

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

SAMUEL VENÂNCIO DA SILVA

**MODELAGEM DAS CONSEQUÊNCIAS DE ACIDENTES COM PRODUTOS
PERIGOSOS UTILIZANDO O SOFTWARE ALOHA**

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

SAMUEL VENÂNCIO DA SILVA

**MODELAGEM DAS CONSEQUÊNCIAS DE ACIDENTES COM PRODUTOS
PERIGOSOS UTILIZANDO O SOFTWARE ALOHA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como parte dos requisitos
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química, pela Universidade
Federal de Alfenas.

Orientador: Leandro Lodi
Coorientador: Claudio Antônio de Andrade
Lima

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

da Silva, Samuel Venâncio.

MODELAGEM DAS CONSEQUÊNCIAS DE ACIDENTES COM PRODUTOS
PERIGOSOS UTILIZANDO O SOFTWARE ALOHA / Samuel Venâncio da Silva. -
Poços de Caldas, MG, 2025.

55 f. : il. -

Orientador(a): Leandro Lodi.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) -
Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2025.

Bibliografia.

1. Software ALOHA. 2. Análise de Risco. 3. Acidente Químico. I. Lodi,
Leandro, orient. II. Título.

SAMUEL VENÂNCIO DA SILVA

**MODELAGEM DAS CONSEQUÊNCIAS DE ACIDENTES COM PRODUTOS
PERIGOSOS UTILIZANDO O SOFTWARE ALOHA**

O Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química pela Universidade Federal de Alfenas.

Área de concentração: Segurança de Processos Químicos.

Aprovado em: 28 de Novembro de 2025

Prof. Dr. Leandro Lodi
Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL MG

Assinatura:  Documento assinado digitalmente
LEANDRO LODI
Data: 28/11/2025 11:23:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Viktor Oswaldo Cárdenas Concha
Universidade Federal de São Paulo - Unifesp

Assinatura:  Documento assinado digitalmente
VIKTOR OSWALDO CARDENAS CONCHA
Data: 01/12/2025 09:09:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Michiel Wichers
Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL MG

Assinatura:  Documento assinado digitalmente
MICHIEL WICHERS
Data: 02/12/2025 13:14:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

RESUMO

A indústria química, essencial para o desenvolvimento econômico e social, apresenta riscos significativos devido à manipulação de substâncias perigosas em seus processos. Acidentes históricos como: Bhopal na Índia e Cubatão no Brasil mostraram que a gestão de riscos é um processo indispensável para a segurança ocupacional e ambiental. Este trabalho teve como objetivo analisar os riscos associados a processos químicos com o uso do software ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres), ferramenta reconhecida para simulação de cenários de emergência envolvendo substâncias perigosas. O estudo compreende a contextualização teórica da análise de riscos, a revisão de acidentes industriais com seus impactos regulatórios e a aplicação prática do ALOHA em um cenário simulado. Foram consideradas variáveis operacionais e meteorológicas para avaliar a dispersão de uma substância química, determinando zonas de impacto e propondo medidas de mitigação. Nesse contexto, realizou-se a simulação de um acidente do tipo BLEVE com propano, que evidenciou zonas de ameaça térmica significativas, alcançando até 1,4 km de raio, demonstrando o potencial de comprometimento de áreas urbanas inteiras e reforçando a importância da aplicação de medidas preventivas e de planos de resposta emergencial. Os resultados evidenciam a eficácia do ALOHA como ferramenta complementar às Normas Regulamentadoras brasileiras, como a NR-20, auxiliando na tomada de decisões preventivas. A integração entre ferramentas de simulação e diretrizes normativas apresenta-se após esta pesquisa como uma prática para o fortalecimento da cultura de segurança nas indústrias.

Palavras-chave: Análise de riscos; Indústria química; ALOHA; Segurança de processos; Gestão de emergências.

ABSTRACT

The chemical industry, essential for economic and social development, presents significant risks due to the handling of hazardous substances in its processes. Historical accidents such as Bhopal in India and Cubatão in Brazil have shown that risk management is indispensable for occupational and environmental safety. This study aimed to analyze the risks associated with chemical processes using the ALOHA software (Areal Locations of Hazardous Atmospheres), a recognized tool for simulating emergency scenarios involving hazardous substances. The work comprises the theoretical contextualization of risk analysis, the review of industrial accidents and their regulatory impacts, and the practical application of ALOHA in a simulated scenario. Operational and meteorological variables were considered to evaluate the dispersion of a chemical substance, defining impact zones and proposing mitigation measures. In this context, a simulation of a BLEVE accident with propane was carried out, which revealed significant thermal threat zones reaching up to 1.4 km, thus demonstrating the potential compromise of entire urban areas and reinforcing the importance of preventive measures and emergency response plans. The results highlight the effectiveness of ALOHA as a complementary tool to Brazilian Regulatory Standards, such as NR-20, supporting preventive decision-making. The integration of simulation tools and regulatory guidelines emerges from this research as an essential practice for strengthening the safety culture in industries.

Keywords: Risk analysis; Chemical industry; ALOHA; Process safety; Emergency management.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	10
	2.1 Objetivos gerais.....	10
	2.2 Objetivos específicos.....	10
3	JUSTIFICATIVAS.....	11
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
	4.1 Análise de Riscos no âmbito Global	12
4.1.1	Desastre de Bhopal (Índia, 1984).....	13
	4.2 Riscos e Acidentes Químicos no Brasil	19
4.2.1	Desastre de Vila Socó (Cubatão, Brasil, 1984): Causas e Desenvolvimento	20
	4.3 Conceitos de perigo e risco	30
	4.4 Ferramenta de Simulação: Software ALOHA®	32
4.4.1	Finalidade e Aplicabilidade.....	32
4.4.2	Limitações do software ALOHA.....	33
4.4.3	Benefícios do uso do ALOHA e sua integração com as normas brasileiras....	34
4.4.4	Integração com outros programas.....	35
5	NORMAS REGULAMENTADORAS (NR) E ANÁLISE DE RISCOS QUÍMICOS	36
	5.1 Gestão de Riscos Químicos segundo o PGR da NR 1.....	37
	5.2 A Norma Regulamentadora nº 20 (NR 20) e o Controle de Inflamáveis.....	38
6	METODOLOGIA.....	40
	6.1 Justificativa da escolha do software	40
	6.2 Simulação.....	41
6.2.1	Influência das características geográficas de Poços de Caldas.....	42
6.2.2	Justificativa das escolhas do cenário simulado.....	43

6.2.3 BLEVE.....	43
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
7.1 Resultados da simulação do acidente com o software ALOHA.....	44
7.2 Impactos Gerais do Acidente Simulado.....	48
7.3 Medidas de mitigação recomendadas.....	50
8 CONCLUSÃO.....	51
REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

A indústria química é essencial para o desenvolvimento econômico e social, fornecendo insumos fundamentais para setores como agricultura, saúde, energia e manufatura. No entanto, os processos químicos envolvidos na produção, armazenamento e transporte de substâncias apresentam riscos significativos para a segurança humana, o meio ambiente e a infraestrutura.

Como afirmam Crowl e Louvar (2011), "os riscos inerentes à indústria química são vastos, envolvendo desde falhas operacionais até erros humanos, que podem resultar em acidentes com consequências devastadoras", o que sublinha a necessidade de uma gestão eficaz de riscos.

Acidentes industriais, como o desastre de Bhopal (1984) na Índia — considerado o maior acidente químico do mundo — e o acidente de Cubatão (1984) no Brasil — que causou explosões e emissões tóxicas — reforçam a urgência de melhorar as práticas de segurança e gestão de riscos (ESKELINEN, 2011; BROUGHTON, 2005; CETESB, 1984; CETESB, s.d.; AGÊNCIA BRASIL, 2024). Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA, 2023), "a gestão de riscos em processos industriais é fundamental não apenas para a prevenção de acidentes, mas também para a minimização dos danos causados por incidentes já ocorridos". Esses casos demonstram que a simples existência de regulamentações não garante a segurança industrial; é necessário que ferramentas técnicas eficazes sejam aplicadas continuamente.

Nesse contexto, a análise de riscos em processos químicos é essencial para identificar, avaliar e mitigar os perigos associados a essas atividades. Além de prevenir acidentes, essa análise também favorece a conformidade com regulamentações legais e minimiza impactos ambientais. Ferramentas como o ALOHA (*Areal Locations of Hazardous Atmospheres*) são amplamente utilizadas para modelar e prever cenários de riscos e elaborar planos de contingência mais eficazes (EPA, 2023).

Diante disso, este trabalho tem como objetivo geral explorar a análise de riscos em processos químicos, com foco na aplicação prática do ALOHA.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Analisar os riscos associados a processos químicos, com foco na aplicação do software ALOHA em um cenário simulado, propondo medidas de mitigação e promovendo práticas mais seguras e sustentáveis na indústria química..

2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, foram estabelecidas as seguintes ações intermediárias como objetivos específicos:

- Apresentar os conceitos fundamentais da análise de riscos em processos químicos, destacando sua relevância no contexto industrial;
- Analisar casos históricos de desastres industriais, como Bhopal e Cubatão, destacando seus impactos sobre a legislação e a cultura de segurança;
- Contextualizar o uso do ALOHA dentro das diretrizes gerais das Normas Regulamentadoras NR-1 e NR-20, ressaltando sua utilidade como ferramenta complementar na gestão de riscos;
- Aplicar o software ALOHA em um cenário simulado de liberação de substância perigosa, considerando variáveis operacionais e meteorológicas;
- Interpretar e discutir os resultados obtidos na simulação prática, avaliando sua utilidade na definição de zonas de impacto e na proposição de medidas de mitigação.

3 JUSTIFICATIVAS

A indústria química é fundamental para o desenvolvimento de diversos setores, mas envolve riscos significativos que podem resultar em acidentes com sérias consequências para a saúde humana, o meio ambiente e a economia. De acordo com a Organização Internacional do Trabalho (OIT), estima-se que mais de 2,78 milhões de pessoas morram anualmente por causas relacionadas ao trabalho, incluindo doenças ocupacionais e acidentes, dos quais uma parcela significativa está associada a atividades industriais de risco, como a indústria química (OIT, 2019). Episódios trágicos como o desastre de Bhopal, em 1984, e o acidente em Cubatão, também em 1984, reforçam a necessidade de sistemas robustos de prevenção e evidenciam a urgência de ferramentas eficazes de previsão e gestão de riscos (Toxic Release Inventory, 2020; INMETRO, 2004).

Nesse contexto, a aplicação de ferramentas de modelagem de consequências torna-se essencial para aprimorar o gerenciamento de riscos em processos químicos. O ALOHA é amplamente utilizado na simulação de cenários acidentais, permitindo estimar dispersão de produtos químicos, zonas de impacto térmico, formação de nuvens inflamáveis e áreas potencialmente afetadas (EPA, 2019). Apesar de limitações como a ausência de modelagem de frequência, suposição de terreno plano e não consideração de fragmentos em eventos do tipo BLEVE, o software fornece estimativas adequadas para análises preliminares e apoia a avaliação de severidade de cenários envolvendo o armazenamento de GLP e falhas catastróficas em vasos de pressão.

A relevância deste estudo também se fundamenta no contexto regulatório brasileiro. As Normas Regulamentadoras, especialmente a NR-20, que aborda a segurança em instalações com inflamáveis e combustíveis, a NR-09, que trata da avaliação e controle de agentes químicos, físicos e biológicos, e a NR-01, que estabelece diretrizes para o Gerenciamento de Riscos Ocupacionais (GRO) e o Programa de Gerenciamento de Riscos (PGR), exigem metodologias formais para identificação e controle de riscos. A utilização do ALOHA contribui diretamente para o atendimento a esses requisitos, ao oferecer suporte técnico para a definição de zonas de risco e o desenvolvimento de medidas preventivas compatíveis com as exigências normativas.

Dessa forma, o estudo apresenta relevância prática, acadêmica e regulatória ao integrar modelagem computacional, normas de segurança e a análise de um cenário realista envolvendo produtos perigosos. Ele também contribui para o aprimoramento da cultura de segurança industrial ao reforçar a importância de análises de risco atualizadas, adoção de medidas preventivas eficazes e incorporação de tecnologias de modelagem no gerenciamento de processos perigosos.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Análise de Riscos no âmbito Global

A análise de riscos em processos químicos no âmbito global é um componente essencial para a criação de políticas de segurança industrial eficazes. O crescimento contínuo da indústria química, aliado à sua crescente complexidade, aumenta significativamente a probabilidade de acidentes, cujas consequências podem ser devastadoras tanto para as pessoas quanto para o meio ambiente. A indústria química, por sua natureza, lida com substâncias perigosas que apresentam riscos elevados de danos em caso de falhas nos processos de produção ou armazenamento.

