acentuado, podendo facilmente sobrecarregar a capacidade de resposta das equipes de emergência disponíveis no local e/ou públicas tipicamente habituadas com um pequeno número de eventos ocorrendo isoladamente (CRUZ et al 2007). Atenuar os impactos naturais sobre a população e ao mesmo tempo ter que responder a um acidente *Natech* causado pelo mesmo evento natural conduzirá, inevitavelmente, a uma competição pelos escassos recursos de resposta. (KRAUSMANN et al, 2019)

Com isso, a qualidade da resposta à emergência para os eventos *Natechs* é altamente afetada pelo fato de medidas mitigadoras ou de segurança se tornarem ineficazes devido à perda

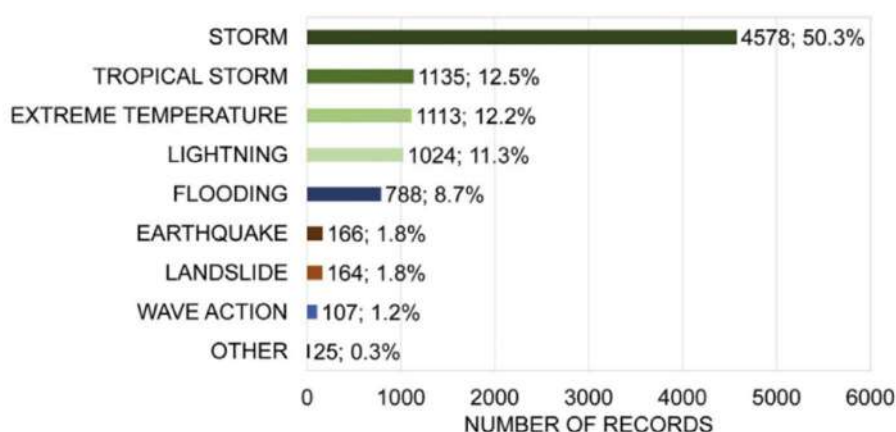
de energia elétrica, fornecimento de água ou interrupção dos sistemas de comunicação, aumentando ainda mais a sua criticidade. (NASCIMENTO, 2016)

Dessa forma, se os efeitos conjuntos dos eventos *Natech* não forem identificados, avaliados e planejados pelas indústrias e pelo governo com o intuito de tornar o gerenciamento de emergência mais efetivo, as partes não estarão preparadas para responder às demandas provocadas pelos eventos *Natech* (CRUZ, 2008).

De forma a entender os fenômenos naturais que estão mais intimamente ligados aos eventos *Natechs*, Cozzani et al, em 2020, criaram um banco de dados constituído de 9.100 acidentes *Natechs* a partir da consolidação de bancos de dados de acidentes industriais genéricos disponíveis na literatura. Ao se analisar tal banco de dados elaborado na obra, foi possível verificar que os eventos meteorológicos são de longe aqueles que causaram o maior número de cenários *Natech* (7866 registros, 86% do total), seguido pelo hidrológico (895 registros, 10% do total).

Depreende-se, portanto, que os eventos meteorológicos parecem mais propensos a causar eventos *Natechs* com respeito a outros tipos de fenômenos naturais, revelando uma possível vulnerabilidade do processo químico e industrial a curto prazo. Ao detalharmos as categorias específicas de eventos meteorológicos que causaram os acidentes registrados, nota-se que tempestades, tempestades tropicais e temperaturas extremas são responsáveis por 74 % dos eventos *Natech* analisados, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8: Eventos Natechs por categoria de fenômenos naturais.



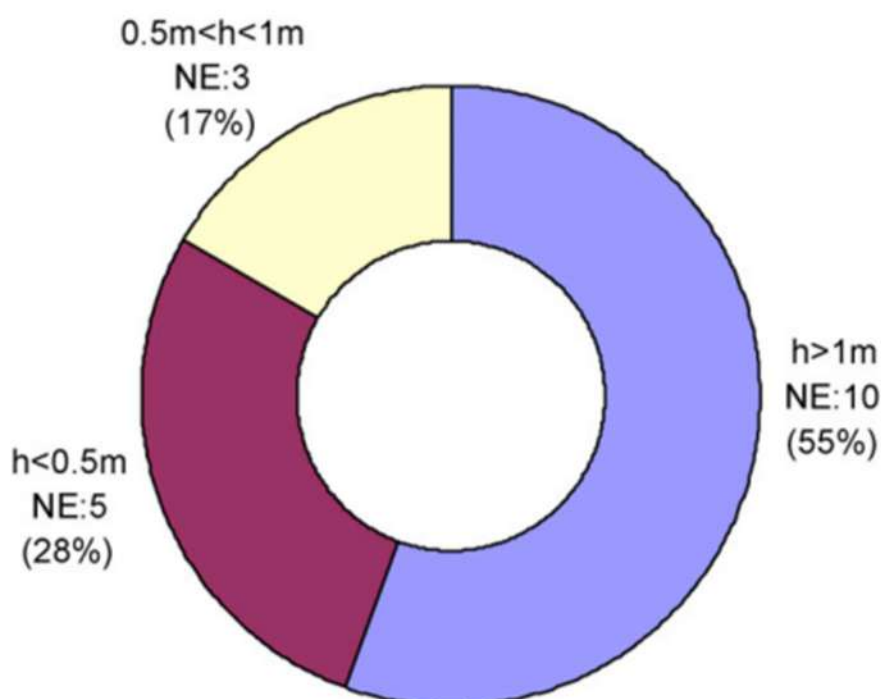
Fonte: COZZANI et al., 2020.

Diante da alta gravidade dos eventos *Natechs* ocasionados por inundações, Cozzani et al. estudaram dois aspectos essenciais em eventos associados a esse evento natural iniciador: a altura da lâmina da água (h) durante as inundações e os aspectos dos cenários após a liberação

das substâncias. A intenção foi desenvolver uma cadeia sistemática de eventos que auxiliasse na estimativa quantitativa do risco *Natech*.

Em 18 dos 272 eventos estudados por Cozzani et al. foi possível obter dados sobre a altura da água, cujos resultados se encontram na figura 9. A Figura representada sugere que uma altura de água (h) superior a 1 metro foi responsável por danos aos equipamentos em mais de 50% dos eventos considerados.

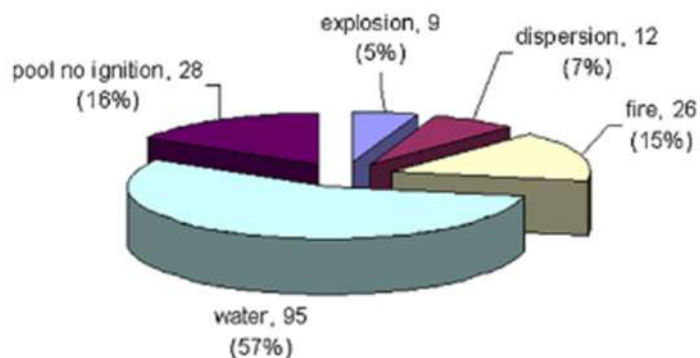
Figura 9: Classificação de 18 (dezoito) eventos Natechs com base na altura da lâmina d'água (h).



Fonte: COZZANI et al. 2010.

Entre as tipologias acidentais ilustradas na Figura 10, foram encontradas explosões (5%), incêndios (15%), ignições sem formação de poça (16%), dispersões atmosféricas (7%) e contaminação dos corpos hídricos (57%), esta última evidenciando que as substâncias vazadas podem se espalhar e causar efeitos em áreas amplas, com possível contaminação do solo e corpos hídricos.

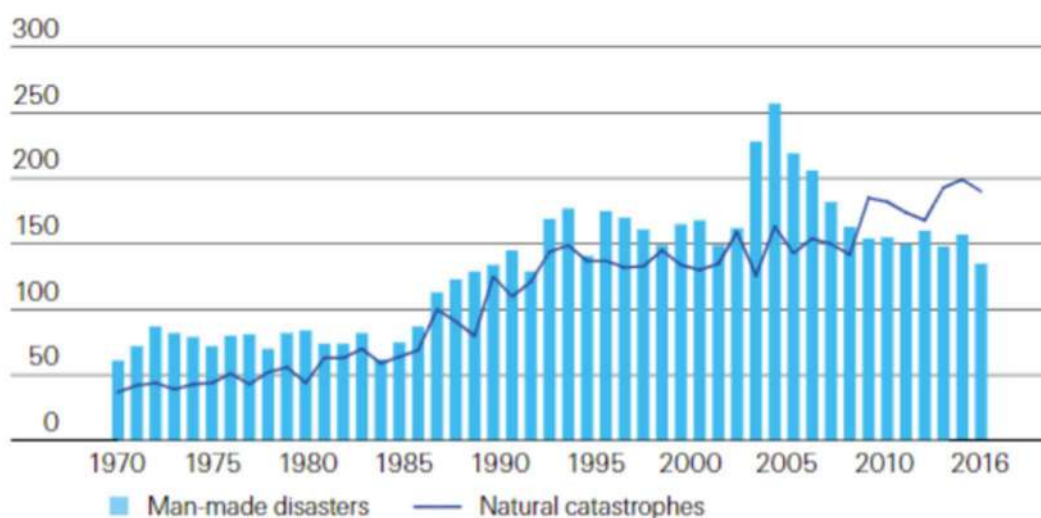
Figura 10: Tipologia de acidentes provocados por inundações.



Fonte: COZZANI et al., 2010.

Além dos efeitos descritos acima, e mesmo considerando que as consequências mais drásticas dos desastres naturais sejam as fatalidades e impactos ambientais, as consequências econômicas desses eventos também devem ser consideradas para avaliar o impacto do desastre. Segundo o estudo de 2017 da seguradora internacional Swiss Re, 42% das perdas das seguradoras foram atribuídas a desastres ambientais. Ainda, ao se analisar os eventos de sinistros dos últimos anos, é possível observar na Figura 11 que os sinistros decorrentes de desastres por falhas humanas abaixaram, enquanto aqueles provenientes de catástrofes naturais estão em uma tendência de alta. Neste mesmo estudo, a seguradora identificou que o risco de inundação é altamente subestimado pela indústria (CSB, 2018).

Figura 11: Estudo da Swiss Re com histórico de sinistros.



Fonte: CSB, 2018.

Por fim, Girgin & Krausmann (2013) corroboram a visão exposta pela seguradora, estimando que o risco de desastres *Natech* aumente no futuro devido à crescente industrialização, o aumento das ocorrências de desastres naturais por causa das mudanças climáticas e a crescente vulnerabilidade da sociedade que está se tornando cada vez mais interligada aos polos industriais. A prevenção e o planejamento de emergências adequadas são necessários tanto para prevenir desastres *Natech*, como para mitigar as suas consequências (apud NASCIMENTO, 2016).

Depreendidos os conceitos primordiais para a compreensão da obra aqui apresentada, abordaremos no capítulo seguinte os fatos que ocorreram em agosto de 2017 e culminaram no acidente na fábrica da Arkema em Crosby, no Texas.