De acordo com a Organização Internacional do Trabalho (OIT), estima-se que ocorram cerca de 2,78 milhões de mortes por ano relacionadas ao trabalho, incluindo acidentes e doenças ocupacionais (OIT, 2019). Embora esse número abranja todos os setores da economia, a indústria química está entre os mais afetados, devido à manipulação frequente de agentes tóxicos e inflamáveis. A OIT também alerta que os riscos tendem a ser mais acentuados em países em desenvolvimento, onde as normas de segurança são frequentemente menos rigorosas e os trabalhadores estão mais vulneráveis a condições perigosas (OIT, 2019).

Além disso, desastres industriais de grande escala, como o de Bhopal (Índia, 1984), em que ocorreram milhares de mortes, serviram como marcos na história da segurança química, impulsionando mudanças significativas nas políticas públicas e nas regulamentações internacionais. Conforme relatado pela OIT em seu relatório

global sobre segurança e saúde, a gestão de riscos industriais permanece como uma das prioridades mais críticas para a segurança dos trabalhadores e da população em geral (OIT, 2019).

A implementação de sistemas de gestão de segurança no ambiente de trabalho, como os previstos nas normas ISO 45001 (2018), tem potencial para reduzir significativamente a ocorrência de acidentes, conforme reconhecido por diversas agências internacionais. A OIT destaca que, embora os riscos não possam ser eliminados por completo, boas práticas de gestão e prevenção são eficazes na mitigação de incidentes graves.

Como resposta a esses desafios, organismos internacionais como a Organização das Nações Unidas (ONU) têm promovido o uso responsável de produtos químicos, conforme estabelecido nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 12 – Consumo e Produção Sustentáveis. Segundo o relatório Global Chemicals Outlook II do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP), a exposição inadequada a produtos químicos perigosos contribui para aproximadamente 1,6 milhão de mortes prematuras por ano (UNEP, 2019).

Essas iniciativas regulatórias demonstram como os desastres industriais têm servido como catalisadores para o aprimoramento das políticas globais de segurança química. No entanto, mesmo com os avanços normativos, a gestão de riscos permanece um desafio contínuo, exigindo vigilância constante, atualização tecnológica e fortalecimento da cultura de segurança nas organizações. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), por sua vez, reforça que a segurança química deve ser uma prioridade global e que a prevenção deve sempre preceder a reação (EPA, 2020).

4.1.1 Desastre de Bhopal (Índia, 1984)

O desastre de Bhopal, ocorrido em 3 de dezembro de 1984, é considerado um dos maiores acidentes industriais da história. O incidente ocorreu em uma planta de pesticidas da Union Carbide em Bhopal, na Índia, quando cerca de 40 toneladas de isocianato de metila (MIC), um composto altamente tóxico, foram liberadas na

atmosfera. A população local, sem sistemas de alerta eficazes, foi exposta a uma nuvem tóxica letal.

A causa do vazamento foi atribuída a uma combinação de falhas operacionais, cortes em sistemas de segurança, falta de manutenção e treinamento inadequado, conforme relatado por diversas investigações independentes e organizações humanitárias. Na época do acidente, sistemas essenciais de contenção, como o lavador de gases e a torre de queima, estavam desativados.

Estima-se que entre 2.000 e 3.000 pessoas tenham morrido nas primeiras horas, e que o total de mortes decorrentes da exposição ultrapasse 15.000. Mais de 500.000 pessoas foram afetadas por complicações de saúde, incluindo cegueira, doenças respiratórias, problemas neurológicos e malformações congênitas (Bhopal Medical Appeal, 2020; Amnesty International, 2019).

Especialistas em segurança industrial afirmam que o desastre poderia ter sido evitado com a adoção de práticas rigorosas de manutenção, treinamento adequado e sistemas de contenção ativos.

4.1.1.1 Impactos Humanos

O desastre de Bhopal provocou consequências devastadoras para a população local, afetando tanto a saúde física quanto a mental dos sobreviventes. Além das mortes imediatas, a exposição ao gás isocianato de metila (MIC) resultou em um aumento significativo de doenças respiratórias crônicas, como asma, bronquite e enfisema, especialmente entre os indivíduos mais severamente expostos (Cullinan et al., 1997).

Os impactos psicológicos também foram profundos: estudos apontam alta prevalência de transtornos mentais, incluindo estresse pós-traumático, depressão e ansiedade, que persistiram por décadas após o acidente (Murthy, 2014). A combinação de efeitos físicos e psicológicos contribuiu para a redução da qualidade de vida e para a sobrecarga dos serviços de saúde locais.

Além disso, a tragédia teve consequências sociais e econômicas duradouras, afetando famílias inteiras, a capacidade produtiva da comunidade e o desenvolvimento regional. O desastre evidencia a necessidade de políticas rigorosas

de prevenção industrial, sistemas de alerta eficazes e atenção contínua à saúde de populações expostas a riscos químicos.

4.1.1.2 Impactos Ambientais

O vazamento de isocianato de metila (MIC) e outros produtos químicos altamente tóxicos resultou na contaminação do solo e das fontes de água subterrâneas nas proximidades da planta da Union Carbide em Bhopal. Estudos conduzidos pelo Instituto Indiano de Pesquisa em Toxicologia (IITR) confirmaram a presença de metais pesados, como chumbo, cromo e níquel, em níveis superiores aos limites estabelecidos pelo Bureau of Indian Standards (BIS), comprometendo a qualidade da água subterrânea nas áreas adjacentes à antiga fábrica.

Em 2024, a Autoridade Central de Águas Subterrâneas (CGWA) apresentou um relatório ao Tribunal Verde Nacional (NGT) indicando que várias localidades próximas à antiga planta da Union Carbide ainda apresentam concentrações elevadas de metais pesados na água subterrânea, incluindo zinco e arsênio, excedendo os limites estabelecidos pelo BIS. Essa contaminação contínua torna a água imprópria para consumo e representa riscos significativos à saúde pública e ao meio ambiente.

Apesar de esforços para avaliar e remediar a área, como a oferta do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) em 2011 para realizar uma avaliação abrangente da contaminação, desafios persistem na implementação de ações eficazes de descontaminação. A área da planta da Union Carbide continua a ser um risco ambiental significativo, exigindo medidas de remediação abrangentes para proteger a saúde das comunidades locais e restaurar o meio ambiente afetado.

4.1.1.3 Impactos Econômicos

A economia local de Bhopal foi profundamente impactada pelo desastre químico ocorrido em dezembro de 1984, que resultou na liberação de gás isocianato de metila da planta da Union Carbide India Limited (UCIL). As consequências

econômicas incluíram o fechamento de negócios, perda de empregos e interrupção da vida social e produtiva da população local. Segundo a Reuters (2025), mesmo após quase quatro décadas, os efeitos econômicos do desastre ainda são sentidos, especialmente devido à persistência de resíduos tóxicos e à lentidão nas ações de descontaminação da área afetada.

Embora a Union Carbide tenha concordado, em 1989, em pagar uma compensação de 470 milhões de dólares ao governo indiano, especialistas e representantes das vítimas sempre consideraram o valor insuficiente frente à magnitude do desastre. Em 2010, o governo da Índia solicitou à Suprema Corte uma revisão do acordo, pedindo uma compensação adicional de aproximadamente 1,1 bilhão de dólares (The Times of India, 2023). No entanto, a Suprema Corte rejeitou o pedido em 2023, alegando não haver justificativa legal para reabrir o caso. Isso reforça as dificuldades jurídicas enfrentadas pelas vítimas e seus representantes na busca por justiça econômica.

Além disso, a presença contínua de resíduos químicos perigosos no local agravou os problemas socioeconômicos. Em janeiro de 2025, 337 toneladas métricas de resíduos tóxicos começaram a ser transferidas da planta para uma instalação de descarte em Pithampur, após anos de inércia institucional (Reuters, 2025). Apesar da iniciativa, ativistas ambientais e representantes de vítimas expressaram preocupação quanto à segurança do processo e à ausência de responsabilização por parte da Union Carbide e da Dow Chemical, atual controladora da empresa.

Portanto, a tragédia de Bhopal não apenas devastou vidas humanas, mas também impôs um legado de pobreza, insegurança e negligência institucional às comunidades afetadas, tornando-se um dos exemplos mais duradouros de injustiça ambiental e econômica do século XX.

4.1.1.4 Iniciativas Regulatórias

Após o desastre de Bhopal, que destacou as falhas na segurança química e a necessidade urgente de uma regulamentação mais robusta, várias iniciativas internacionais foram adotadas para melhorar a segurança no manuseio de produtos químicos e prevenir futuros acidentes.

As três principais legislações que surgiram como resposta a esses desafios são a Convenção nº 170 da OIT (1990), o Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos (GHS) (2003), e o Regulamento REACH da União Europeia (2006).

4.1.1.5 Convenção nº 170 da OIT sobre Segurança e Saúde no Trabalho com Produtos Químicos

A Convenção nº 170 da Organização Internacional do Trabalho (OIT), adotada em 1990, representa um marco importante na normatização internacional da segurança no uso de produtos químicos no ambiente de trabalho. O documento estabelece diretrizes claras para a proteção da saúde e da segurança dos trabalhadores expostos a substâncias químicas perigosas, exigindo que os Estados membros promovam medidas como rotulagem adequada, fichas de informações de segurança, treinamento contínuo, uso de equipamentos de proteção individual (EPIs) e sistemas de gestão de riscos (OIT, 1990).

De acordo com a OIT, a implementação dessa convenção visa prevenir exposições indevidas e acidentes industriais, como o que ocorreu em Bhopal, na Índia, em 1984. A organização afirma que “a aplicação de sistemas adequados de controle de riscos e a educação permanente dos trabalhadores são medidas indispensáveis para evitar tragédias semelhantes” (OIT, 1990, p. 5). Além disso, a convenção determina que as empresas devem realizar avaliações de risco regulares, adotar medidas de controle eficazes e garantir reparação apropriada aos trabalhadores prejudicados por exposições químicas.

Nesse contexto, a tragédia de Bhopal é frequentemente utilizada como um exemplo emblemático das consequências da negligência industrial e da ausência de regulação efetiva. A não implementação de protocolos como os sugeridos pela Convenção nº 170 contribuiu significativamente para a dimensão do desastre, demonstrando a necessidade urgente de políticas internacionais vinculativas que priorizem a saúde ocupacional e a segurança química.

4.1.1.6 Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos (GHS)

O Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos (GHS), desenvolvido pelas Nações Unidas, foi introduzido em 2003 com o objetivo de estabelecer um padrão global para a classificação e rotulagem de produtos químicos, facilitando a comunicação sobre os riscos dessas substâncias. O GHS visa melhorar a compreensão dos perigos de produtos químicos, prevenindo assim acidentes e exposições no local de trabalho e no ambiente em geral.

A implementação do GHS foi uma resposta à crescente necessidade de evitar incidentes semelhantes ao desastre de Bhopal, onde a falta de comunicação clara sobre os riscos do Isocianato de Metila (MIC) contribuiu para o alto número de vítimas. Com a introdução do GHS, foi possível padronizar rótulos e fichas de dados de segurança (SDS), tornando os riscos de substâncias mais transparentes para os trabalhadores, consumidores e autoridades.

4.1.1.7 Regulamento REACH da União Europeia

O Regulamento REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals), adotado pela União Europeia em 2007, tem como principal objetivo assegurar um elevado nível de proteção da saúde humana e do meio ambiente contra os riscos apresentados por substâncias químicas. A legislação exige que fabricantes e importadores registrem suas substâncias junto à Agência Europeia de Produtos Químicos (ECHA), fornecendo informações detalhadas sobre propriedades físico-químicas, toxicidade, ecotoxicidade e uso seguro (ECHA, 2024).

Segundo a própria ECHA, “o REACH transfere a responsabilidade de garantir a segurança dos produtos químicos dos governos para a indústria” (ECHA, 2024). Esse enfoque preventivo é central para o regulamento, pois impõe que as empresas demonstrem, por meio de dados científicos, que as substâncias que colocam no mercado não causam danos à saúde humana ou ao meio ambiente.