3 O ACIDENTE DE CROSBY

No dia 24 de agosto de 2017, o Furacão Harvey de categoria 4 atingiu a costa do Texas provocando a inundação e prejuízos a área de Houston e suas adjacências. A planta da Arkema, localizada em Crosby a 32 quilômetros de Houston foi uma das mais arduamente impactadas. Com uma onda devastadora de chuvas sem precedentes e a consequente inundação do local, a planta perdeu todas as suas fontes de energia. Sem energia elétrica, os peróxidos orgânicos armazenados na planta não puderam ser estocados sob as temperaturas indicadas para cada composto químico, culminando na combustão e explosão dos produtos em 31 de agosto de 2017 (BLOOMER et al., 2017).

Durante o acidente na planta da Arkema em Crosby e a passagem do Furacão Harvey milhares de moradores tiveram de evacuar suas residências e 21 pessoas buscaram assistência médica após exposição a fumaça tóxica decorrente da combustão.

3.1 FURACÃO HARVEY

Furacões são fenômenos naturais que consistem em um sistema de baixa-pressão intenso que geralmente se formam sobre oceanos em regiões tropicais com temperatura superficial dos oceanos acima dos 26°. (KOBAYAMA et al.,2006).

Em 13 de agosto de 2017, iniciou-se uma tempestade tropical na costa africana, que ao longo dos dias seguintes, atravessou o Oceano Atlântico em direção ao Mar do Caribe, onde perdeu sua força e atingiu o status de onda tropical. Entretanto, em 24 de agosto de 2017, ao atravessar as águas quentes do Golfo do México– que, haja visto, é característica essencial à formação de furacões- se intensificou tanto a ponto de se tornar um furacão de categoria 4, conforme detalhado pelo *National Weather Service* (2017).

Ao atingir o Golfo do México, o furacão se intensificou ainda mais, provocando, para além dos danos já causados, graves impactos ao meio ambiente. Ocorre que essa região é caracterizada como industrialmente densa, na qual se situam diversas companhias de óleo e gás – cuja atividade, conforme sabido, envolve o manuseio de substâncias perigosas, principalmente na produção e armazenamento do petróleo e seus derivados.

Foi então que o Furacão Harvey atingiu a costa do Texas, nos Estados Unidos da América, com ventos máximos de aproximadamente 212 km/h e precipitação de mais de 1000mm. Decerto que tamanha intensidade gerou danos às instalações industriais da região e

inundações sem precedentes, além de ter danificado 300.000 casas e tirado 88 vidas. (QIN et al, 2020)

À passagem do furacão, diversas dessas estruturas foram severamente danificadas, o que provocou a liberação de produtos poluentes e perigosos e, conseqüentemente a poluição de corpos hídricos, ar atmosférico, incêndios e diversas outras situações que causaram efeitos extremamente nocivos ao ambiente ao redor das companhias e nas áreas em si.

Não obstante todas as conseqüências já expostas, o Furacão Harvey também impactou severamente a economia das áreas atingidas. Devido a sua onda de destruição, a paralisação da produção na região, destruição das moradias e infraestrutura, o furacão trouxe prejuízos estimados de USD 125 bilhões, de acordo com o *National Hurricane Center* (NHC). Ainda segundo o estudo do NHC, esses números posicionam o furacão em comento como o 2º (segundo) mais caro aos cofres públicos, atrás apenas do Furacão Katrina, conforme ilustrado na Tabela 4.

Tabela 4: Ranking de furacões mais custosos.

Furacão	Ano	Categoria	Custos Ajustados (Bilhões USD)
Katrina	2005	3	186.3
Harvey	2017	4	125
Maria	2017	4	107.1
Sandy	2012	1	81.9
Ida	2021	4	78.7
Irma	2017	4	59.5
Andrew	1192	5	55.9
Ike	2008	2	40.2
Ivan	2004	3	31.6
Michael	2018	5	29

Fonte: adaptado do relatório do *National Hurricane Center*.

3.2 ARKEMA E SUA PLANTA EM CROSBY NO TEXAS

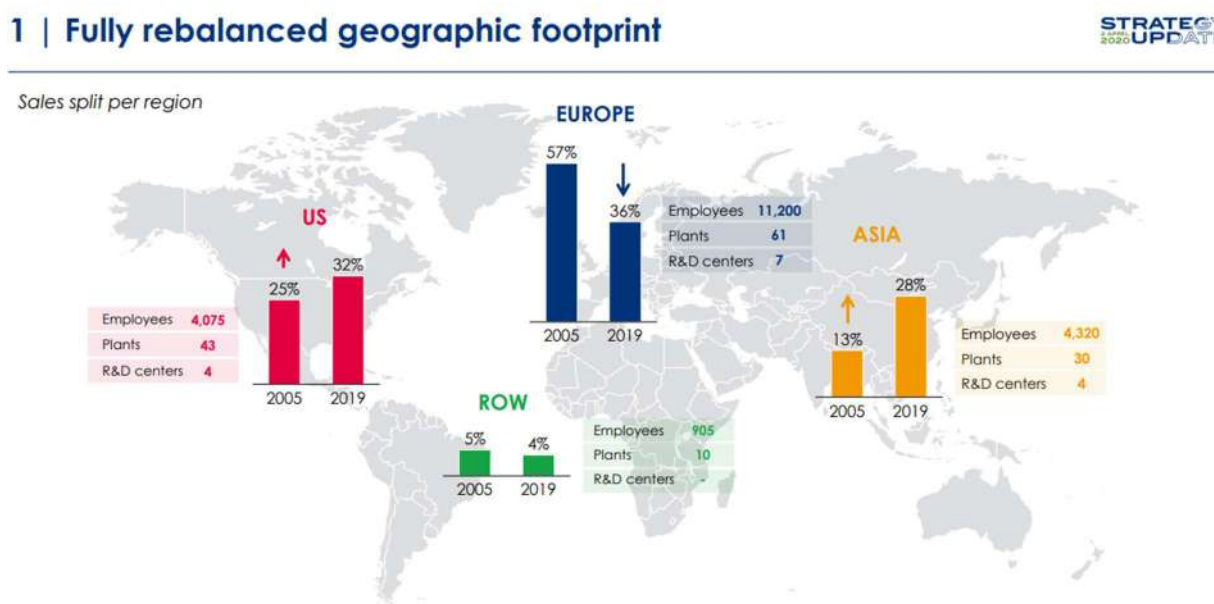
A Arkema foi criada em outubro de 2004, após a reorganização do setor químico da empresa de energia francesa Total. Focada em inovação, aquisições direcionadas e

investimentos em países emergentes, logo se tornou um reconhecido *player* mundial na área de especialidades químicas.

A companhia divulga em seu website que está estruturada em três segmentos principais e complementares dedicados a Materiais Especiais (soluções adesivas, materiais avançados e soluções de revestimento). Esses segmentos representam 82% das vendas totais. Além destes, a Arkema também atua com produtos intermediários.

Com uma consolidada presença industrial e comercial, ela opera em 55 países, incluindo o Brasil. Conta com uma equipe de 20.600 funcionários, 3 centros de Pesquisa e Desenvolvimento e 147 instalações industriais ao redor do mundo, vide Figura 12.

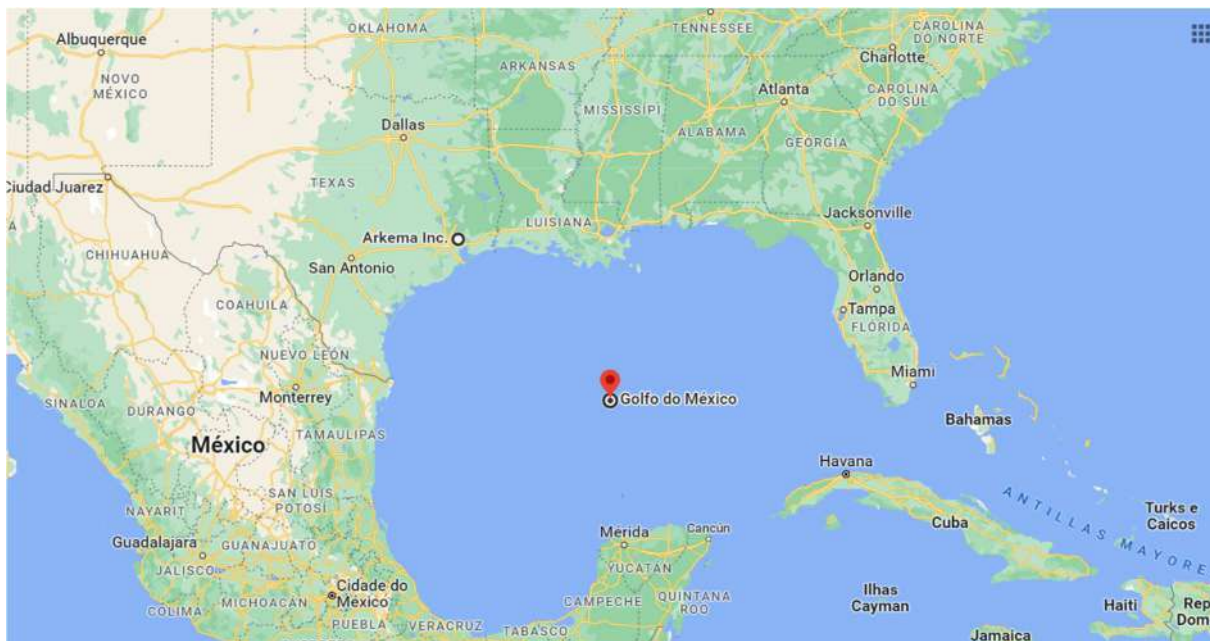
Figura 12: Distribuição global de negócios da Arkema.



Fonte: extraído do website da Arkema, 2023.

Uma das 147 unidades produtivas da Arkema está situada em Crosby, no Texas, uma pequena região nos Estados Unidos, com cerca de 3.000 moradores e à 80 quilômetros de distância da costa do Golfo do México, conforme Figura 13.

Figura 13: Localização geográfica da planta da Arkema em Crosby.



Fonte: imagem extraída do Google Maps, 2023.

A fábrica de Crosby, cuja imagem aérea pode ser observada na Figura 14, armazenava e distribuía peróxidos orgânicos líquidos que eram utilizados principalmente na produção de resinas plásticas, poliestireno, polietileno, polipropileno, policloreto de vinila (PVC) e fibra de vidro reforçada com poliéster e resinas acrílicas. Produzindo cerca de 30 tipos de peróxidos orgânicos diferentes, seus principais clientes eram os fabricantes de polímeros – que utilizavam os diferentes peróxidos em seu processo produtivo – e fabricantes de produtos de consumo em geral, tais como bancadas de superfície sólida, copos e placas de poliestireno, placas e copos de PVC e componentes automotivos (por exemplo, mangueiras, juntas e conjuntos de faróis). Além disso, a instalação empregava em 2017 aproximadamente 50 funcionários (CSB, 2018).

Figura 14: Imagem de satélite da Planta da Arkema, Crosby, TX.



Fonte: Google Earth, 2023.