Embora o REACH não tenha sido criado diretamente em resposta ao desastre de Bhopal, ocorrido na Índia em 1984, o episódio serviu como um alerta global para

a necessidade de regulamentações mais rigorosas no setor químico. Como afirmado por Varma (2005), “a tragédia de Bhopal foi um resultado direto da negligência corporativa e da ausência de uma regulamentação eficaz”. O REACH, nesse sentido, representa um avanço significativo na prevenção de riscos industriais, ao estabelecer mecanismos rigorosos de avaliação e restrição de substâncias perigosas, além de incentivar a substituição por alternativas mais seguras quando necessário (ECHA, 2024).

A regulamentação também prevê a possibilidade de restrição ou proibição de substâncias que apresentem riscos inaceitáveis. Dessa forma, o REACH contribui para a construção de um ambiente químico mais seguro e transparente, fundamentado na precaução e na responsabilidade compartilhada entre os atores da cadeia produtiva.

4.2 Riscos e Acidentes Químicos no Brasil

A análise de riscos em processos químicos no Brasil permanece como um elemento fundamental para a formulação e implementação de políticas de segurança industrial. A contínua expansão do setor químico nacional, associada à sua crescente complexidade, amplia significativamente o potencial de ocorrência de acidentes com consequências severas à saúde humana e ao meio ambiente. Tais processos envolvem o uso e o armazenamento de substâncias perigosas, exigindo, portanto, uma regulamentação robusta e fiscalização efetiva.

Segundo o Anuário Estatístico de Acidentes de Trabalho (AEAT) de 2023, publicado pela Secretaria Especial de Previdência e Trabalho, houve um aumento no número de acidentes de trabalho em relação ao ano anterior. Conforme (BRASIL, 2023), mesmo com o aumento no número de acidentes em relação ao ano anterior, os setores de manufatura e indústria química continuam entre os mais afetados especialmente nas atividades que envolvem o manuseio e armazenamento de agentes perigosos.

Além disso, a Fundacentro destaca em suas publicações técnicas que a exposição a agentes químicos é uma das principais causas de doenças ocupacionais no Brasil. Em seu relatório de 2019, a instituição reforça que “as exposições a agentes químicos permanecem como um dos principais fatores de

risco à saúde dos trabalhadores no país, particularmente em setores industriais de transformação” (FUNDACENTRO, 2019).

Embora o número de acidentes fatais na indústria química não seja explicitado de forma detalhada, o histórico recente de desastres industriais reforça a urgência na adoção de políticas de prevenção mais eficazes. O rompimento da barragem em Mariana, em 2015, por exemplo, resultou na liberação de rejeitos tóxicos no ambiente, revelando falhas graves na gestão de riscos e na fiscalização das operações (IBAMA, 2016).

Em resposta a esses eventos, o Brasil tem buscado aprimorar sua legislação e aderir a diretrizes internacionais, como as da Organização Internacional do Trabalho (OIT), e vem fortalecendo políticas nacionais como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010. A PNRS estabelece diretrizes para o manejo responsável de resíduos perigosos, promovendo práticas sustentáveis e preventivas.

De acordo com o IBGE (2022), embora o país tenha avançado na formulação de mecanismos regulatórios e em políticas de prevenção, a implementação efetiva dessas práticas encontra obstáculos significativos, como a escassez de fiscais e o déficit de capacitação dos trabalhadores. A ANVISA também tem atuado na regulamentação da comercialização e do uso de produtos químicos, mas reconhece que a adesão às normas varia amplamente entre as regiões brasileiras (ANVISA, 2023).

Nesse contexto, o Ministério do Meio Ambiente reforça que “a gestão de produtos químicos perigosos deve estar entre as prioridades nacionais, a fim de prevenir riscos à saúde pública, ao meio ambiente e às futuras gerações” (MMA, 2023). Assim, a segurança química no Brasil continua sendo um desafio contínuo, que exige atualização normativa, maior investimento em fiscalização e formação técnica contínua dos profissionais da área.

4.2.1 Desastre de Vila Socó (Cubatão, Brasil, 1984): Causas e Desenvolvimento

O desastre de Vila Socó, ocorrido em Cubatão (SP) no dia 25 de fevereiro de 1984, foi um dos mais trágicos acidentes industriais do Brasil. Uma falha em um oleoduto da Petrobras ocasionou o vazamento de milhares de litros de gasolina em

uma área de manguezal densamente ocupada por habitações precárias. A substância inflamável acumulou-se sob as palafitas da comunidade e entrou em combustão, possivelmente devido a uma faísca elétrica ou chama aberta. O incêndio se espalhou rapidamente, resultando na morte de pelo menos 93 pessoas, segundo registros oficiais, embora estimativas apontem para um total superior a 200 vítimas (CETESB, 1984; G1, 2019).

A tragédia foi agravada por uma combinação de fatores estruturais, sociais e institucionais. A ocupação desordenada e a presença de habitações sobre mangues dificultaram a evacuação e contribuíram para a rápida propagação das chamas. O traçado dos oleodutos passava próximo a áreas densamente povoadas, evidenciando a negligência em relação ao zoneamento urbano e à segurança da população vulnerável.

Além disso, o vazamento de gasolina teria iniciado horas antes da explosão, sendo observado por moradores locais. A ausência de um sistema de alerta eficiente e de ações preventivas imediatas por parte das autoridades ou da própria empresa contribuiu para que a situação se agravasse. Muitos moradores relataram ter sentido o cheiro forte de combustível, mas não houve qualquer evacuação prévia (CETESB, 1984).

O desastre revelou a extrema vulnerabilidade das populações de baixa renda expostas a instalações industriais e a ausência de planejamento urbano adequado. O acidente também foi agravado pela inexistência de um sistema eficaz de resposta a emergências (CETESB, 1984).

4.2.1.1 Consequências Ambientais e Sanitárias

Antes mesmo do desastre, Cubatão já era conhecido como um dos locais mais poluídos do mundo, com altos índices de contaminação atmosférica por dióxido de enxofre (SO₂), partículas e outros compostos oriundos do polo industrial. O evento de Vila Socó intensificou as preocupações ambientais, pois a combustão de combustível em grande escala liberou compostos tóxicos no ar e contaminou o solo e os recursos hídricos.

Diversos estudos apontaram o aumento de doenças respiratórias entre os moradores de Cubatão nos anos subsequentes ao desastre. Um levantamento da

FIOCRUZ (1985) indicou agravamento das condições respiratórias em crianças e idosos após o evento. A área atingida permaneceu por anos com níveis elevados de poluentes, demandando ações prolongadas de recuperação ambiental (CETESB, 1987).

A emissão de gases tóxicos e material particulado durante o incêndio gerou impactos imediatos à saúde da população exposta, especialmente devido à inalação de monóxido de carbono, hidrocarbonetos e fuligem. O calor extremo também provocou queimaduras em moradores que tentaram fugir pelas áreas alagadas e estreitas passagens entre as palafitas.

Do ponto de vista ecológico, o impacto sobre o ecossistema de manguezal foi severo. A contaminação do solo e da água resultou na morte de espécies vegetais e animais, além de comprometer o equilíbrio biológico local. Como os manguezais desempenham função essencial na filtragem natural de poluentes e na proteção da linha costeira, a destruição dessa área agravou ainda mais os efeitos do desastre.

A partir desse evento, a CETESB intensificou o monitoramento da qualidade do ar e da água em Cubatão, implementando planos de controle de poluição mais rigorosos nas indústrias do entorno. A tragédia também incentivou a criação de programas de vigilância em saúde ambiental, com acompanhamento médico periódico dos moradores expostos aos poluentes liberados na ocasião.

4.2.1.2 O Desastre: Impactos e Transformações

O desastre de Vila Socó serviu como um ponto de inflexão para a política ambiental e de segurança industrial no Brasil. A tragédia levou ao fortalecimento da atuação da CETESB na fiscalização ambiental e operacional das indústrias paulistas e estimulou a aplicação mais rigorosa da Lei nº 6.938/81, que instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 1981).

Diversas normas e planos foram desenvolvidos ou revisados a partir da tragédia, incluindo:

- A ampliação da obrigatoriedade dos Estudos de Impacto Ambiental (EIA/RIMA), conforme a Resolução CONAMA nº 001/86 (CONAMA, 1986);

- A modernização das Normas Regulamentadoras (NRs), como a NR-20 (inflamáveis e combustíveis) e a NR-1 (Gerenciamento de Riscos Ocupacionais) (BRASIL, 2020);
- O fortalecimento de órgãos como o IBAMA e a criação da ANVISA, com maior controle sobre produtos químicos (BRASIL, 1999);
- A institucionalização de planos como o Plano de Auxílio Mútuo (PAM) e o Plano Municipal de Contingência em Cubatão (Prefeitura de Cubatão, 2020).

Além disso, o acidente contribuiu para o amadurecimento da consciência pública e política sobre os riscos tecnológicos em áreas urbanas, estimulando a formulação de políticas de prevenção e controle de acidentes ampliados, conforme preconizado pelo Decreto nº 4.074/2002, que regulamenta a Lei de Agrotóxicos e exige medidas de gerenciamento de riscos para substâncias perigosas.

O desastre também influenciou diretamente o aperfeiçoamento das diretrizes do licenciamento ambiental em nível estadual e federal, especialmente em áreas com sobreposição de risco químico e ocupação irregular. Com isso, passou-se a exigir maior detalhamento técnico dos empreendimentos quanto à segurança operacional, impacto sobre comunidades vulneráveis e planos de contingência eficazes.

Na esfera internacional, o caso de Vila Socó passou a ser citado em fóruns de referência como exemplo emblemático de falhas sistêmicas em segurança química. Esse reconhecimento contribuiu para que o Brasil reforçasse seu alinhamento com convenções internacionais, como a Agenda 21, o Princípio da Precaução da Conferência do Rio-92 e, posteriormente, os compromissos com o Sistema Globalmente Harmonizado (GHS) da ONU.

4.2.1.3 Recuperação Social e Econômica

A tragédia provocou graves impactos sociais e econômicos. Muitas famílias perderam suas casas e meios de subsistência. Houve desvalorização imobiliária e retração da atividade industrial na região. Um estudo da Fundação Getúlio Vargas

(FGV, 1992) indicou aumento na taxa de pobreza e desemprego em Cubatão nos anos seguintes ao desastre. A tragédia expôs, de maneira contundente, a ausência de políticas habitacionais e de proteção social eficazes para populações em situação de risco.

Em resposta, a Petrobras e a Prefeitura de Cubatão implementaram medidas de reurbanização. Foi construído o bairro Vila São José para abrigar cerca de 400 famílias afetadas. A infraestrutura local foi melhorada com a instalação de escola, creche, unidade de saúde e pavimentação (G1, 2019). Em 2019, iniciou-se o processo de entrega das escrituras definitivas aos moradores (Prefeitura de Cubatão, 2019).

Além da reconstrução física, foram promovidas campanhas educativas sobre prevenção de acidentes e programas de formação profissional, com o objetivo de reinserir os moradores no mercado de trabalho local. A recuperação econômica, no entanto, foi lenta e enfrentou entraves estruturais como a dependência econômica de grandes indústrias e a baixa diversificação produtiva do município.

A tragédia também incentivou a criação de conselhos municipais de meio ambiente e de defesa civil, ampliando a participação da sociedade civil na formulação de políticas públicas. A experiência de Cubatão passou a ser utilizada como modelo para ações integradas de recuperação urbana e ambiental, servindo de referência para outros municípios brasileiros em contextos de risco tecnológico e vulnerabilidade socioambiental.

Embora importantes avanços tenham sido alcançados, desafios persistem, especialmente no que se refere à manutenção da infraestrutura implantada, à continuidade de políticas públicas e ao fortalecimento da resiliência comunitária frente a novos riscos industriais.

4.2.1.4 Iniciativas Regulatórias Pós-Desastre de Vila Socó: Avanços na Segurança e no Meio Ambiente

O desastre da Vila Socó representou um divisor de águas na abordagem brasileira sobre segurança industrial, riscos tecnológicos e proteção ambiental. Sua gravidade expôs não apenas falhas na gestão de áreas industriais, mas também a ausência de políticas públicas articuladas para a prevenção de acidentes ampliados.

Como resposta, o Brasil iniciou um movimento de reformulação institucional e normativa. A Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/1981) passou a ser aplicada com maior rigor, especialmente no que se refere ao licenciamento ambiental, à exigência de estudos de impacto e à responsabilização por danos (BRASIL, 1981). A partir dos anos 1990, houve avanço na integração entre segurança industrial e legislação ambiental, resultando em novos mecanismos regulatórios voltados à prevenção de riscos tecnológicos.

Entre os instrumentos mais relevantes estão:

- A Resolução CONAMA nº 001/86, que normatizou os Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e os Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA), exigindo análise prévia detalhada para empreendimentos de significativo potencial poluidor (CONAMA, 1986);
- A Norma Regulamentadora nº 20 (NR-20), reformulada em 2012 e atualizada posteriormente, que estabelece requisitos mínimos para a gestão de segurança e saúde nas atividades com inflamáveis e combustíveis (BRASIL, 2020);
- A criação dos Planos de Gerenciamento de Riscos (PGRs) e sua exigência como parte do licenciamento ambiental para atividades de alto risco, conforme diretrizes do Decreto nº 4.074/2002 (BRASIL, 2002);
- A estruturação de Sistemas de Defesa Civil Municipais, como em Cubatão, que integram planos de contingência, redes de monitoramento e centros de resposta a emergências.

Além disso, o desastre impulsionou o debate sobre responsabilidade compartilhada entre empresas, governo e sociedade civil, promovendo uma cultura de prevenção e gestão integrada de riscos. No plano internacional, o Brasil passou a se alinhar com iniciativas como a Agenda 21 (Rio-92), o Princípio da Precaução, e posteriormente com o Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos (GHS), promovido pela ONU.

Portanto, embora a tragédia de Vila Socó tenha exposto fragilidades profundas, ela também foi um catalisador para avanços significativos nas políticas de segurança industrial e ambiental, cujos reflexos ainda moldam as diretrizes regulatórias e operacionais do setor químico brasileiro.

4.2.1.5 Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/81)

A Lei nº 6.938, sancionada em 31 de agosto de 1981, instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) e representou um dos primeiros marcos legais voltados à proteção ambiental no Brasil. Seu objetivo principal é a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, estabelecendo instrumentos importantes, como o licenciamento ambiental, a avaliação de impacto ambiental (AIA), o zoneamento ecológico-econômico (ZEE), entre outros (BRASIL, 1981).

Embora tenha sido promulgada antes do desastre industrial ocorrido em Vila Socó, em 1984, a PNMA ganhou relevância reforçada após o evento, servindo como base legal para o aprimoramento de instrumentos de controle ambiental e de gestão de riscos industriais. O acidente evidenciou lacunas na fiscalização e no planejamento urbano-industrial, incentivando o fortalecimento da atuação dos órgãos ambientais no licenciamento e no monitoramento de empreendimentos potencialmente poluidores (CETESB, 1985).

Entre os avanços impulsionados por essa conjuntura, destaca-se a ampliação do poder de atuação do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), bem como a maior exigência de estudos de impacto ambiental para instalações industriais localizadas em áreas sensíveis ou densamente povoadas. A PNMA passou a ser mais rigorosamente aplicada, com foco preventivo, visando mitigar a ocorrência de novos acidentes ampliados.

4.2.1.6 Lei de Crimes Ambientais (Lei nº 9.605/98)

A Lei nº 9.605, sancionada em 12 de fevereiro de 1998, também conhecida como Lei de Crimes Ambientais, representou um avanço significativo na legislação

ambiental brasileira ao consolidar a responsabilização penal e administrativa de pessoas físicas e jurídicas por condutas e atividades lesivas ao meio ambiente (BRASIL, 1998).

Essa norma surgiu como resposta a uma crescente demanda social por maior rigor nas punições aos danos ambientais, intensificada após desastres como o ocorrido em Vila Socó, em 1984, que evidenciaram a fragilidade das políticas de prevenção e controle ambiental em áreas industriais.

A lei tipifica diversos crimes ambientais, abrangendo infrações relacionadas à poluição, manejo inadequado de resíduos perigosos, degradação de recursos naturais, entre outros. Além disso, introduziu sanções como multas, prestação de serviços à comunidade, suspensão parcial ou total de atividades e até mesmo detenção ou reclusão, dependendo da gravidade da infração.

Um de seus principais objetivos foi o de aumentar a responsabilidade ambiental das empresas, incentivando práticas preventivas e corretivas para mitigar os impactos ambientais de suas operações. A legislação também reforça a importância de instrumentos como o licenciamento ambiental e a avaliação de impacto ambiental (AIA) para prevenir acidentes com potencial de causar degradação significativa ao meio ambiente e à saúde pública.

4.2.1.7 Norma Regulamentadora (NR) 20 – Segurança e Saúde no Trabalho com Inflamáveis e Combustíveis

A Norma Regulamentadora nº 20 (NR-20), que trata da segurança e saúde no trabalho com inflamáveis e combustíveis, é um dos marcos normativos mais relevantes na prevenção de acidentes envolvendo substâncias perigosas em ambientes industriais. Embora sua primeira versão date da década de 1970, a norma passou por revisões significativas, especialmente em 2012, para se adequar às novas exigências de segurança e aos aprendizados obtidos com tragédias como o desastre de Vila Socó, ocorrido em Cubatão, em 1984.

A NR-20 estabelece requisitos mínimos para a gestão da segurança em instalações que operam com líquidos inflamáveis e combustíveis, abrangendo desde o armazenamento e manuseio até a capacitação de trabalhadores, elaboração de

análise de riscos, plano de prevenção e controle de vazamentos, e resposta a emergências (BRASIL, 2023).

A norma classifica as instalações em categorias de risco (baixo, médio e alto), conforme a quantidade e o tipo de substâncias armazenadas, o que determina o grau de exigência quanto à segurança operacional. Com isso, busca-se garantir a proteção dos trabalhadores, das comunidades vizinhas e do meio ambiente, reduzindo a probabilidade de explosões, incêndios e vazamentos com consequências graves, como os observados em Cubatão na década de 1980.

A implementação rigorosa da NR-20, aliada a outras medidas de controle, é fundamental para evitar a repetição de desastres ambientais e industriais, sendo uma norma obrigatória para todas as empresas que atuam com inflamáveis e combustíveis no território nacional.

4.2.1.8 Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA)

A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) foi criada pela Lei nº 9.782, de 26 de janeiro de 1999, como autarquia sob regime especial vinculada ao Ministério da Saúde. Sua criação representou um avanço importante no fortalecimento do sistema nacional de vigilância sanitária, com o objetivo de proteger e promover a saúde da população por meio do controle sanitário da produção e comercialização de produtos e serviços submetidos à vigilância sanitária (BRASIL, 1999).

Após tragédias como o desastre de Vila Socó (1984) e outros acidentes ambientais e industriais no Brasil, houve um fortalecimento das políticas públicas voltadas à gestão de substâncias químicas perigosas. A ANVISA assumiu papel de destaque na fiscalização da produção, comercialização e uso de produtos químicos industriais, especialmente aqueles classificados como inflamáveis, tóxicos ou corrosivos, regulando inclusive substâncias com potencial de causar riscos à saúde humana.

Além disso, a ANVISA passou a atuar conjuntamente com outros órgãos, como o IBAMA, a ANP e o Ministério do Trabalho, na elaboração de normas técnicas, autorização de funcionamento de empresas (AFE) e controle do Cadastro Nacional de Produtos Perigosos à Saúde Pública e ao Meio Ambiente.

Por meio de regulamentações específicas e ações integradas de fiscalização, a ANVISA tem contribuído significativamente para a minimização dos riscos sanitários e ambientais decorrentes do uso inadequado de produtos químicos industriais, reforçando a segurança dos processos produtivos e a proteção da saúde coletiva.

4.2.1.9 Sistema de Avaliação de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) – Resolução CONAMA nº 001/86

A Resolução CONAMA nº 001, de 23 de janeiro de 1986, representou um importante avanço na regulamentação ambiental brasileira ao estabelecer a obrigatoriedade da realização de Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e do respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) para atividades potencialmente causadoras de significativa degradação do meio ambiente.

Essa resolução foi editada pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) como uma resposta ao crescente número de acidentes e impactos ambientais associados a grandes empreendimentos industriais, como o ocorrido no desastre de Vila Socó, em 1984. A partir de sua promulgação, tornou-se obrigatória a avaliação prévia e detalhada dos impactos ambientais de projetos como plantas químicas, refinarias, indústrias petroquímicas e outros empreendimentos de grande porte, garantindo que sua instalação estivesse condicionada à aprovação ambiental por meio de licenciamento ambiental triplo (LP, LI e LO).

De acordo com o artigo 2º da resolução, o EIA deve considerar aspectos como alternativas locacionais, mitigação de impactos, riscos ambientais e efeitos cumulativos da atividade. O RIMA, por sua vez, visa comunicar essas informações de forma acessível à sociedade, promovendo a transparência e a participação pública nos processos de decisão ambiental.

A Resolução CONAMA nº 001/86 consolidou-se como um instrumento essencial de prevenção e passou a integrar a Política Nacional do Meio Ambiente, fortalecendo a atuação dos órgãos ambientais no controle de atividades potencialmente poluidoras e contribuindo diretamente para a redução do risco de novos desastres tecnológicos e ambientais.

4.2.1.10 *Sistema de Gestão de Segurança e Saúde no Trabalho (SGSST)*

A criação e o fortalecimento de um Sistema de Gestão de Segurança e Saúde no Trabalho (SGSST) no Brasil foram impulsionados por acidentes industriais graves, como o desastre de Vila Socó, ocorrido em 1984. Esses eventos evidenciaram a necessidade de medidas preventivas mais eficazes nas indústrias, especialmente aquelas que operam com produtos químicos perigosos e inflamáveis.

Nesse contexto, as Normas Regulamentadoras (NRs), instituídas pelo Ministério do Trabalho por meio da Portaria nº 3.214/1978, passaram a ter papel central na proteção da saúde dos trabalhadores. Normas como a NR 1 (Disposições Gerais) e a NR 4 (Serviços Especializados em Engenharia de Segurança e em Medicina do Trabalho – SESMT) passaram a exigir de forma mais efetiva a implementação de programas de gestão de riscos ocupacionais, com foco em prevenção, monitoramento e controle dos ambientes de trabalho.

A NR 1, reformulada pela Portaria SEPRT nº 6.730/2020, incorporou de forma explícita a exigência da Gestão de Riscos Ocupacionais (GRO) e do Programa de Gerenciamento de Riscos (PGR), reforçando a necessidade de que todas as empresas identifiquem perigos, avaliem riscos e adotem medidas preventivas. Já a NR 4 determina a obrigatoriedade de profissionais qualificados, como engenheiros e técnicos de segurança, atuando diretamente na prevenção de acidentes e doenças ocupacionais.

Essas normas integram-se aos princípios do SGSST, previsto também na Norma ISO 45001:2018, e constituem um marco na transição do modelo reativo para um modelo proativo de segurança do trabalho, fundamental para a prevenção de novas tragédias industriais.

4.3 Conceitos de perigo e risco

No campo da segurança de processos e da saúde e segurança ocupacional, é essencial diferenciar claramente os conceitos de perigo e risco. Embora frequentemente usados de forma intercambiável no senso comum, eles possuem significados distintos, fundamentais para a análise e prevenção de acidentes.

Segundo Sanders e McCormick (1993), um perigo é uma condição ou conjunto de circunstâncias que possui o potencial de causar dano, enquanto risco é a probabilidade de que esse dano ocorra, considerando a exposição a essas condições. De maneira complementar, Kolluru (1996) reforça que o perigo representa a fonte ou condição inicial que pode causar efeitos negativos, enquanto o risco é a função do perigo, da probabilidade de ocorrência e da gravidade das consequências associadas. Já Shinar, Gurion e Flascher (1991) destacam que o risco corresponde à avaliação concreta do efeito potencial de um perigo, considerando exposição, vulnerabilidade e contexto.

No contexto específico deste trabalho, os conceitos podem ser aplicados da seguinte forma:

- Perigo: refere-se ao agente ou à condição inerente que possui potencial de causar dano, como um gás inflamável armazenado sob pressão ou produtos químicos tóxicos.
- Evento perigoso: é a materialização do perigo, por exemplo, a liberação acidental do gás ou falha estrutural do tanque.
- Risco: envolve a avaliação da probabilidade de ocorrência do evento perigoso e da gravidade de suas consequências, incluindo danos à saúde humana, incêndios, explosões, contaminações ambientais ou impactos ao patrimônio.