Por se tratarem de substâncias extremamente reativas, os peróxidos orgânicos ali armazenados demandavam cuidados especiais. Por sua grande termossensibilidade, esses produtos devem ser armazenados sempre abaixo de sua SADT – ou temperatura de decomposição auto acelerada, cujo acrônimo vem do inglês *Self-accelerating decomposition temperature* – isto é, a temperatura mais baixa em que a decomposição auto acelerada ocorre em um peróxido orgânico embalado para transporte (UNITED NATIONS, 1995). Ressalta-se que o início da decomposição das espécies químicas supracitadas pode ocorrer em temperaturas menores que a SADT, entretanto esse processo se dá de forma lenta sem que confira risco de atingir a decomposição auto acelerada.

A SADT, assim, é a combinação dos efeitos da temperatura ambiente, da cinética de decomposição, do tamanho da embalagem e das propriedades de transferência de calor da

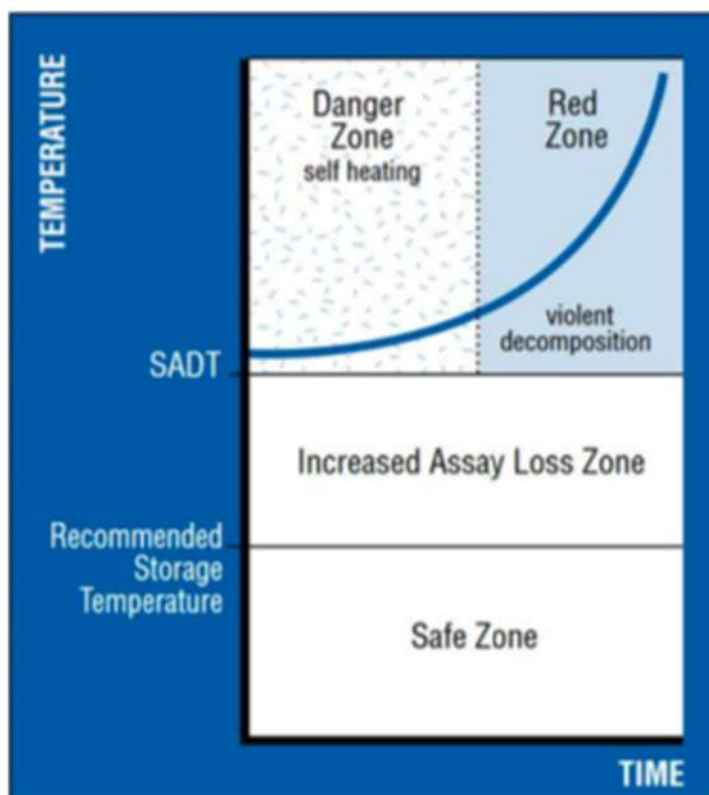
substância e de sua embalagem. Nesse sentido, pode-se dizer que cada peróxido orgânico possui uma SADT própria de acordo com sua natureza e característica química.

No momento em que a SADT é atingida, estar-se-á diante do desencadeamento da reação auto acelerada, no qual o aumento da temperatura promove a decomposição dos peróxidos orgânicos, liberando oxigênio e bastante calor. A energia térmica liberada aumenta a temperatura do sistema e promove a decomposição de novas moléculas. Caso não haja o controle através da utilização de um agente de terminação, por exemplo, é dado início a um ciclo que seguirá desenfreadamente, uma vez que a cinética de geração de calor e decomposição do peróxido orgânico é favorecida frente à dissipação do calor gerado- que, por sua vez, aumenta a temperatura e a taxa de decomposição das moléculas restantes no sistema (J. Loss Prev. Process Ind., 1997)

É nesse momento que a decomposição exotérmica passa a ocorrer de forma descontrolada que se faz presente o risco de ignição, incêndio e/ou explosão térmica. Diante de um cenário de incêndio, utiliza-se a água, molécula apta a dissipar parte do calor gerado, para resfriar os produtos, diminuindo a quantidade de energia disponível para o sistema e, assim, reduzindo a taxa de decomposição (Organic Peroxide, n.d.).

Conforme se observa na figura 15, o armazenamento dos peróxidos orgânicos é bastante crítico durante a sua cadeia produtiva, assim, a fim de evitar acidentes, é indicado armazená-los em temperaturas bem inferiores de sua SADT. Além disso, eles podem ser considerados produtos tóxicos, combustíveis, explosivos e até corrosivos.

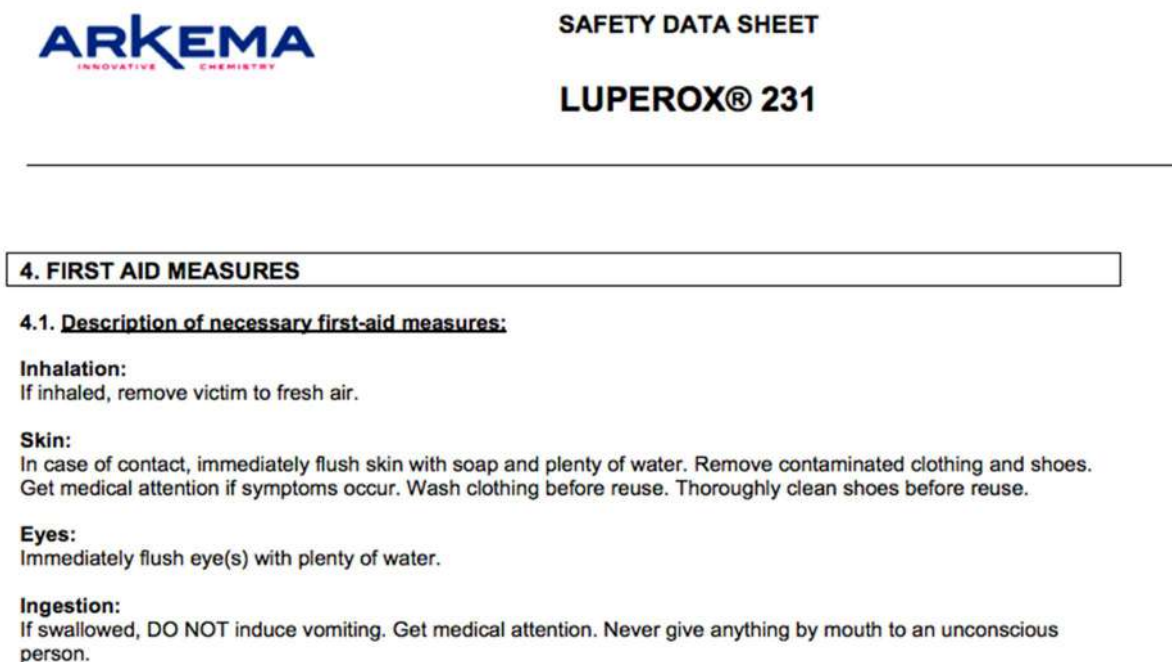
Figura 15: Relação entre a temperatura dos peróxidos orgânicos e suas faixas de periculosidade.



Fonte: CSB, 2018.

E não é só: se o usuário, durante o seu manuseio, inalar, ingerir ou permitir que o peróxido entre em contato com a pele ou olhos, ele poderá sofrer irritação nas áreas em que houve contato, náusea e/ou dores de cabeça. Não é à toa que seu armazenamento correto deva ser realizado respeitando as temperaturas indicadas e que seu manuseio deva ser feito adotando os EPIs adequados, seguindo as recomendações das Fichas de Informação de Segurança de Produtos Químicos (FISPQs) divulgadas e fornecidas pelos fabricantes, como exemplificado na Figura 16.

Figura 16: FISPQ de peróxido orgânico Luperox 231 fabricado pela Arkema.



Fonte: Arkema, 2023.

Dessa forma, a produção, manuseio e armazenamento dos produtos fabricados na planta em questão envolvem diversos cuidados especiais a fim de assegurar a segurança dos funcionários e a integridade dos recursos da companhia, principalmente no que diz respeito ao armazenamento em temperaturas abaixo da SADT.

Os produtos fabricados eram estocados ao longo de 9 armazéns, todos estes capazes de armazenar peróxidos orgânicos respeitando as suas respectivas SADTs. Um deles operava em temperatura ambiente e o armazém com maior espaço para estoque de produtos tinha a capacidade de criar ambientes com temperaturas que variavam desde 5 °C à temperatura ambiente. Além desses, a planta também possuía outros 7 armazéns, capazes de estocar tais produtos em temperaturas inferiores a -7 °C, eram os chamados *Low temperature Warehouses* (Armazéns de baixas temperaturas - ABT), equipados com um sistema de refrigeração principal e um backup (CSB, 2018),

Diante da necessidade de armazenamento dos peróxidos orgânicos em temperaturas abaixo de suas SADT nos ABTs, a fábrica da Arkema possuía diversas alternativas para refrigeração a fim de mitigar ao máximo o risco de explosão e incêndio.

3.2.1 Sistema de refrigeração elétrico

A refrigeração principal dos 7 armazéns de baixa temperatura consistia em um sistema refrigerador movido por energia elétrica, composto por um evaporador no interior do ABT, utilizado para remover o calor de dentro do armazém e um condensador, localizado na área exterior cuja função era remover o calor do refrigerante e o dispersar para a atmosfera. O evaporador e condensador podem ser observados respectivamente nas figuras 17 e 18.

Figura 17: Evaporador no interior do ABT.



Fonte: extraído de CSB, 2018.

Figura 18: Condensador para retirada do calor do refrigerante.



Fonte: extraído de CSB, 2018.

3.2.2 Geradores de emergência

Como alternativa ao sistema de refrigeração elétrico em situações de falta de energia, a planta da Arkema possuía 7 geradores movidos à diesel, sendo 2 deles responsáveis por suprir a demanda dos 7 ABTs.

Os geradores, exemplificados pela Figura 19, estavam posicionados a cerca de 60 cm acima do nível do solo, sobre uma fundação de concreto, de forma a evitar que inundações impedissem a sua operação.

Figura 19: Geradores de emergência.



Fonte: extraído de CSB, 2018.

3.2.3 Sistema de nitrogênio líquido

Outra alternativa para refrigeração dos armazéns de baixas temperaturas é o sistema de Nitrogênio Líquido disponível no interior da planta da Arkema. O sistema ilustrado na Figura 20 consistia em um tanque com capacidade de armazenamento de 18 toneladas de nitrogênio líquido à baixíssimas temperaturas e tubulações dedicadas para cada um dos armazéns de peróxidos orgânicos.

Em caso de perda de energia elétrica principal ou reserva, esse sistema deveria ser acionado pelos trabalhadores para manter os peróxidos orgânicos abaixo de suas respectivas SADT.

Figura 20: Tanque de nitrogênio líquido.



Fonte: extraído de CSB, 2018.

3.2.4 Semirreboques refrigerados

Considerado a última alternativa para refrigeração dos produtos estocados nos ABT, a planta considera em seu plano de Gerenciamento de Riscos a possibilidade de realocação dos peróxidos orgânicos em semirreboques refrigerados (Figuras 21 e 22) no caso de emergências ou manutenção em alguns dos armazéns.

Com funcionamento à diesel, os semirreboques refrigerados possuem autonomia para manutenção de refrigeração no seu interior por mais de uma semana quando totalmente abastecidos com o seu combustível.

Figura 21: Semirreboque Refrigerado.



Fonte: extraído de CSB, 2018.

Figura 22: Tanque de Diesel localizado embaixo do semirreboque refrigerado.



Fonte: extraído de CSB, 2018.

3.3 DESCRIÇÃO DOS FATOS

Este item foi baseado no relatório oficial “*Organic Peroxide Decomposition, Release, and Fire at Arkema Crosby Following Hurricane Harvey Flooding*”, de 2018, desenvolvido a partir da investigação do *U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board*.

Ao passar pelo Golfo do México em 24 de agosto de 2017, deixando para trás um rastro enorme de inundações e destruição, constatou-se que o Furacão Harvey seguiria seu curso rumo aos Estados Unidos da América nos próximos dias. Segundo análises e modelos meteorológicos do NHC, alertou-se que ele estava se tornando mais forte e aterrissaria na região costeira do Texas, com grandes chuvas da ordem de 63 a 90 cm e possibilidades reais de inundações.

A planta da Arkema de Crosby, TX possuía um Plano de Preparação para Furacões, indicando todas as medidas a serem tomadas para a proteção dos funcionários e equipamentos antes, durante e após a passagem de tais fenômenos naturais. Nele, a equipe designada para a

implementação do plano se encontrava desde o início da temporada de furacões, em junho, monitorando a formação e passagem de tormentas e tempestades nas redondezas decidindo em conjunto com outros funcionários da companhia quando o plano deveria ser acionado ou não.

Ao acionar o plano, a Equipe de Resposta a Emergência deveria permanecer na fábrica durante o furacão, atuando para garantir a segurança de todos, a integridade da instalação, comunicar e monitorar a situação climática. A Equipe era composta por 2 gerentes ou supervisores, quatro operadores, um especialista de refrigeração, três operadores de manutenção e dois mecânicos ou eletricitas, todos funcionários da planta.

Com o aviso emitido pelo NHC, noticiário meteorológico local e o monitoramento feito pelos funcionários da planta de Crosby, acreditava-se que o furacão Harvey atingiria a região sul da unidade Industrial no dia seguinte. Diante dos fortes indícios, iniciou-se a preparação para garantir a possível implementação do Plano de Preparação para Furacões.

Ainda, com base na experiência dos gerentes da planta, a quantidade de chuva prevista acarretaria o alagamento das rodovias próximas e inundações de 31 a 62 cm na fábrica, sem comprometer os sistemas de segurança da mesma, dificultando apenas o deslocamento dos trabalhadores.

Já em 25 de agosto de 2017, a previsão meteorológica indicava chuvas da ordem de 90 cm e a elevação da categoria do furacão para categoria 4, com rajadas de vento de até 210 Km/h.

Diante de tais notícias desanimadoras e a iminente chegada do furacão na sua região, a Arkema optou por paralisar suas operações na planta e deu início ao Plano de Preparação para Furacões, com a execução de diversas medidas, dentre elas:

- Encher tanque de diesel para uso nos semirreboques refrigerados e geradores de energia
- Disponibilização de equipamentos para utilização durante a tempestade, como empilhadeira *off-road* e barco para águas rasas
- Garantir que o tanque de nitrogênio líquido esteja cheio
- Reduzir o nível da estação de tratamento de efluente
- Revisão dos cenários de emergência envolvendo tempestades e ações corretivas junto a Equipe de resposta a Emergência

Até o final do dia (25 de agosto de 2017), cerca de 2,5 cm de chuva haviam caído sobre a planta de Crosby decorrente da tempestade do furacão Harvey enquanto o mesmo se encontrava a 50 Km, aproximando-se do local. Vale ressaltar que mesmo com todas essas

informações, houve pouca preocupação com a possibilidade de falta de energia e efeitos na refrigeração dos peróxidos orgânicos da planta nesse momento.

No dia 26 de agosto, as chuvas se intensificaram na planta de Crosby de modo que os primeiros pontos de alagamento surgiram. Com isso, a Equipe de Resposta a Emergência iniciou a verificação do risco de inundação dos equipamentos elétricos dentro da indústria, determinando o quão próximo do solo os mesmos se encontravam.

Caso esse cenário caótico não fosse amenizado, teriam de ativamente desconectar os equipamentos elétricos da planta, evitando que os mesmos entrassem em curto-circuito. O principal risco identificado dentre os equipamentos elétricos era a inundação do transformador de energia próximo ao armazém de baixas temperaturas (ABT) conforme Figura 23, dado que o curto-circuito deste poderia danificar outros dispositivos e eletrocutar funcionários. Além disso, fora estabelecido que caso algum edifício ou armazém sofresse risco de inundação pela proximidade com o nível da água, deveria ser desligada a energia de todo o edifício em questão.

Figura 23: Identificação dos geradores, ABTs, transformadores e região elevada na planta de Crosby.



Fonte: extraído de Google Earth, 2023.

Ao longo do dia (26 de agosto), foram realizadas diversas expedições ao redor da planta verificando principalmente a integridade dos sistemas de utilidades, a elevação do nível de água de alagamento e a condição da estação de tratamento de efluentes, de forma que a mesma mantivesse o seu potencial de tratamento mesmo com a grande carga hídrica recebida.

De noite, a tempestade danificou o sistema de telefones da planta e os funcionários apenas se comunicavam apenas através de celulares. Ao todo, foram registrados pelo equipamento de medição pluviométrico próximo a fábrica um volume de 13 cm para o dia em questão. Nesse cenário, a Arkema ainda acreditava que o evento pudesse ser controlado sem maiores problemas operacionais ou estruturais à planta de Crosby.

Domingo, 27 de agosto de 2017, foi o dia com maior quantidade diária de chuva durante a passagem do furacão Harvey, despejando incríveis 60 cm de chuva na região de Crosby e até 130 cm em outras áreas próximas.

Logo no início do dia (27 de agosto de 2017), com o alto nível de água próximo aos ABT 1, 2 e 3, optou-se por realizar o desligamento da eletricidade destes armazéns e do gerador reserva que os atendia. Nessas condições, os ABT 1, 2 e 3 não possuíam mais potencial de refrigeração e os peróxidos orgânicos armazenados iriam aumentar de temperatura, atingindo a SADT, provocando possíveis combustões ou explosões conforme explicado anteriormente.

Ciente desse risco, a Equipe de Resposta a Emergência remanejou os produtos para os outros 4 armazéns e 2 dos 11 semirreboques refrigerados disponíveis na planta com o auxílio de uma empilhadeira *off road*. Ao todo foram movidos 20 pallets de peróxidos orgânicos e os dois semirreboques abastecidos foram deslocados com o auxílio de cavalo mecânico até uma das áreas mais elevadas da planta, a área de descarga demarcada como região elevada do terreno na Figura 23.

Com a iminente perda do sistema de refrigeração elétrico e geradores à diesel dos ABT restantes, a Equipe identificou a necessidade de verificar o tanque de nitrogênio líquido, um dos sistemas alternativos de refrigeração dos peróxidos orgânicos dentro dos armazéns. O tanque permitia a introdução de NO₂ líquido através de tubulações em cada um dos ABT e a refrigeração do ambiente. Contudo, observou-se que a tubulação já se encontrava submersa. Como forma de manter o sistema operante, instalou-se uma extensão para que fosse possível acessar a mesma caso o nível de água continuasse a subir. Acreditava-se que a extensão adicionada à tubulação seria o suficiente, com base na experiência do supervisor da planta, com cerca de 40 anos de serviços prestados a planta de Crosby, de que tal extensão jamais seria ultrapassada pelo nível de água de inundação.

No decorrer do dia 27 de agosto, com o crescente incremento no nível de água e possível inundação dos equipamentos elétricos de refrigeração, a Equipe cortou a energia dos ABT 4, 5 e 6 e outros edifícios do *site*, remanejando seus conteúdos, de forma análoga ao realizado anteriormente, para o ABT 7 e outros 4 semirreboques refrigerados. Os 4 containers preenchidos também foram deslocados para a área de descarga com o auxílio do cavalo mecânico.

Após o corte de energia, os funcionários se encontraram sem acesso aos sistemas de monitoramento remoto de diversos equipamentos de segurança. Passaram a se revezar e realizar aferições manuais de hora em hora, aumentando a sua carga de trabalho e exposição ao ambiente extremamente perigoso do furacão Harvey.

Ao final do dia (27 de agosto), a Equipe de Resposta a Emergência se encontrava com apenas um dos sete ABT em operação, sem sistema de telefone e medição online de equipamentos de segurança, porém ainda se acreditava que as chuvas iriam cessar e iriam conseguir administrar a situação sem maiores consequências.

Ao contrário da expectativa dos envolvidos, a situação não melhorou no dia seguinte. Mesmo com a diminuição da intensidade das chuvas na planta da Arkema, a água decorrente da inundação das áreas próximas continuava aumentando o nível de água na instalação fabril. Além disso, as bombas para tratamento de efluente também pararam de operar, impedindo que o efluente fosse expulso para os diques.

Logo ao amanhecer, no dia 28 de agosto de 2017, o transformador que alimentava o ABT 7 parou de funcionar. Os geradores reservas 2 e 3 automaticamente iniciaram sua operação nesse instante até que um deles também apresentou falha por conta da inundação. Nesse momento, a Equipe identificou que com o crescente aumento da inundação, o gerador restante que fornecia energia para refrigeração do armazém logo iria cessar de operar e decidiu iniciar a remoção das 45 toneladas de peróxidos orgânicos para os semirreboques restantes, nos quais eles teriam uma maior chance de se manterem à baixas temperaturas sem atingir suas respectivas SADTs.

Nas horas seguintes, a Equipe proativamente desligou o último gerador por conta do risco de inundação do mesmo, deixando todos os ABTs sem qualquer tipo de refrigeração.

Como alternativa a eletricidade, os trabalhadores verificaram o outro sistema passível de refrigeração dos armazéns, o tanque de nitrogênio líquido. Para surpresa dos mesmos, a extensão de 30 cm conectada no dia anterior já se encontrava completamente submersa, extinguindo a possibilidade de utilização dessa fonte de refrigeração.

Desse ponto em diante, durante a operação de movimentação do conteúdo no interior do ABT 7 para abastecimento dos semirreboques refrigerados restantes, uma sequência de falhas acometeu os equipamentos utilizados. A empilhadeira *off road* e o cavalo mecânico utilizado para movimentar os semirreboques para a região mais elevada do terreno tiveram seus circuitos elétricos danificados pela inundação. Com isso a equipe não conseguia mais encher de forma eficaz e segura os semirreboques refrigerados nem os deslocar para a área menos afetada do terreno, permanecendo na frente do ABT 7 até o final da passagem do Furacão Harvey.