Dessa forma, a avaliação de risco não se limita à identificação do perigo, mas considera também a exposição, a vulnerabilidade dos indivíduos e a eficácia das medidas de prevenção e controle existentes. O risco, portanto, não é uma característica estática do perigo, mas uma combinação de fatores que depende do contexto operacional e das condições de segurança adotadas.

Ao aplicar esses conceitos em ferramentas de modelagem de consequências, como o ALOHA, é possível simular cenários acidentais e estimar o potencial dano, permitindo que medidas preventivas e planos de contingência sejam adequadamente planejados e implementados.

4.4 Ferramenta de Simulação: Software ALOHA®

O ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) é um software desenvolvido pela Environmental Protection Agency (EPA) e pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), dos Estados Unidos. O objetivo do software é prever a dispersão atmosférica de substâncias químicas perigosas em situações de emergência, como acidentes industriais e vazamentos em áreas fixas, auxiliando na avaliação de riscos e no planejamento de respostas a emergências (EPA, 2022; NOAA, 2020).

Originalmente concebido para auxiliar na resposta a emergências industriais, o ALOHA consolidou-se como uma ferramenta essencial na simulação de riscos químicos em tempo real. O programa permite a análise de cenários como vazamentos de gases tóxicos ou inflamáveis, incêndios em poças e explosões do tipo BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion), fornecendo dados valiosos para a tomada de decisão por equipes de emergência e gestores de segurança (DIEGO, 2021).

De acordo com Freitas e Albin (2023), o ALOHA "é capaz de prever a concentração e a extensão da nuvem de um gás tóxico ou inflamável em caso de vazamento acidental em uma instalação industrial ou durante um incidente envolvendo transporte de produtos perigosos", o que o torna uma ferramenta relevante não apenas para a resposta emergencial, mas também para o planejamento de segurança e a prevenção de acidentes tecnológicos.

4.4.1 Finalidade e Aplicabilidade

O ALOHA permite a modelagem de diferentes formas de liberação química, com entrada de parâmetros relacionados à substância envolvida (como ponto de ebulição, densidade, volatilidade), às condições meteorológicas locais (velocidade do vento, estabilidade atmosférica, temperatura, umidade) e às características físicas da fonte do vazamento (tanques, dutos, poças ou liberações diretas). Com base nesses dados, o programa calcula a dispersão da nuvem e os possíveis efeitos à saúde humana e ao ambiente.

Além disso, o ALOHA pode ser utilizado na elaboração de Planos de Resposta a Emergências (PRE), na definição de zonas de segurança, rotas de evacuação, e na escolha adequada de equipamentos de proteção individual (EPI), configurando-se como um recurso de suporte à tomada de decisão (BIANCA; KATHLEEN, 2023).

4.4.2 Limitações do software ALOHA

Embora amplamente utilizado para avaliações preliminares de riscos, o ALOHA apresenta limitações técnicas importantes que devem ser consideradas. O software assume terreno plano e vento constante em velocidade e direção durante toda a simulação, o que reduz a precisão dos resultados em regiões com relevo acidentado ou em áreas urbanas complexas. Em localidades como Poços de Caldas, tais simplificações podem resultar em variações significativas no comportamento real da dispersão (DIEGO, 2021).

Outra limitação relevante é que o ALOHA não simula a projeção de fragmentos metálicos em eventos do tipo BLEVE, concentrando-se apenas na modelagem de radiação térmica, apesar de fragmentos serem uma das principais causas de danos físicos a grandes distâncias (ANDRÉ, 2021). O software também não considera reações químicas secundárias, formação de aerossóis ou subprodutos, assumindo que a nuvem não interage quimicamente com a atmosfera, o que pode comprometer a fidelidade de simulações envolvendo substâncias reativas (ANDRÉ, 2021).

Adicionalmente, o ALOHA é limitado a substâncias puras presentes em sua base de dados, não realiza simulações tridimensionais e possui alcance espacial e temporal restrito a cerca de 10 km e 60 minutos (ANDRÉ, 2021). Em regiões próximas à fonte do vazamento, o modelo pode subestimar ou superestimar concentrações devido a alto nível de turbulência (DIEGO, 2021).

Conforme destacado por Freitas e Albin (2023), a qualidade dos resultados depende fortemente da precisão dos dados de entrada e da capacidade técnica do usuário. Por fim, o ALOHA calcula apenas a severidade dos efeitos, não a probabilidade, impossibilitando análises quantitativas completas de risco.

Apesar dessas limitações, o software permanece útil para estudos preliminares quando utilizado criticamente e em conjunto com outras ferramentas da suíte CAMEO, como o MARPLOT e o CAMEO Chemicals.

4.4.3 Benefícios do uso do ALOHA e sua integração com as normas brasileiras

Embora existam limitações inerentes às ferramentas de modelagem computacional, elas permanecem essenciais para estimar consequências de acidentes industriais. O software ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) apresenta uma série de benefícios que justificam seu uso frequente em análises preliminares de riscos químicos, principalmente no contexto da indústria nacional e das exigências regulatórias brasileiras.

Um dos principais diferenciais do ALOHA é sua acessibilidade gratuita, aliada a uma interface intuitiva e à capacidade de gerar simulações rápidas com base em poucos dados de entrada. Essa facilidade operacional torna o programa especialmente útil para serviços de emergência, órgãos ambientais e pequenas empresas, que muitas vezes não dispõem de recursos para adquirir softwares comerciais de modelagem mais complexos, como o PHAST ou o SAFETI (FREITAS; ALBINI, 2023).

Além disso, o ALOHA está em consonância com os princípios das Normas Regulamentadoras brasileiras, especialmente a NR-1 e a NR-20. A NR-1, que trata do Gerenciamento de Riscos Ocupacionais (GRO), exige a implementação de um Programa de Gerenciamento de Riscos (PGR), o qual demanda a identificação de perigos, avaliação dos riscos e definição de medidas preventivas e corretivas (BRASIL, 2020). O ALOHA contribui diretamente para esse processo ao fornecer dados simulados de cenários acidentais, como a dispersão de gases tóxicos ou o impacto térmico de explosões, que podem subsidiar a elaboração de medidas de controle mais eficazes.

No caso da NR-20, que trata da segurança no trabalho com líquidos inflamáveis e combustíveis, o uso de ferramentas de modelagem é incentivado para fins de análise de risco, definição de zonas de segurança, e elaboração de planos de prevenção e resposta a emergências (BRASIL, 2023). O ALOHA atende a esses requisitos ao permitir a simulação de BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor

Explosion), incêndios em poças e vazamentos pressurizados, fornecendo resultados gráficos que delimitam as zonas de ameaça (AEGL-1, AEGL-2 e AEGL-3), conforme padrões internacionais (EPA, 2022).

Outro benefício importante é a integração do ALOHA com outros programas da suíte CAMEO, como o MARPLOT, que permite georreferenciar os resultados das simulações sobre mapas reais, e o CAMEO Chemicals, que fornece informações detalhadas sobre propriedades físico-químicas, toxicidade e incompatibilidades das substâncias envolvidas. Essa integração proporciona uma abordagem mais completa e multidisciplinar, unindo elementos de segurança química, geografia e gestão ambiental.

Além disso, o uso do ALOHA pode ser um recurso pedagógico importante na formação de profissionais das áreas de engenharia, segurança do trabalho e gestão ambiental, promovendo a compreensão de cenários acidentais de forma prática e visual. Conforme Salazar (2016), "a utilização de softwares de modelagem como o ALOHA na formação técnica contribui significativamente para a construção de uma cultura de prevenção de acidentes e de resposta eficiente a emergências".

Por fim, sua aplicação está alinhada com os princípios da Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/81) e com os instrumentos de licenciamento ambiental, especialmente na etapa de elaboração dos Estudos de Análise de Riscos (EAR) e dos Planos de Atendimento a Emergências (PAE). Nesse contexto, o ALOHA funciona como uma ferramenta de apoio à gestão integrada de riscos tecnológicos, contribuindo para o cumprimento dos requisitos legais, a proteção das comunidades e a sustentabilidade das atividades industriais.

4.4.4 Integração com outros programas

O ALOHA pode ser potencializado por meio da integração com outros softwares desenvolvidos pela EPA e NOAA, compondo o sistema CAMEO Suite, que inclui:

- CAMEO Chemicals: banco de dados com informações detalhadas sobre propriedades físico-químicas, riscos à saúde e incompatibilidades de milhares de substâncias;

- MARPLOT: sistema de mapeamento geográfico que permite importar as zonas de ameaça geradas pelo ALOHA e visualizar sobre áreas reais, com ruas, edificações e regiões sensíveis;
- LandView: programa complementar utilizado para sobrepor dados de simulação com informações demográficas e populacionais.

Essa interconectividade transforma o ALOHA em uma plataforma abrangente para planejamento urbano, análise de vulnerabilidade e resposta a emergências, permitindo que os resultados de dispersão atmosférica sejam cruzados com dados de densidade populacional e infraestrutura crítica (SALAZAR, 2016).

5 NORMAS REGULAMENTADORAS (NR) E ANÁLISE DE RISCOS QUÍMICOS

A gestão eficaz dos riscos químicos nos ambientes de trabalho é fundamental para garantir a segurança dos trabalhadores, proteger a saúde pública e preservar o meio ambiente. No Brasil, esse controle é regulamentado por meio das Normas Regulamentadoras (NRs), estabelecidas pelo Ministério do Trabalho e Emprego.

Entre as normas mais relevantes no contexto da segurança química estão:

- NR 1 – Disposições Gerais e Gerenciamento de Riscos Ocupacionais (GRO): atualizada pela Portaria SEPRT nº 6.730/2020, essa norma estabelece que todas as organizações devem implementar um Programa de Gerenciamento de Riscos (PGR), substituindo o antigo Programa de Prevenção de Riscos Ambientais (PPRA). O PGR exige a identificação de perigos, avaliação de riscos e implementação de medidas de controle, com foco na prevenção de acidentes e doenças ocupacionais.
- NR 20 – Segurança e Saúde no Trabalho com Inflamáveis e Combustíveis: define os requisitos mínimos para a gestão de segurança em atividades que envolvam líquidos e gases inflamáveis, abrangendo desde o armazenamento e transporte até o manuseio desses produtos. A NR 20 exige análises de risco, capacitação de

trabalhadores, planos de emergência e controle de fontes de ignição, visando à prevenção de explosões e incêndios.

Essas normas compõem um conjunto de ferramentas essenciais para promover ambientes de trabalho mais seguros, especialmente em indústrias químicas, petroquímicas, de fertilizantes e combustíveis, como aquelas presentes no polo industrial de Cubatão.

5.1 Gestão de Riscos Químicos segundo o PGR da NR 1

Com a substituição da NR 9 pela nova redação da NR 1 em 2022, o Programa de Prevenção de Riscos Ambientais (PPRA) foi substituído pelo Programa de Gerenciamento de Riscos (PGR), conforme estabelecido pela Portaria SEPRT nº 6.730/2020. O PGR tem como objetivo a preservação da saúde e integridade dos trabalhadores, por meio da antecipação, identificação, avaliação e controle dos riscos ocupacionais, incluindo os riscos químicos.

No contexto da exposição a agentes químicos, o PGR exige que o empregador identifique as substâncias presentes no ambiente de trabalho, avalie as rotas de exposição (inalação, contato dérmico, ingestão) e implemente medidas de controle técnico e organizacional. A norma estabelece que os controles devem considerar a natureza, concentração, intensidade e tempo de exposição aos agentes, com ações voltadas para eliminar ou mitigar os riscos (BRASIL, 2020).

Essas ações incluem, entre outras:

- Substituição de produtos químicos perigosos por alternativas menos tóxicas;
- Adoção de sistemas de ventilação localizada ou geral;
- Implantação de barreiras físicas de contenção;
- Uso obrigatório de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs);
- Monitoramento ambiental e biológico da exposição;

- Capacitação contínua dos trabalhadores.

A gestão eficaz desses riscos é essencial em ambientes industriais como os de Cubatão, onde o histórico de acidentes evidencia a importância de um sistema robusto de controle de substâncias perigosas.

5.2 A Norma Regulamentadora nº 20 (NR 20) e o Controle de Inflamáveis

A Norma Regulamentadora nº 20 (NR 20), atualizada pela Portaria MTE nº 1.146/2024, estabelece os requisitos mínimos para a gestão da segurança e saúde no trabalho nas atividades com inflamáveis e líquidos combustíveis. Ela se aplica a atividades como extração, produção, armazenamento, transferência, manuseio e manipulação dessas substâncias.

Segundo a norma, as instalações devem ser classificadas conforme a natureza da atividade desenvolvida e a capacidade de armazenamento, sendo obrigatória a adoção de exigências de segurança específicas para cada categoria de risco (BRASIL, 2024).

Entre as diretrizes mais relevantes da NR 20, destacam-se:

- **Análise de Riscos:** É obrigatória a avaliação prévia e periódica dos riscos envolvidos nas operações, com o objetivo de implementar medidas de controle proporcionais ao grau de risco identificado (BRASIL, 2024).
- **Plano de Prevenção e Controle:** A norma exige que seja elaborado um plano contendo ações para situações de vazamento, derramamento, incêndio, explosão ou emissões fugitivas, com revisão sempre que houver modificações significativas nas instalações (BRASIL, 2024).
- **Controle de Fontes de Ignição:** Determina-se que o empregador deve eliminar ou controlar todas as fontes de ignição nas áreas com presença de atmosferas inflamáveis. Além disso, instalações elétricas e equipamentos devem ser compatíveis com o ambiente de risco (BRASIL, 2024).

- Plano de Resposta a Emergências: O plano deve estabelecer procedimentos, responsabilidades e realizar simulações periódicas a fim de verificar a eficácia da resposta emergencial (BRASIL, 2024).
- Treinamento e Capacitação: Todos os trabalhadores envolvidos devem receber treinamento adequado sobre os riscos, procedimentos operacionais e ações emergenciais, conforme o grau de risco da instalação e sua função (BRASIL, 2024).

Essas medidas são fundamentais para prevenir acidentes industriais de grandes proporções, como os ocorridos em Cubatão, contribuindo para a proteção dos trabalhadores, da população do entorno e do meio ambiente.

5.3. Análise de Riscos Químicos no Contexto das Normas Regulamentadoras

A análise de riscos químicos é um processo sistemático que visa identificar, avaliar e controlar os perigos associados ao uso de substâncias químicas no ambiente de trabalho. Esse processo considera as propriedades físico-químicas das substâncias, suas toxicidades, as condições de exposição e as medidas de controle existentes.

De acordo com a Norma Regulamentadora nº 1 (NR-1), que trata do Gerenciamento de Riscos Ocupacionais (GRO), e com a NR-20, que regula as atividades com inflamáveis e combustíveis, é fundamental que a análise de riscos contemple não apenas a identificação das substâncias e agentes presentes no ambiente, mas também a avaliação detalhada dos efeitos potenciais à saúde dos trabalhadores e ao meio ambiente.

O Programa de Gerenciamento de Riscos (PGR), instituído pela NR-1, estabelece que "todas as medidas de prevenção devem ser implementadas, mantidas e revisadas periodicamente, visando à melhoria contínua das condições de trabalho" (BRASIL, 2022). Além disso, a norma determina que a identificação de perigos e a avaliação de riscos sejam realizadas de forma contínua, considerando os perigos existentes, novos ou modificados.

Nesse contexto, ferramentas como o ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) são extremamente úteis para modelar possíveis cenários de liberação de produtos químicos perigosos, permitindo simular dispersões atmosféricas, identificar zonas de perigo e embasar a elaboração de planos de emergência (USEPA, 2020).

A integração das diretrizes estabelecidas pelas Normas Regulamentadoras com uma análise de riscos químicos eficaz permite não apenas o cumprimento da legislação vigente, mas também a promoção de um ambiente de trabalho mais seguro e saudável. A NR-1 destaca que “a organização deve assegurar que as medidas de prevenção adotadas considerem a severidade dos riscos, a probabilidade de sua ocorrência e a vulnerabilidade dos trabalhadores expostos” (BRASIL, 2022).

6 METODOLOGIA

Neste trabalho foi aplicada a metodologia do software ALOHA para a simulação de um cenário em que foi possível, conhecer, estudar e avaliar o uso dessa ferramenta.

6.1 Justificativa da escolha do software

O ALOHA foi escolhido neste trabalho por sua capacidade de simular cenários acidentais com substâncias perigosas, permitindo delimitar zonas de ameaça e avaliar impactos potenciais. Essa característica atende diretamente ao objetivo do estudo, que é analisar os riscos associados a processos químicos e propor medidas preventivas a partir da modelagem de acidentes. Além disso, por ser gratuito e de fácil utilização, o software se mostra particularmente acessível tanto para aplicações acadêmicas quanto para análises preliminares de risco, justificando sua adoção neste trabalho.

6.2 Simulação

Para a simulação do acidente químico envolvendo substâncias inflamáveis, foi utilizado o software ALOHA. O local escolhido para o estudo foi à zona sul da cidade de Poços de Caldas – MG, caracterizada pela presença de atividades industriais em áreas próximas a bairros residenciais. Essa configuração torna essa região adequada para a avaliação de cenários acidentais, considerando a possibilidade de impactos sobre a população em caso de eventos envolvendo substâncias perigosas.

Figura 1 - Imagem aérea da área de estudo, localizada na zona sul de Poços de Caldas-MG.



Fonte: Google Earth, 2025.

Poços de Caldas é um município com considerável atividade industrial e zonas residenciais próximas a áreas potencialmente perigosas, o que torna essencial a avaliação de cenários acidentais como forma de prevenção e planejamento. A escolha da substância propano, um gás liquefeito de petróleo (GLP) com elevado poder inflamável, visou representar uma situação realista de risco em instalações industriais e centrais de armazenamento e distribuição de combustíveis.

O tanque simulado tem 8 metros de diâmetro, 6,96 metros de altura, e encontrava-se 80% cheio, totalizando aproximadamente 132.414 kg de propano líquido a uma temperatura operacional de 40 °C. O propano, sob essas condições,

encontra-se em estado líquido pressurizado, com alta energia interna. Caso ocorra um vazamento seguido de aquecimento externo e falha estrutural do recipiente, há potencial para um evento conhecido como BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion).

As condições meteorológicas utilizadas na simulação foram baseadas em médias climatológicas regionais: temperatura ambiente de 24 °C, umidade relativa do ar de 80%, cobertura de nuvens de 7 décimos, e velocidade do vento de 9 m/s, com direção proveniente do leste-sudeste (ESE) a uma altura de 3 metros (INMET, 2025; Weatherspark, 2025).

A rugosidade do terreno foi classificada como “urbana ou floresta”, o que influencia diretamente na dispersão dos vapores e na propagação da radiação térmica. Ainda, a simulação considerou uma edificação próxima com 1,34 trocas de ar por hora, representando uma estrutura térrea com poucas aberturas, refletindo a vulnerabilidade da infraestrutura urbana diante de um evento explosivo de grande magnitude.

6.2.1 Influência das características geográficas de Poços de Caldas

A cidade de Poços de Caldas está localizada em uma região de relevo fortemente acidentado, caracterizada pela presença de morros, vales profundos e variações significativas de altitude. Essa configuração topográfica influencia diretamente o comportamento da dispersão de gases, podendo favorecer a acumulação de vapores densos em áreas baixas ou alterar a direção predominante da pluma devido ao canalamento do vento.

Como o ALOHA assume terreno plano e condições atmosféricas uniformes, a simulação realizada neste estudo não incorpora esses efeitos topográficos, podendo gerar discrepâncias em relação ao comportamento real da dispersão. Em áreas em forma de bacia, como ocorre em partes de Poços de Caldas, vapores mais pesados que o ar tendem a se acumular, enquanto em regiões mais elevadas a dispersão tende a ocorrer mais rapidamente.

Portanto, os resultados devem ser interpretados com cautela, considerando que o relevo da região pode intensificar ou reduzir os impactos estimados pelo modelo, especialmente no caso de gases inflamáveis ou tóxicos.

6.2.2 Justificativa das escolhas do cenário simulado

A simulação selecionada neste trabalho considera um tanque contendo propano liquefeito submetido a um evento capaz de gerar um BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion). A escolha desse cenário fundamenta-se no fato de que o propano é amplamente utilizado na indústria, apresenta elevado potencial energético e pode causar danos significativos devido à rápida expansão do vapor e à intensa radiação térmica associada ao fenômeno.

Optou-se por modelar um BLEVE porque esse tipo de acidente representa uma das situações mais críticas envolvendo o armazenamento de líquidos inflamáveis sob pressão, sendo capaz de gerar impactos térmicos severos, incêndios secundários e, em condições reais, projeção de fragmentos metálicos a longas distâncias. Embora o ALOHA apresente limitações importantes, como a impossibilidade de modelar a trajetória, massa e alcance dos fragmentos projetados, o software permite estimar com adequada confiabilidade as zonas de radiação térmica e a extensão dos efeitos térmicos associados ao evento, fornecendo informações relevantes para uma análise preliminar de severidade.

A adoção desse cenário também se justifica pela sua representatividade em instalações industriais brasileiras, que frequentemente utilizam tanques pressurizados contendo gases inflamáveis. Adicionalmente, a simulação utilizou dados meteorológicos compatíveis com condições típicas do município de Poços de Caldas, buscando maior aderência ao comportamento esperado para a região, ainda que se reconheça que o relevo acidentado local possa gerar diferenças em relação ao comportamento real de dispersão e propagação térmica.

6.2.3 BLEVE

O BLEVE é um dos acidentes mais catastróficos envolvendo substâncias inflamáveis armazenadas sob pressão. O fenômeno ocorre quando um recipiente contendo líquido pressurizado é exposto a uma fonte de calor, levando o líquido a entrar em ebulição rápida. Quando a integridade do tanque é comprometida, há liberação súbita do conteúdo, com vaporização instantânea e formação de uma bola de fogo (fireball) caso o ambiente permita a ignição. A intensidade do evento

depende do volume de líquido envolvido, da temperatura e das condições atmosféricas.

Na simulação realizada com o ALOHA, foi considerado que 100% do conteúdo do tanque foi envolvido pela bola de fogo, gerando uma explosão térmica de grandes proporções. O resultado foi uma bola de fogo com raio de 323 jardas (cerca de 295 metros) e duração de 17 segundos, tempo suficiente para provocar queimaduras fatais, derretimento de estruturas metálicas e ignição de materiais combustíveis na área circundante.

As consequências do BLEVE extrapolam os limites físicos da explosão. A radiação térmica emitida pode provocar queimaduras de primeiro, segundo e até terceiro grau em pessoas expostas, mesmo a centenas de metros de distância. Além disso, fragmentos do tanque podem ser arremessados a grande velocidade, oferecendo risco mecânico severo. Os efeitos secundários incluem incêndios, danos a edificações, colapso de estruturas e até comprometimento de sistemas críticos como redes elétricas, abastecimento de água e telecomunicações. Em áreas urbanas densamente povoadas, como algumas regiões de Poços de Caldas, os impactos humanos e materiais seriam devastadores, justificando a relevância de estudos preventivos como o presente.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Resultados da simulação do acidente com o software ALOHA

A simulação realizada por meio do software ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) consistiu na modelagem de um acidente envolvendo BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion), considerando como substância envolvida o gás propano liquefeito. A simulação foi realizada considerando o cenário descrito na seção 6.2, incluindo o tanque de propano, suas condições operacionais e as características meteorológicas e de terreno da região. Esses parâmetros servem de base para a modelagem do BLEVE e a determinação das zonas de radiação térmica e seus impactos.

Diante de uma situação de falha estrutural crítica e aquecimento externo, o tanque foi considerado 100% envolvido na bola de fogo. A modelagem do ALOHA

gerou uma bola de fogo com diâmetro de 296 metros e duração térmica de 17 segundos. Com base nesse evento, o software calculou as zonas de ameaça térmica de acordo com a intensidade da radiação recebida (kW/m^2), que são classificadas conforme os efeitos esperados na saúde humana:

- Zona vermelha: exposição a mais de $10,0 \text{ kW}/\text{m}^2$, considerada potencialmente letal para seres humanos expostos por até 60 segundos. Essa zona alcançou um raio de 634 metros a partir do centro da explosão.
- Zona laranja: exposição entre $5,0$ e $10,0 \text{ kW}/\text{m}^2$, com capacidade de causar queimaduras de segundo grau com poucos segundos de exposição. Estendeu-se até 895 metros de raio.
- Zona amarela: exposição entre $2,0$ e $5,0 \text{ kW}/\text{m}^2$, gerando dor intensa e queimaduras superficiais, com um raio final de 1.400 metros (1,4 km).