Como ainda restavam 50 pallets dos peróxidos orgânicos estocados no ABT 7, sem fontes de refrigeração e com a possibilidade de os produtos atingirem sua SADT caso nenhuma ação fosse tomada, a Equipe decidiu agir. Sob água de inundação na altura de seus peitos, quebraram os pallets contendo os produtos perigosos e os movimentaram container por container, manualmente, até os semirreboques refrigerados em frente as baias do armazém. Durante horas de trabalho árduo, os trabalhadores conseguiram remanejar 2.160 containers do produto até que o último semirreboque fosse preenchido, finalizando o trabalho em completa escuridão contando apenas com o auxílio de lanternas para melhor visualização do terreno. Ao longo da passagem do furacão Harvey, eles movimentaram 11 peróxidos orgânicos diferentes, 160 toneladas de produtos envasados em 10.500 frascos individuais carregados em 9 semirreboques refrigerados.

Do total carregado, 4.000 containers de peróxidos orgânicos que dependiam de refrigeração para impedir que atingissem suas SADTs permaneceram nos 3 semirreboques refrigerados nas baias do ABT 7, em uma área de baixa elevação do terreno. Mesmo com combustível para garantir a operação dos semirreboques, o aumento do nível de água causava grande apreensão, dado que a qualquer momento os mesmos poderiam ser inundados, causando possíveis explosões ou combustões decorrentes do aquecimento dos produtos contidos.

Logo após o fim do carregamento, a Equipe de Resposta a Emergência relatou a situação dentro do *site* aos membros do comitê de crise da Arkema, os quais imediatamente alertaram o Corpo de bombeiros de Harris County acerca da possibilidade de liberação de produtos químicos perigosos no ambiente e incêndio. Nesse momento, o comitê de crise da companhia já trabalhava com a hipótese de que os semirreboques refrigerados que não foram deslocados até a área de descarga não conseguiriam manter suas funções e que os peróxidos orgânicos atingiriam suas SADT e entrariam em combustão nos próximos dias.

No dia 29 de agosto de 2017 pela manhã, os trabalhadores na planta realizaram uma ronda de barco para averiguação das condições. Constataram que um dos semirreboques do

armazém havia tombado durante a noite e que cedo ou tarde eles perderiam o seu poder de refrigeração. Na mesma verificação, observaram que todos os 6 semirreboques refrigerados na área de descarga ainda mantinham suas funções de forma satisfatória. Ao comunicarem tais fatos para o comitê de crise da Arkema e diante do eminente incêndio, foi solicitada a evacuação da equipe pelos bombeiros de Harris County.

Com o passar das horas e o contínuo aumento do nível da água durante a inundação, a estação de tratamento de efluentes não suportou e transbordou, liberando aproximadamente 10 toneladas de rejeitos orgânicos no ambiente. Uma lista dos produtos químicos despejados pode ser verificada na tabela 5:

Tabela 5: Químicos despejados no transbordamento da ETE.

Produto Químico	Quantidade (Kg)
C5H12O	919
C4H10O	919
C8H18O2	230
C10H22O2	230
C16H34O4	230
Etilbenzeno	184
Naftaleno	184
Nafta	2,762
Xileno	184
C9H12	1,011

Fonte: adaptado de CSB, 2018.

Ao longo do dia (29 de agosto), os fabricantes de 6 dos 9 semirreboques refrigerados passaram a fornecer dados de telemetria acerca da temperatura no interior dos semirreboques e informações sobre a capacidade de refrigeração ou não de seu conteúdo. Da posse dessas informações e com base nas SADT dos 11 produtos no interior dos semirreboques, funcionários da Arkema puderam ter mais uma fonte de informação para se balizar sobre o quão próximo os produtos estavam de entrar em combustão.

Diante do cenário extremamente desafiador e do eminente início do evento de incêndio e possível explosão dos peróxidos orgânicos no interior dos semirreboques refrigerados, optou-se por instaurar uma zona de evacuação ao redor da fábrica. Para demarcar a área, membros de agências de Resposta a Emergência como a Agência Federal de Gestão de Emergências, dos

Estados Unidos (FEMA), EPA (do acrônimo em inglês, *Environmental Protection Agency*) e o Departamento de Corpo de Bombeiros de Harris County realizaram modelagens com base no pior cenário possível descrito no Plano de Gerenciamento de Risco, no qual a liberação de dióxido de enxofre e explosão do tanque de armazenamento de isobutileno (matérias-primas para fabricação dos compostos orgânicos), incêndio dos peróxidos orgânicos e liberação de cinzas decorrentes da queima dos 9 semirreboques foram considerados. O resultado foi a demarcação de uma área de 2,4 Km ao redor da planta, conforme Figura 24.

Figura 24: Zona de evacuação ao redor da planta da Arkema.



Fonte: recortado de vídeo de ABC news, 2018.

Ao anoitecer, de forma a garantir maior clareza das informações e auxiliar na evacuação dos moradores da região durante o período de crise, a Arkema emitiu um comunicado público alertando aos cidadãos sobre os riscos reais de liberação de produtos químicos perigosos na atmosfera, com possíveis incêndios e explosões em sua indústria situada em Crosby.

Em 30 de agosto, com o agravamento da situação na fábrica da Arkema, foi designado um Comando Unificado, cujos membros eram representantes da Arkema, EPA, *Texas Commission on Environmental Quality*, Departamento de Bombeiros de Harris County, Departamento de polícia de Harris County, Controle de Poluição de Harris County e o Esquadrão Anti-Bombas de Harris County. Com o estabelecimento do Comando Unificado, era

À noite, dois policiais cruzaram a Highway 90 para atender a um chamado de socorro por conta das inundações. Ao atingirem a região próxima a indústria da Arkema, notaram uma grande nuvem de gás, que adentrou o veículo. Os mesmos retornaram ao seu ponto de origem e retrataram o ocorrido ao supervisor e Comando Unificado. Ainda, relataram ter sentido um forte odor de produto químico e reações adversas como irritação nos olhos, garganta, pele e respiratória. Diante disso, acreditava-se que a nuvem de gás seria proveniente de uma liberação de produto químico da planta e iniciou-se o processo de fechamento da rodovia.

Já no dia 31 de agosto, foram avaliados os dados de telemetria disponíveis para verificar se de fato a combustão dos peróxidos estava em curso conforme apontado pelos policiais. Os dados não indicavam qualquer pico de temperatura nos semirreboques refrigerados. Para assegurar que de fato os produtos não estavam em decomposição, o Comando Unificado designou dois voluntários do Corpo de Bombeiros de Crosby para se deslocar até a planta e verificar se havia indícios da liberação de produto químico. Os bombeiros não identificaram nada parecido com a decomposição de peróxido orgânico nas instalações, reportaram ao Comando Unificado e voltaram para as suas bases. Diante do exposto e da necessidade de utilizar a Highway 90 como forma de envio de recursos para Beaumont, as autoridades decidiram reabrir a rodovia novamente ao tráfego. A reabertura da via durou pouco tempo, pois momentos depois policiais afirmaram cruzar uma nuvem com forte odor de produtos químicos e optou-se por fechar a rodovia novamente. Pouco depois, constatou-se que se os peróxidos orgânicos em um dos semirreboques haviam entrado em combustão.

Ao longo do dia 31 de agosto, voos de reconhecimento e monitoramento foram executados e indicaram baixa presença de peróxidos orgânicos. Apesar dos resultados animadores, os mesmos foram de baixa relevância diante da altitude e distância, não refletindo as reais condições ao nível do solo.

Ao final do dia (31 de agosto), a Arkema liberou um comunicado alertando o público sobre a real situação acerca da sequência de eventos na planta de Crosby. Nele, frisaram o fato de que haviam perdido todas as fontes de energia, principal e reservas, acarretando a perda de refrigeração para os produtos da fábrica. Ainda, informaram que os mesmos estavam em vias de explodir e/ou entrar em combustão. Segundo a companhia, os altos níveis de água impossibilitaram qualquer ação de prevenção aos eventos citados acima.

Durante a manhã seguinte, no dia 01 de setembro, helicópteros foram utilizados para sobrevoar a região da planta, verificando possíveis sinais de fumaça, combustão nos semirreboques refrigerados e sobretudo a condição dos tanques de isobutileno e dióxido de enxofre, localizados próximos aos semirreboques. Concluiu-se que não havia indícios de

combustão nos semirreboques restantes carregados com peróxidos orgânicos nem nos tanques descritos acima.

Ao final da tarde, mais dois semirreboques refrigerados entraram em ignição e queimaram. Nesse momento, os três últimos ainda abastecidos com os peróxidos orgânicos provenientes dos armazéns e que não puderam ser deslocados até a área mais alta do terreno entraram em combustão, permanecendo intactos os 6 semirreboques restantes na região mais alta do terreno.

Já no dia 02 de setembro de 2017, novos sobrevoos e avaliações foram executadas a fim de verificar a integridades dos tanques e semirreboques remanescentes. Através dos mesmos, foi constatada a presença de fumaça de um produto em alta temperatura. Apesar de não ter muita certeza acerca do conteúdo, representantes da Arkema suspeitavam que se tratava de um subproduto decorrente da decomposição dos peróxidos orgânicos.

Com a manutenção da zona de evacuação ao redor da planta, diversos moradores começaram a expressar seu descontentamento e pressionar os responsáveis para entrar no perímetro e que medidas de contenção fossem tomadas. Após uma reunião entre o Comando Unificado, ficou decidido a aprovação de um plano para conduzir um incêndio controlado nos 6 semirreboques restantes, desde que as condições mínimas para o mesmo estivessem atendidas.

Em 3 de setembro de 2017, voos de reconhecimento constataram a presença de mais vazamentos nos outros semirreboques refrigerados. Diante dessa informação, uma nova reunião do Comando Unificado decidiu que a melhor decisão seria seguir com o plano de emergência, desde que os tanques de isobutileno estivessem íntegros e sem indícios de peróxidos orgânicos nas proximidades.

Na parte da tarde, o time de brigadistas foi informado acerca do passo a passo do Plano e iniciou o reconhecimento visual do local. Nenhum indício de peróxido orgânico foi constatado nas proximidades do tanque de isobutileno e optou-se por seguir conforme planejado. Equipados com EPIs como máscaras de respiração e roupas antichamas, os brigadistas posicionaram dispositivos incendiários em cada um dos 6 semirreboques refrigerados.

Às 15:40 deu-se início ao incêndio controlado e ao final do processo medições foram realizadas a fim de verificar a qualidade do ar próximo a região. Como nenhum poluente estava acima dos níveis aceitáveis, optou-se por encerrar a zona de evacuação e permitir que os moradores pudessem retornar às suas casas.

O acidente na planta da Arkema em Crosby decorrente do impacto do Furacão Harvey atraiu a atenção da comunidade científica para os eventos *Natechs* e a grande necessidade de

revisão das barreiras no processo produtivo diante das severas mudanças climáticas que estamos vivenciando.

No capítulo seguinte, identificaremos algumas falhas que ocorreram no acidente no âmbito de segurança de processos e de que forma podemos prevenir que incidentes semelhantes ocorram incorporando controles tendo em vista as mudanças climáticas identificadas.