O gráfico gerado pelo ALOHA apresenta essas zonas em forma de anéis concêntricos, partindo do ponto de explosão, com propagação praticamente esférica. Embora o modelo assumira uma dispersão simétrica da radiação térmica, na prática essa propagação pode ser afetada por barreiras físicas, irregularidades do terreno, variações de umidade e direção do vento, fatores que devem ser considerados em uma análise mais aprofundada.

Figura 2 – Dados para simulação no software ALOHA.

SITE DATA:

Location: POÇOS DE CALDAS, BRASIL
 Building Air Exchanges Per Hour: 1.34 (sheltered single storied)
 Time: May 5, 2025 1500 hours ST (user specified)

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: PROPANE
 CAS Number: 74-98-6 Molecular Weight: 44.10 g/mol
 AEGL-1 (60 min): 5500 ppm AEGL-2 (60 min): 17000 ppm AEGL-3 (60 min): 33000 ppm
 IDLH: 2100 ppm LEL: 21000 ppm UEL: 95000 ppm
 Ambient Boiling Point: -49.5° F
 Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
 Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 9 meters/second from ESE at 3 meters
 Ground Roughness: urban or forest Cloud Cover: 7 tenths
 Air Temperature: 24° C Stability Class: D
 No Inversion Height Relative Humidity: 80%

SOURCE STRENGTH:

BLEVE of flammable liquid in vertical cylindrical tank
 Tank Diameter: 8.00 meters Tank Length: 6.96 meters
 Tank Volume: 350 cubic meters
 Tank contains liquid
 Internal Storage Temperature: 40° C
 Chemical Mass in Tank: 132,414 kilograms
 Tank is 80% full
 Percentage of Tank Mass in Fireball: 100%
 Fireball Diameter: 323 yards Burn Duration: 17 seconds

THREAT ZONE:

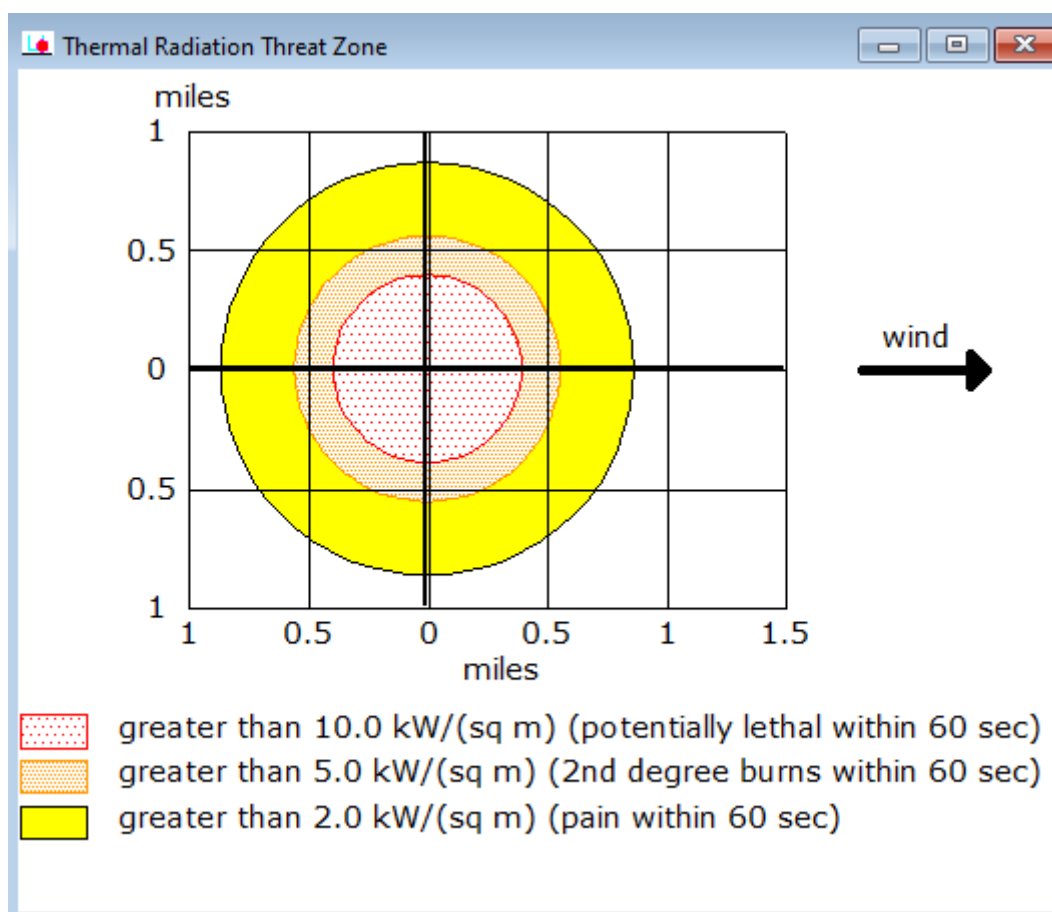
Threat Modeled: Thermal radiation from fireball
 Red : 693 yards --- (10.0 kW/(sq m) = potentially lethal within 60 sec)
 Orange: 978 yards --- (5.0 kW/(sq m) = 2nd degree burns within 60 sec)
 Yellow: 1523 yards --- (2.0 kW/(sq m) = pain within 60 sec)

THREAT AT POINT:

Thermal Radiation Estimates at the point:
 Downwind: 1.45 miles Off Centerline: 1.53 miles
 Max Thermal Radiation: 0.306 kW/(sq m)

Fonte: O autor (2025), com base em simulação computacional no ALOHA.

Figura 3 - Zonas de ameaça térmicas simuladas pelo ALOHA.

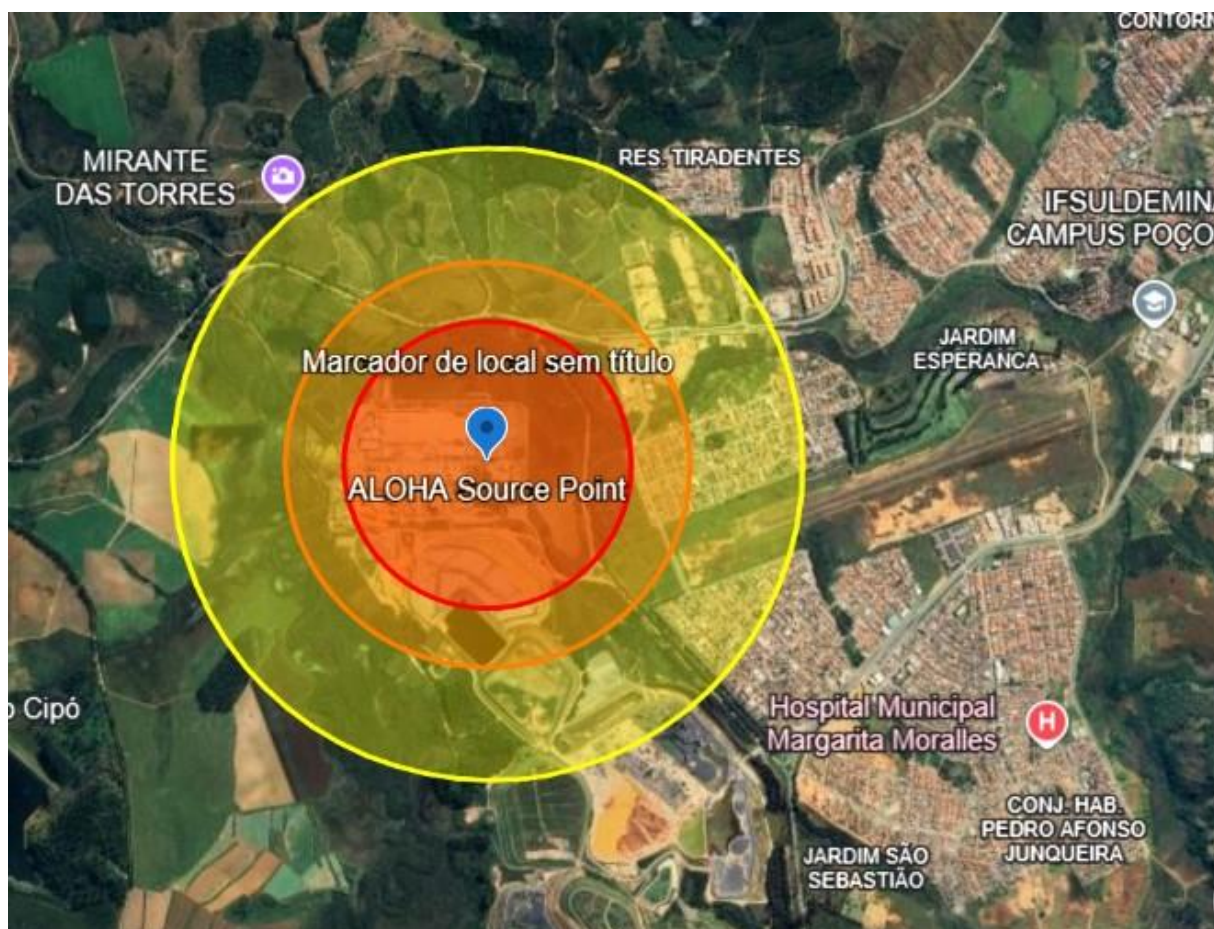


Fonte: O autor (2025), com base em simulação computacional no ALOHA

A extensão da zona amarela, que representa um raio de 1,4 km, evidencia o potencial de um BLEVE em comprometer áreas urbanas inteiras. Essa zona de impacto engloba não apenas os riscos físicos, mas também representa um alerta real à segurança de populações urbanas situadas em proximidade com instalações industriais que armazenam líquidos pressurizados inflamáveis. A simulação evidencia a importância de manter zonas de segurança (zonas de amortecimento), com limites mínimos entre áreas residenciais e áreas industriais, conforme orientações técnicas nacionais e internacionais.

Além disso, a visualização gráfica da ameaça térmica auxilia na tomada de decisões estratégicas, como definição de rotas de evacuação, localização de abrigos de emergência e dimensionamento das equipes de resposta. Esses dados podem ser integrados a mapas reais via exportação do arquivo KML gerado pelo ALOHA, permitindo sobreposição em softwares como o Google Earth, o que amplia ainda mais a capacidade de resposta e planejamento urbano.

Figura 4 - Zonas de ameaça térmicas integradas a mapas reais.



Fonte: O autor (2025), integração a mapas reais.

7.2 Impactos Gerais do Acidente Simulado

A ocorrência de um BLEVE envolvendo propano, como simulada neste trabalho, é um dos eventos mais perigosos que podem ocorrer em instalações industriais com armazenamento de gases liquefeitos sob pressão. Os impactos dessa explosão não se restringem ao local do acidente, mas se estendem em múltiplas esferas: humanas, ambientais, patrimoniais, sociais e econômicas.

Do ponto de vista humano, os danos mais graves concentram-se nas zonas vermelha e laranja, onde as pessoas expostas podem sofrer queimaduras fatais, de segundo e terceiro grau, ou mesmo morrer em poucos segundos em razão da radiação térmica intensa. A zona amarela, que alcança 1,4 km de raio, atinge áreas habitadas e implica risco de lesões térmicas leves, pânico generalizado e problemas

respiratórios em função da inalação de gases quentes. Pessoas com limitações de mobilidade, idosos e crianças estão entre os grupos mais vulneráveis.

No âmbito ambiental, a energia térmica gerada pela explosão pode causar incêndios secundários em áreas verdes, depósitos e edificações próximas. A queima de materiais orgânicos e inorgânicos libera substâncias tóxicas para a atmosfera, como CO, CO₂, NO_x, aldeídos e partículas finas, que contribuem para a poluição do ar e trazem riscos à saúde humana e animal. O calor também pode causar a degradação do solo, perda da microbiota e contaminação de águas superficiais e subterrâneas por fuligem e resíduos da combustão.

Os danos materiais são igualmente expressivos. O colapso estrutural de edificações, destruição de veículos, sistemas elétricos, redes de abastecimento e estruturas metálicas próximas são prováveis em um raio de até 900 metros. Fragmentos do tanque podem ser lançados a grande distância, causando danos mecânicos severos e agravando o cenário de destruição. A interrupção de serviços essenciais pode afetar o funcionamento de hospitais, escolas e comércios, elevando os custos e a complexidade da resposta ao acidente.

No aspecto social, a evacuação de áreas atingidas torna-se inevitável, impactando diretamente a mobilidade urbana, a segurança pública e a rotina da população local. Além disso, o trauma psicológico coletivo gerado por explosões e incêndios em larga escala pode deixar sequelas emocionais duradouras, exigindo suporte psicossocial contínuo. O pânico e a desinformação também agravam o risco de acidentes secundários durante tentativas de fuga desorganizadas.

Por fim, os impactos econômicos abrangem gastos emergenciais com atendimento médico, mobilização de defesa civil e corpo de bombeiros, reconstrução de áreas danificadas e indenizações por perdas humanas e materiais. Também se destacam os prejuízos indiretos, como paralisação de atividades produtivas, desvalorização imobiliária nas redondezas e abalo na imagem pública da cidade, especialmente em municípios com perfil turístico, como é o caso de Poços de Caldas.

Dessa forma, a simulação reforça a importância da prevenção de acidentes industriais por meio de planejamento urbano estratégico, normas de segurança robustas e capacitação técnica contínua. Ferramentas como o ALOHA, quando

integradas a sistemas de informação geográfica e políticas públicas de proteção civil, tornam-se instrumentos valiosos para reduzir os danos e salvar vidas.

7.3 Medidas de mitigação recomendadas

A partir dos cenários simulados, é possível propor um conjunto de medidas de mitigação capazes de reduzir tanto a severidade quanto a probabilidade de ocorrência de acidentes envolvendo propano. Entre as ações recomendadas, destacam-se:

- Instalação de barreiras físicas de contenção, capazes de reduzir a propagação de ondas térmicas e direcionar jatos de fogo em cenários de ignição;
- Uso de sistemas de resfriamento externo (deluge), especialmente em tanques sujeitos a aquecimento externo, reduzindo o risco de BLEVE;
- Definição de zonas de segurança conforme a NR-20, garantindo distanciamento adequado de trabalhadores, instalações e áreas públicas;
- Monitoramento contínuo e detecção automática de vazamentos;
- Inspeções periódicas e manutenção preventiva com foco em integridade mecânica e sistemas de alívio;
- Treinamento contínuo de equipes operacionais e fortalecimento da cultura de segurança.

Essas medidas contribuem para minimizar danos humanos, estruturais e ambientais, reforçando a importância do gerenciamento de riscos alinhado às melhores práticas da engenharia e às normas regulamentadoras vigentes.

8 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar a prevenção de riscos ambientais e tecnológicos por meio da simulação computacional de um acidente químico-industrial utilizando o software ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres). A partir da modelagem de um cenário realista situado na cidade de Poços de Caldas – MG, envolvendo a simulação de um BLEVE com gás propano, foi possível compreender de forma prática e técnica os possíveis desdobramentos de acidentes ampliados que envolvem substâncias perigosas em ambientes urbanos.

Os resultados demonstraram que um evento dessa natureza pode atingir áreas em um raio aproximado de 1,4 km, afetando diretamente a população, a infraestrutura urbana e o meio ambiente. A bola de fogo simulada permitiu identificar zonas de radiação térmica e quantificar danos potenciais a pessoas, estruturas e sistemas urbanos. A análise também reforça que, embora o ALOHA permita estimar com clareza a severidade das consequências, o software não calcula frequência de ocorrência, sendo, portanto, uma ferramenta apropriada para análises preliminares, mas que deve ser complementada em estudos de risco completos.

Apesar de sua relevância prática, o ALOHA apresenta limitações importantes: não modela a projeção de fragmentos metálicos gerados em um BLEVE, assume terreno plano — o que pode gerar desvios nos resultados quando aplicado a regiões de relevo acidentado, como Poços de Caldas — e não considera efeitos mecânicos associados à ruptura do tanque. Ainda assim, mostrou-se extremamente útil para visualizar zonas de impacto térmico e apoiar o planejamento de medidas de mitigação, reforçando seu valor como ferramenta de apoio à tomada de decisão dentro dos requisitos das Normas Regulamentadoras, como NR-01 (PGR/GRO) e NR-20.

Além de seu valor técnico, o estudo demonstrou o potencial do ALOHA como ferramenta educacional, auxiliando na formação de engenheiros, técnicos e gestores ao permitir a compreensão aplicada de conceitos como perigo, risco, cenários acidentais e estratégias de prevenção. A simulação contribuiu para consolidar conhecimentos sobre análise de riscos, planejamento emergencial e avaliação de consequências, reforçando seu papel pedagógico no ensino de segurança de processos e tecnologia de prevenção de acidentes.

Os resultados apontam também para a necessidade de uma cultura de segurança mais proativa, baseada na antecipação de riscos, na atualização contínua das análises e na incorporação de tecnologias que aprimorem o gerenciamento de processos perigosos. A interpretação das zonas de impacto simuladas evidencia a importância de medidas de mitigação, tais como barreiras físicas, distanciamentos adequados, planos de emergência bem estruturados, sistemas de monitoramento e treinamento periódico das equipes operacionais.

Conclui-se, portanto, que a modelagem das consequências realizada fornece uma base técnica sólida para a compreensão dos riscos associados ao armazenamento de GLP e demonstra o papel estratégico da simulação computacional no fortalecimento da segurança industrial, da saúde humana e da proteção ambiental. Recomenda-se que estudos futuros integrem o ALOHA a plataformas GIS, considerem diferentes substâncias e múltiplos cenários acidentais, ampliem a análise para incluir variáveis populacionais e socioeconômicas e explorem ferramentas complementares que permitam avaliar também a probabilidade dos eventos, enriquecendo o planejamento emergencial e contribuindo para a resiliência das comunidades expostas a riscos tecnológicos.

REFERÊNCIAS

CROWL, Daniel A.; LOUVAR, Joseph F. *Chemical process safety: fundamentals with applications*. 3. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2011.

EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *ALOHA User's Manual*. United States Environmental Protection Agency, 2019. Disponível em: <https://www.epa.gov/cameo/aloha-software>. Acesso em: 27 set. 2024.

ANDRÉ, Nilton Baptista Mangovo. PREVENÇÃO DE RISCOS AMBIENTAIS ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO DE UM ACIDENTE INDUSTRIAL, UTILIZANDO O SOFTWARE (ALOHA).

FREITAS, Bianca Lucinari; ALBINI, Kathleen Fioramonte. Análise de vulnerabilidade de armazenamento de nafta utilizando o software ALOHA. 2023.

INMET. Normais Climatológicas do Brasil (1991–2020). Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 05 mai. 2025.

WEATHERSPARK. Clima e tempo médio em Poços de Caldas, Brasil. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/147728/Clima-característico-em-Po%C3%A7os-de-Caldas-Brasil-durante-todo-o-ano>. Acesso em: 05 mai. 2025.

ARAUJO, Diego Paulino de. Simulação e avaliação de riscos quantitativos de processos na indústria de óleo e gás e definição de critérios para emergências. 2024.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Toxic Release Inventory (TRI) Program: TRI National Analysis Overview*. 2020. Disponível em: <https://www.epa.gov/trinationalanalysis>. Acesso em: 30 set. 2024.

BHOPAL MEDICAL APPEAL. *The Bhopal Disaster: What Happened?* Disponível em: <https://www.bhopal.org>. Acesso em: 10 mar. 2025.

BRITANNICA. *Bhopal disaster | Causes, Effects, Facts, & History*. Disponível em: <https://www.britannica.com/event/Bhopal-disaster>. Acesso em: 14 mar. 2025.

INTERNATIONAL CAMPAIGN FOR JUSTICE IN BHOPAL. *Bhopal: The World's Worst Industrial Disaster*. Disponível em: <https://www.bhopal.net>. Acesso em: 10 abr. 2025.

MURTHY, R. Srinivasa. *Mental health of survivors of 1984 Bhopal disaster: A continuing challenge*. *Industrial psychiatry journal*, v. 23, n. 2, p. 86-93, 2014.

CULLINAN, P.; ACQUILLA, S.; DHARA, V. Ramana. *Respiratory morbidity 10 years after the Union Carbide gas leak at Bhopal: a cross sectional survey*. *Bmj*, v. 314, n. 7077, p. 338, 1997.

Série SmartLab de Trabalho Decente 2023: Mortalidade no trabalho cresce em 2022 e acidentes notificados ao SUS batem recorde. Disponível em: https://www.ilo.org/pt-pt/resource/news/serie-smartlab-de-trabalho-decente-2023-mortalidade-no-trabalho-cresce-em?utm_source. Acesso em: 10 fev. 2025.

Segurança e Saúde no Trabalho. Disponível em: https://www.ilo.org/pt-pt/resource/seguranca-e-saude-no-trabalho?utm_source=. Acesso em: 18 fev. 2025.

EM, A. *Ato em Cubatão lembra 40 anos do incêndio da Vila Socó.* Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2024-02/ato-em-cubatao-lembra-40-anos-do-incendio-da-vila-soco>. Acesso em: 29 mar. 2025.

DE, Sajal; BANERJEE, Nalok; SABDE, Yogesh. *Respiratory morbidities and lung function abnormalities in survivors of Bhopal Gas Disaster: A cross-sectional study.* Respiratory Investigation, v. 60, n. 2, p. 284-292, 2022.

DELLAGNEZZE, René. *40 ANOS DO ACIDENTE DE BHOPAL (ÍNDIA)-OUTROS ACIDENTES E SEGURANÇA E MEDICINA DO TRABALHO (SMT).* Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, p. 09-780, 2024.

Acidentes de trabalho e mortes acidentais crescem no Brasil em 2021. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2022/04/1787092>. Acesso em: 15 out. 2024.

BRASIL. Fundacentro. *Acidente de Bhopal faz 30 anos.* 2014. Disponível em: <https://www.gov.br/fundacentro/pt-r/comunicacao/noticias/noticias/2014/12/acidente-de-bhopal-faz-30-anos>. Acesso em: 21 out. 2024.

LINO, Carina Rodrigues Garcia; PACHECO-FERREIRA, Heloísa. *O impacto psicológico de um acidente químico ambiental com óleo diesel.* Revista de Saúde Pública, v. 54, p. 1-7, 2020. Disponível em: https://www.scielo.br/j/pe/a/5F74V3jrKdHjF6X8Sty7tRQ/?utm_source. Acesso em: 04 nov. 2024.

DEMIJEN, G. et al. *A study on the psychological and social impacts of the Bhopal disaster on survivors.* PMC, 2023. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10335451/>. Acesso em: 19 mar. 2025.

CETESB. *Bhopal: O desastre e suas lições.* 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/analise-risco-tecnologico/grandes-acidentes/bhopal/>. Acesso em: 12 abr. 2025.

BRITANNICA. *Bhopal disaster.* 2021. Disponível em: <https://www.britannica.com/event/Bhopal-disaster>. Acesso em: 05 abr. 2025.

JERÔNIMO, Aliciane Patrícia et al. *Acidente Ambiental - Ordenamento Jurídico Ambiental: Estudo de Caso: Vila Socó – Cubatão - SP.* São Paulo, 2017. Acesso em: 23 fev. 2025.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. *NR 9 - Programa de Prevenção de Riscos Ambientais*. Disponível em: <https://www.gov.br/mte/pt-br/assuntos/normas-regulamentadoras>. Acesso em: 06 abr. 2025.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. *NR 20 - Segurança e Saúde no Trabalho com Inflamáveis e Combustíveis*. Disponível em: <https://www.gov.br/mte/pt-br/assuntos/normas-regulamentadoras>. Acesso em: 06 abr. 2025.

KOLLURU, R. S. *Process Safety and Risk Management*. Boston: Butterworth-Heinemann, 1996.

SANDERS, M. S.; McCORMICK, E. J. *Human Factors in Engineering and Design*. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 1993.

SHINAR, D.; GURION, R.; FLASCHER, H. *Human Factors in Traffic Safety*. In: HENRY, J. (Ed.). *Human Factors in Traffic Safety*. New York: Plenum Press, 1991. p. 1095.