4 ANÁLISE DAS FALHAS EM SEGURANÇA DE PROCESSOS

Durante a investigação de acidentes, uma das atividades cruciais e de maior relevância para a prevenção de possíveis futuros incidentes é a análise da causa raiz.

A última dinâmica de avaliação do risco inerente ao armazenamento dos peróxidos orgânicos na planta de Crosby anterior a passagem do Furacão Harvey foi conduzida pela Arkema em 2013. Durante essa avaliação, os colaboradores da empresa elaboraram uma matriz de risco para identificar os cenários de perda de refrigeração nos armazéns de baixa temperatura, além de avaliarem a frequência e a severidade das consequências associadas.

Segundo a investigação do CSB de 2018, dentre os cenários analisados pela equipe, estavam a perda de refrigeração nos ABT por falha nos compressores, vazamento de gás refrigerante ou falta de energia. A equipe considerou esses eventos bastante prováveis e como possíveis consequências atingir a SADT provocando a decomposição dos peróxidos orgânicos acarretando um incêndio e lesões nos funcionários, cuja severidade foi considerada crítica. Cruzando-se os graus de frequência e severidade, concluiu-se que o risco era intolerável.

A Arkema determinava em sua política de segurança que todos os riscos taxados como intoleráveis fossem avaliados extensivamente. Dessa forma, a equipe utilizou-se de métodos semiquantitativos de análise das camadas de proteção e avaliou de que forma os cenários de perda de refrigeração seriam mitigados considerando a eficiência das barreiras já implementadas, assim como avaliaram que outras melhorias poderiam ser desenvolvidas seguindo os conceitos do ALARP. Nessa etapa, não houve qualquer documentação da avaliação de inundações ou quaisquer outros eventos naturais que pudessem comprometer a refrigeração dos peróxidos orgânicos ultrapassando as barreiras implementadas.

Foram consideradas como barreiras a disponibilização dos geradores de energia elétrica como alternativa durante uma falta de energia, fonte alternativa de refrigeração utilizando nitrogênio líquido e a possibilidade de movimentação dos peróxidos orgânicos para outros ABT ou semirreboques refrigerados. Considerando-se essas barreiras, a equipe envolvida conferiu créditos que reduziram a possibilidade de perda de refrigeração atingindo um nível considerado tolerável na matriz de risco, conforme exemplificado na figura 26.

Figura 26: Matriz de risco perda de refrigeração nos Armazéns de Baixa Temperatura.

Matriz de Risco		Severidade			
		Desprezível	Marginal	Crítica	Catastrófica
Frequência	Frequente	Moderado	Moderado	Intolerável	Intolerável
	Provável	Moderado	Moderado	Intolerável	Intolerável
	Possível	Tolerável	Moderado	Moderado	Intolerável
	Improvável	Tolerável	Tolerável	Moderado	Moderado
	Raro	Tolerável	Tolerável	Tolerável	Moderado

Sem implementação das barreiras

Após implementação das barreiras

Fonte: adaptado de CSB, 2018.

A partir do detalhamento da sequência dos fatos ocorridos nos meses de agosto e setembro de 2017 e avaliação do risco de perda de refrigeração nos ABT de peróxidos orgânicos é possível identificar e analisar pontos de melhoria nos processos e operações da fábrica da Arkema em Crosby. Os principais pontos de melhorias identificados durante a análise do acidente decorrente da passagem do Furacão Harvey são:

- Análise do histórico de inundações na região e incorporação desse risco durante a avaliação dos perigos
- Evitar que um modo de falha comum acometa os sistemas de refrigeração
- Incorporação da avaliação de riscos *Natech* durante a confecção do Plano de Resposta à Emergência

Neste capítulo abordaremos esses pontos e de que forma seus efeitos poderiam ter sido mitigados.

4.1 ANÁLISE DO HISTÓRICO DE INUNDAÇÕES NA REGIÃO E INCORPORAÇÃO DESSE RISCO DURANTE A AVALIAÇÃO DOS PERIGOS

No ano anterior ao Furacão Harvey a Planta da Arkema em Crosby era segurada pela companhia FM Global. Dentre as suas funções e de forma a garantir a melhor cotação para o cliente, a seguradora designava engenheiros para visitar a planta do cliente segurado, avaliando as instalações e as possíveis perdas decorrentes de fenômenos naturais, elaborando mapeamentos de incidência de inundações, ventanias e terremotos, por exemplo.

Durante visitas a fábrica da Arkema, os engenheiros da FM Global se encontraram com o então gerente da Planta de Crosby – desligado em 2017, antes do Furacão - e elaboraram um relatório informando que tal terreno era suscetível a alagamentos, estava situado em uma planície vulnerável a inundações de 100 e 500 anos e apresentou estimativas de perdas

decorrentes de eventos dessa magnitude (CSB, 2018). As chamadas áreas de inundações de 100 anos são descritas pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (do inglês, *United States Department of Agriculture – USDA*) como regiões que possuem 1% de chance de serem inundadas durante uma chuva em determinado ano, enquanto as inundações de 500 anos são aquelas com 0,20% de chance de serem alagadas em determinado ano. Dessa forma, pode-se inferir que as áreas de inundações de 100 anos são aquelas que possuem maior exposição ao risco de alagamento em comparação com as regiões de inundações de 500 anos.

Além da análise conduzida pela seguradora durante as visitas, ela também se utilizou de estudos da FEMA para caracterizar de forma mais assertiva o terreno da fábrica de Crosby. Dentre as diversas funções da FEMA, uma das suas contribuições para a gestão de emergências nos Estados Unidos é a confecção e disponibilização de mapas de alagamento de regiões no país. Nesse mapa é possível identificar as localidades com maior potencial de alagamentos e a elevação básica necessária para mitigar possíveis acidentes decorrentes desse perigo. O mapa de alagamento da região da planta da Arkema em Crosby é apresentado na figura 27. Nela, a porção amarela na parte superior direita indica a região mais elevada do terreno, em uma área de inundações de 500 anos. Já o restante do terreno situa-se em uma área de inundações de 100 anos.

Figura 27: Mapa de alagamento do terreno da Arkema em Crosby.



Fonte: extraído de CSB, 2018.

Mesmo com a disponibilização de tal relatório em 2016 e mapa de incidência de inundação pela FEMA, durante a investigação conduzida pelo CSB em 2018 notou-se que tanto os órgãos reguladores quanto os funcionários da Arkema não tinham conhecimento adequado de que a planta estava situada em um terreno vulnerável a esse tipo de intempérie. Soma-se a isto, o fato de o risco de inundações não ter sido abordado durante a avaliação do risco de perda de refrigeração nos ABT.

Outro fato que corrobora a baixa preparação para eventos climáticos, tais como inundações, é a ferramenta adotada pela seguradora FM Global para mensurar e ranquear o quão preparadas todas as companhias seguradas por ela estão perante os riscos envolvidos em suas respectivas atividades. Nessa ferramenta nomeada RiskMark, a seguradora adota uma escala de 100 pontos na qual as maiores pontuações representam riscos bem gerenciados e de maior qualidade, com menor probabilidade de perdas. Já aquelas posicionadas na parte inferior do ranqueamento possuem uma gestão menos eficientes dos riscos, uma probabilidade 7 vezes maior de sofrerem incidentes e apresentam perdas 30 vezes mais severas do que as empresas com pontuação elevada no RiskMark. Em 2016, a seguradora ranqueou a Planta da Arkema de Crosby como uma das 25% piores notas dentre todos os seus clientes que manipulam produtos químicos perigosos, principalmente por deficiências na gestão dos riscos envolvendo eventos climáticos, como inundações (CSB, 2018).

Segundo a investigação do CSB, durante a elaboração do Plano de Resposta a Emergência da Planta de Crosby da Arkema e avaliação dos riscos utilizou-se como fonte principal de informação a experiência de seus funcionários mais antigos. A grande maioria deles considerava as chuvas decorrentes da Tempestade Alisson, em 2001, como a maior quantidade despejada de água na região do Texas antes do evento acidente envolvendo o Furacão Harvey, que manteve o terreno submerso por 1,20 m. No entanto, dados pluviométricos sugerem que o Furacão Rosa em 1994 e uma tempestade em 2015 proporcionaram uma inundação maior do terreno do que o recordado pelos funcionários da Planta.

Ao avaliar o risco de eventos de magnitudes de 100 ou 500 anos, é inadequado depender exclusivamente da experiência individual dos funcionários para determinar o nível de risco. As companhias que manipulam produtos perigosos devem pautar suas análises a partir de diversas fontes, tais como registros de incidentes na planta, históricos da região, estudos de caso de incidentes em outras unidades fabris e projeções para os anos subsequentes.

Ainda que o Furacão Harvey seja considerado um evento de 1.000 anos e tenha despejado uma quantidade sem precedentes de água no terreno, diante do desconhecimento da Arkema e de grande parte de seus *stakeholders* acerca da suscetibilidade da região de Crosby

às inundações, não foi possível incorporar em sua análise de risco e Plano de Resposta a Emergência o risco de inundação, a principal causa do evento de perda de contenção primária dos peróxidos orgânicos durante a passagem do furacão Harvey. O pleno conhecimento do histórico e risco de alagamento na planta da Arkema e a elaboração de um PRE e análise de risco condizentes com a sua gravidade poderia ter proporcionado um melhor conjunto de ações que pudessem evitar que os peróxidos orgânicos entrassem em decomposição e consequente combustão.

4.2 EVITAR QUE UM MODO DE FALHA COMUM ACOMETA OS SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

A análise dos modos de falha é caracterizada como um método que busca avaliar as potenciais causas de falha de determinado processo ou produto na indústria. Seus primeiros registros de utilização são datados de 1963 pela NASA (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço), foram aprimorados pela montadora Ford em 1977 e são utilizados até hoje no mercado (GILCHRIST, 1992). A avaliação prévia dos modos de falhas de todos os componentes de um processo é especialmente importante durante a etapa de desenvolvimento e implementação de barreiras.

Ao analisar a sequência dos eventos que ocorreram durante a passagem do Furacão Harvey no Texas, é possível depreender que o acidente não foi ocasionado por danos estruturais nos sistemas de processamento e armazenamento de peróxidos orgânicos oriundos da água de inundação. Os incêndios e explosões resultaram de falhas no sistema de utilidades (fonte principal e alternativa de suprimento de energia elétrica para a refrigeração nos ABT) e nas barreiras de segurança, tanto técnicas (geradores de energia e sistema de refrigeração por meio de nitrogênio líquido) quanto de procedimentos (procedimentos para transferir os produtos químicos para os semirreboques refrigerados e sua movimentação das áreas inundadas) (COZZANI, 2021).

Avaliando as barreiras implementadas, percebe-se que cada uma delas foi acometida pelo mesmo modo de falha, a inundação. A mesma água de inundação que inviabilizou a utilização da energia elétrica do sistema principal nos ABT também acometeu os geradores emergenciais de energia elétrica movidos à diesel, submergiu o encanamento do tanque de nitrogênio líquido (alternativa de refrigeração nos armazéns), atingiu os semirreboques refrigerados e impediu que eles fossem deslocados para a região mais elevada do terreno.

Dessa forma, fica evidente que o mesmo iniciador – água de inundação - conseguiu acometer todas as barreiras de proteção existentes, indicando que as medidas de segurança propostas compartilhavam da mesma vulnerabilidade. Para garantir eficácia, é essencial que as camadas de proteção sejam totalmente independentes entre si (Souza, 2020).

Logo, a falta de atenção a esse princípio fundamental de segurança de processos pela equipe da Arkema de Crosby na avaliação da perda de refrigeração conferiu uma redução de risco indevida na matriz. As companhias devem garantir que não existam modos de falha comuns em suas barreiras de proteção de modo que as salvaguardas implementadas possam desempenhar o seu papel efetivo no combate e prevenção do risco.

4.3 INCORPORAÇÃO DA AVALIAÇÃO DE RISCOS NATECH DURANTE A CONFECÇÃO DO PLANO DE RESPOSTA À EMERGÊNCIA

Os eventos *Natechs* são caracterizados por sua baixa probabilidade de ocorrência com elevadíssimo potencial de severidade, como a liberação de materiais tóxicos, incêndios e explosões. Levando em consideração o papel das mudanças climáticas em causar desastres naturais mais frequentes e mais intensos, atenção especial deve ser dada na indústria para a avaliação e gestão de riscos *Natech*, investindo-se em diversas metodologias e ferramentas de avaliação para reduzir os riscos associados a esses eventos (QIN et al., 2019).

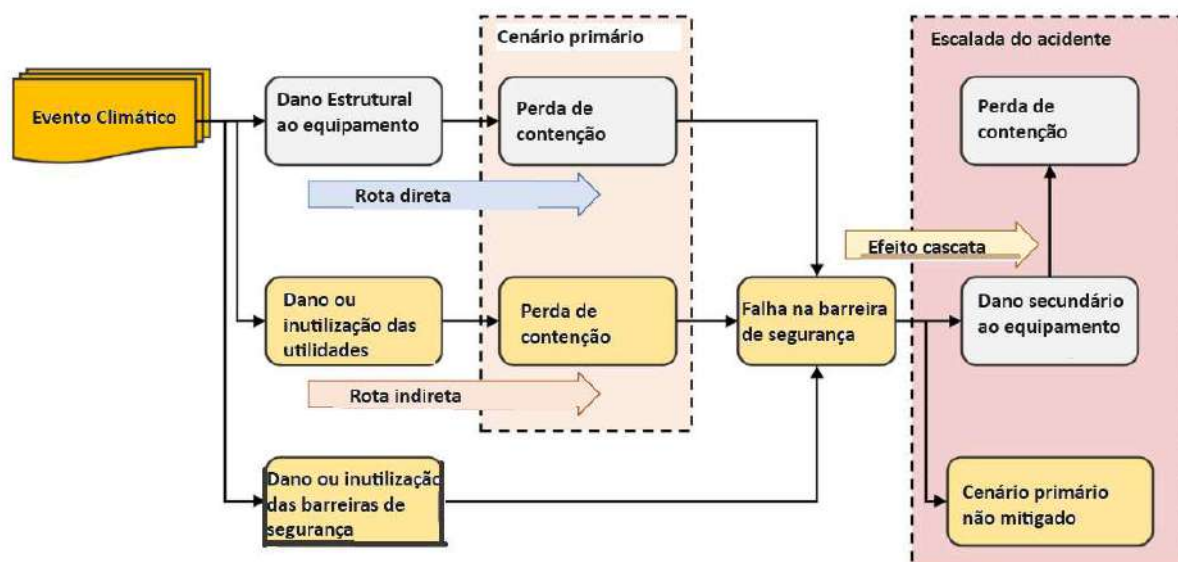
Cozzani et al. (2019), a partir de seus estudos, identificaram os componentes e equipamentos mais vulneráveis durante a ação de eventos climáticos drásticos como furacões e chuvas acentuadas. Segundo eles, as salvaguardas cujo mecanismo depende de fontes de energia elétrica foram caracterizados como os mais críticos. Eles argumentam que geralmente as barreiras localizadas próximo ao nível do solo foram identificados como os itens mais frequentemente impactados durante tais eventos. Transformadores e geradores de energia de reserva de emergência são costumeiramente acometidos durante furacões e inundações devido a sua instalação próximo ao nível do solo e, conseqüentemente, correm o risco de estarem submersos. Essa escalada de acidentes por meio do efeito cascata foi justamente o que acometeu as barreiras de segurança na fábrica da Arkema.

Analisando detalhadamente as particularidades dos eventos *Natechs* é possível observar que a sequência de falhas que impactou o sistema de utilidades e as barreiras de segurança na Planta da Arkema dificilmente poderia ter ocorrido simultaneamente por causas distintas de uma inundação. Assim, é essencial reconhecer durante a elaboração do Plano de Resposta a Emergência e avaliação de riscos quais as ameaças naturais afetam um local industrial e têm a

capacidade de criar condições específicas que alteram o desempenho das utilidades e salvaguardas, em comparação com o que seria esperado na ausência desses eventos externos. Ignorar essa característica nos cenários *Natech* pode resultar, como observado no acidente no Texas, na implementação de barreiras de segurança cuja eficácia pode ser comprometida por eventos naturais, levando à intensificação das consequências do acidente (COZZANI et al., 2021).

Existem diversos estudos na literatura que abordam uma nova metodologia para incorporar os eventos *Natechs* durante a elaboração do PRE e avaliação de riscos, dentre eles o mapa proposto na figura 28, de Cozzani et al. (2021).

Figura 28: Metodologia para avaliação dos cenários envolvendo eventos Natechs.



Fonte: adaptado de COZZANI et al., 2021.

A aplicação da metodologia exposta na figura 28 para cada evento climático é crucial para desempenhar uma análise correta acerca dos perigos em determinado processo, culminando possivelmente em eventos *Natech*. Nele, há a presença de 2 rotas principais que provocam o evento *Natech*, as rotas direta e indireta. Enquanto a primeira envolve o dano estrutural direto ao equipamento, a indireta envolve a falha do sistema de utilidades e inutilização das barreiras de proteção, culminando na sua falha. Nessa metodologia inovadora, um elemento crucial é a explícita indicação do papel das barreiras de segurança e as consequências de sua falha, como a perda de contenção decorrente ou não do cenário primário não mitigado (COZZANI et al., 2021).

Aplicando tal modelo na avaliação de um evento *Natech* oriundo da inundação de suas instalações, é possível verificar que o acidente ocorreu através da rota indireta. Com uma grande quantidade de água despejada sob a Planta de Crosby, poderíamos ter a interrupção do fornecimento de energia elétrica. Como barreiras ao evento de decomposição dos peróxidos orgânicos, a fábrica possuía os geradores de energia elétrica movidos à diesel, o sistema de nitrogênio líquido e a possibilidade de mover os produtos para os semirreboques refrigerados e, conforme já abordado, o modo de falha decorrente da água de inundação poderia acometer todas elas. Prosseguindo com a metodologia, concluímos que durante tal evento climático a planta está sujeita a falha nas barreiras através da rota indireta. Considerando a intensificação das falhas, as possíveis consequências de tal evento *Natech* incluem a decomposição e perda de contenção dos peróxidos orgânicos, a combustão e explosão desses produtos químicos, bem como a explosão do tanque de isobutileno, caso os peróxidos estejam suficientemente próximos do tanque, por meio de um efeito cascata. No evento transcorrido durante a passagem do Furacão Harvey, a consequência final do *Natech* foi a decomposição e combustão dos peróxidos orgânicos pela perda de refrigeração. Caso a direção da Arkema tivesse desenvolvido uma análise de risco *Natech* utilizando uma metodologia semelhante, a avaliação da exposição ao risco de inundação poderia ter sido avaliada de forma extensiva.

No que diz respeito ao estudado incremento de intensidade dos eventos climáticos que podem culminar em *Natechs*, atenção especial deve ser dada ao gerenciamento de emergências. Na Planta da Arkema, caso houvesse um estudo histórico acerca dos eventos de inundação para estabelecimento da altura mínima necessária na qual as barreiras próximas ao solo deveriam estar posicionadas, é possível que ainda assim elas fossem ultrapassadas. A avaliação da elevação do terreno em Crosby realizado durante investigação do CSB (2018), posterior ao acidente, identificou que, por exemplo, a base de elevação do tanque de nitrogênio líquido estava posicionada próxima ao recomendado no mapa da figura 27. No entanto, a FEMA informa que durante inundações provocadas por furacões, a elevação básica do terreno é muitas vezes ultrapassada em diversos centímetros, como nos casos recentes dos Furacões Rosa e Harvey. Dessa forma, é considerado boa prática que as companhias considerem além do histórico da região, o incremento da intensidade dos eventos climáticos decorrentes no âmbito das mudanças climáticas durante o desenvolvimento do PRE, avaliação de riscos e, segundo o ALARP, sejam o mais conservadoras possível aplicando fatores de segurança. No caso dos acontecimentos no Texas em 2017, uma maior elevação do tanque de nitrogênio líquido ou da base dos geradores de emergência frente ao preconizado no mapa de alagamento poderia ter garantido a refrigeração aos peróxidos orgânicos, mitigando o *Natech*.

O acidente da Arkema demonstra como as condições específicas criadas pelo evento climático podem ser responsáveis por modos de falha comum ou únicos, os quais não seriam considerados em condições normais. Dessa forma, os planos de contingência em instalações industriais devem considerar eficientemente as características de perigo de cada evento climático, para que futuros eventos *Natech* possam ser gerenciados de forma mais eficaz (QIN et al., 2019).

5 CONCLUSÃO

Acidentes provocados por eventos climáticos extremos estão ocorrendo de forma cada vez mais frequente e severa, conforme exemplificado neste trabalho com a análise da sequência de eventos que ocorreram no ano de 2017 no Texas, que culminaram na decomposição dos peróxidos orgânicos manipulados na planta da Arkema em Crosby. Os chamados *Natechs* possuem baixa probabilidade de ocorrência, porém gravíssima criticidade de consequência.

O pleno conhecimento dos perigos aos quais a operação e a região estão sujeitas é de extrema importância para a avaliação dos riscos e elaboração de um Plano de Gerenciamento de Emergência condizente com os perigos aos quais estão expostas.

A partir do sequenciamento dos fatos transcorridos nos meses de agosto e setembro de 2017 no Texas, da análise pautada nos preceitos de segurança de processos e do estudo das tendências de mudanças climáticas, foi possível identificar uma série de falhas na avaliação do risco de perda de refrigeração dos peróxidos orgânicos e elaboração do PRE. Tais falhas foram o desconhecimento da suscetibilidade a inundações do terreno da Arkema em Crosby e a consequente não incorporação desse aspecto na avaliação de risco, a avaliação incorreta da eficácia de implementação de camadas de proteção que apresentavam um mesmo modo de falha entre elas e, por fim, a falta de avaliação e incorporação do risco de eventos *Natech* na planta.

Diante de tais falhas, medidas como a adoção de uma metodologia própria que aborde todas as peculiaridades dos eventos *Natech*, como a possibilidade de escalada dos acidentes por meio do efeito cascata, se torna extremamente necessária para uma melhor avaliação dos riscos, analisando com extremo detalhe se as barreiras implementadas de fato operam de forma independente e possuem suficiente eficácia. Além disso, a partir da análise dos dados históricos e das projeções de incremento dos eventos extremos climáticos, a implementação de medidas simples, como a elevação estrutural dos sistemas alternativos de refrigeração como o nitrogênio líquido e geradores de energia elétrica, também se demonstrariam eficientes na manutenção da temperatura nos ABT que armazenam os peróxidos orgânicos, evitando que os produtos atingissem as suas respectivas SADT e entrassem em decomposição.

6 REFERÊNCIAS

COLBERT, A. **Extreme Weather and Climate Change**. Disponível em: <<https://climate.nasa.gov/extreme-weather/>>. Acesso em: 02 dez. 2023.

The Report of the BP U.S. Refineries Independent Safety Review Panel, January 2007. Disponível em: <http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/SP/STAGING/local_assets/assets/pdfs/Baker_panel_report.pdf/>. Acesso em: 27 jul. 2022.

REUTERS. Natural disasters caused \$313 bln economic loss in 2022 - Aon. Disponível em: <<https://www.reuters.com/business/environment/natural-disasters-caused-313-bln-economic-loss-2022-aon-2023-01-25/>>. Acesso em: 03 dez. 2023.

Hydrogen peroxide | H2O2 | Arkema | Arkema Global. Disponível em: <<https://www.arkema.com/global/en/products/product-families/hydrogen-peroxide/>>. Acesso em: 12 ago. 2022.

Products and raw materials on-site in Crosby, Texas | Arkema USA. Disponível em: <<https://www.arkema.com/usa/en/social-responsibility/incident-page-2/products-and-raw-materials/>>. Acesso em: 12 ago. 2022.

SOUZA, L. **Abordagem Baseada em Risco Aplicada a Estudos de Casos na Indústria Química**. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/12514/1/LFISouza.pdf>>. Acesso em: 27 set. 2023.

FISHER, H. G.; GOETZ, D. D. Determination of self-accelerating decomposition temperatures using the Accelerating Rate Calorimeter. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 4, n. 5, p. 305–316, out. 1991. Disponível em: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/095042309180044U?token=1938C73B404ACA980A09CF019168159A6D8F9578E7DF4C8B634F12F91B3DE136063B5060D17CFE122F9CCC E76AB4A9DD&originRegion=us-east-1&originCreation=20220213134011>>. Acesso em: 27 mar. 2023.

Arkema Global. Disponível em: <<https://www.arkema.com/global/en/investor-relations/>>. Acesso em: 12 ago. 2022.

PILONE, E. et al. Climate change and NaTech events: A step towards local-scale awareness and preparedness. **Safety Science**, v. 139, p. 105264, jul. 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753521001090>>. Acesso em: 12 out. 2022.

TRENBERTH, K. E. et al. Hurricane Harvey Links to Ocean Heat Content and Climate Change Adaptation. **Earth's Future**, v. 6, n. 5, p. 730–744. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2018EF000825>>. Acesso em: 23 dez. 2022.

KRAUSMANN, E. et al. Industrial accidents triggered by natural hazards: an emerging risk issue. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 11, n. 3, p. 921–929, 24 mar. 2013. Disponível em: <<https://nhess.copernicus.org/articles/11/921/2011/nhess-11-921-2011.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2022.

HALLEGATTE, S. **The Indirect Cost of Natural Disasters and an Economic Definition of Macroeconomic Resilience**. Disponível em: <<https://documents1.worldbank.org/curated/en/186631467998501319/pdf/WPS7357.pdf>>. Acesso em: 01 out. 2022.

STEINBERG, L. J.; SENGUL, H.; CRUZ, A. M. Natech risk and management: an assessment of the state of the art. **Natural Hazards**, v. 46, n. 2, p. 143–152, 27 mar. 2008. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11069-007-9205-3.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2022.

KRAUSMANN, E. **Analysis of Natech risk reduction in EU Member States using a questionnaire survey**, 2010. Disponível em: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC61931/jrc_eu_natech.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2022.

COZZANI, V. et al. Industrial accidents triggered by flood events: Analysis of past accidents. **Journal of Hazardous Materials**, v. 175, n. 1-3, p. 501–509, mar. 2010.

KRAUSMANN, E.; GIRGIN, S.; NECCI, A. Natural hazard impacts on industry and critical infrastructure: Natech risk drivers and risk management performance indicators. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 40, p. 101163, nov. 2019. Disponível em: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2212420919302523>>. Acesso em: 07 nov. 2022.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Floods**. Disponível em: <https://www.who.int/health-topics/floods#tab=tab_1>. Acesso em: 19 ago. 2022.

HEGERL, G. et al. Use of models in detection and attribution of climate change. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 2, n. 4, p. 570–591, 26 maio 2011. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03375749/document>>. Acesso em: 01 out. 2022.

EPA. **Climate Change Indicators: U.S. and Global Precipitation**, 2022. Disponível em: <<https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-us-and-global-precipitation#:~:text=Since%201901%2C%20global%20precipitation%20has>>. Acesso em: 01 out. 2022.

COZZANI, V. et al. A paradigm shift in the assessment of Natech scenarios in chemical and process facilities. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 152, p. 338–351, ago. 2021.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Weather-related Disasters Increase over past 50 years, Causing More Damage but Fewer Deaths**. Disponível em: <<https://public.wmo.int/en/media/press-release/weather-related-disasters-increase-over-past-50-years-causing-more-damage-fewer>>. Acesso em: 01 out. 2022.

NASCIMENTO, K. **Gerenciamento de riscos em desastres naturais: diagnóstico do contexto atual baseado numa revisão sistemática da literatura sobre eventos**, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/17426/1/Disserta%c3%a7%c3%a3o.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2022.

XAVIER, J. **Riscos De Eventos Na-tech Sob Mudanças Climáticas Na Região Costeira Do Estado De São Paulo**, 2017. Disponível em: < <https://cetesb.sp.gov.br/escolasuperior/wp-content/uploads/sites/30/2018/02/Jose-Carlos-de-Moura-Xavier.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2022.

WASKO, C. et al. Evidence of shorter more extreme rainfalls and increased flood variability under climate change. **Journal of Hydrology**, v. 603, p. 126994, dez. 2021. Disponível em: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0022169421010441>>. Acesso em: 10 out. 2022.

AVEN, T. On how to define, understand and describe risk. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 95, n. 6, p. 623–631, jun. 2010.

DAI, F. et al. Landslide risk assessment and management: an overview. **Engineering Geology**, v. 64, n. 1, p. 65–87, abr. 2000. Disponível em: <http://geo.uzh.ch/~chuggel/riskcourse/dai_landslide_risk_ass_enggeol02.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

Extreme Weather, Extreme Consequences: CSB Investigation of the Arkema Crosby Facility and Hurricane Harvey, 2018. Disponível em: <https://www.csb.gov/assets/1/20/csb_arkema_exec_summary_08.pdf?16265>. Acesso em: 22 jul. 2022.

COZZANI, V. et al. Lessons learnt from the impact of hurricane Harvey on the chemical and process industry. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 190, p. 106521, out. 2019.

CETESB. Risco de Acidente de Origem Tecnológica - Método para decisão e termos de referência, 2011. Disponível em: <<https://www.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2013/11/P4261-revisada.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2022.

WANG, R. et al. Risk Analysis of Out-drum Mixing Cement Solidification by HAZOP and Risk Matrix. **Annals of Nuclear Energy**, v. 147, p. 107679, nov. 2020. Disponível em: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0306454920303777>>. Acesso em: 23 dez. 2022.

KRAUSMANN, E. et al. Dealing with cascading multi-hazard risks in national risk assessment: The case of Natech accidents. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 35, p. 101072, abr. 2019.

ANAC. **Segurança operacional**, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/ptbr/assuntos/segurancaoperacional/sgso/arquivos/gerenciandoriscos_sgsonaprtica.pdf>. Acesso em: 29 out. 2022.

AVEN, T. et al. ALARP—What does it really mean? **Reliability Engineering & System Safety**, v. 96, n. 8, p. 877–882, ago. 2009. Disponível em: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0951832011000238>>. Acesso em: 29 out. 2022.

DUIJM, J. Recommendations on the use and design of risk matrices. **Safety Science**, v. 76, n. 76, p. 21–31, jul. 2015. Disponível em: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0925753515000429>>. Acesso em: 29 out. 2022.

KANNAN, S. et al. SCIENCE & TECHNOLOGY As Low As Reasonably Practicable (ALARP) Demonstration: A Case Study on Firewater Curtain Application for Liquefied Petroleum Gas(LPG) Sphere. **Pertanika J. Sci. & Technol**, v. 28, n. S1, p. 99–120, 2020. Disponível em: <<http://www.pertanika.upm.edu.my/resources/files/Pertanika%20PAPERS/JST%20Vol.%2028%20%28S1%29%202020/07%20JST%28S%29-0546-2020.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2022.

CDC - Hierarchy of Controls - NIOSH Workplace Safety and Health Topic. Disponível em: <<https://www.cdc.gov/niosh/topics/hierarchy/default.html>>. Acesso em: 15 out. 2022.

IPCC. Climate Change 2021 Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SummaryVolume.pdf>. Acesso em: 01 out. 2022.

FISHER, H. et al. Determination of self-accelerating decomposition temperatures using the Accelerating Rate Calorimeter. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 4, n. 5, p. 305–316, out. 1991. Disponível em: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/095042309180044U>>. Acesso em: 02 fev. 2022.

BLOOMER, L. et al. **Arkema Chemical Plant & the 2017 Risk Management Program Amendments Background on the Risk Management Program**, 2017. Disponível em: <http://eelp.law.harvard.edu/wp-content/uploads/HARVARD-Arkema_RMP_WriteUp_FINAL_logo.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2023.

LANGER, L. et al. **Chapter 3 - The Evolution of the Smart Grid Threat Landscape and Cross-Domain Risk Assessment**, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128021224000031>>. Acesso em: 29 out. 2022.

QIN, R. et al. An overview of the impact of Hurricane Harvey on chemical and process facilities in Texas. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 45, p. 101453, maio 2019.

LOURENÇO, L. **Análise de Riscos em uma Planta de Ácido Sulfúrico**. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/13218/1/LCCLouren%C3%A7o.pdf>>. Acesso em: 27 set. 2022.

GILCHRIST, W. Modelling Failure Modes and Effects Analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 10, n. 5, maio 1992.

HAO, M. et al. Hazard identification, risk assessment and management of industrial system: Process safety in mining industry. **Safety Science**, v. 154, p. 105863, out. 2022.

IPCC. Climate Change 2014 Synthesis Report IPCC, 2015. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf>.

COZZANI, V. et al. A comprehensive analysis of the occurrence of Natech events in the process industry. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 147, p. 703–713, 2020.