

GUSTAVO PERON MENDES E SILVA

**METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE RISCO DE PROCESSOS  
APLICADAS NO ÂMBITO DA INDÚSTRIA AGROALIMENTÍCIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S586m  
2018  
Silva, Gustavo Peron Mendes e, 1993-  
Metodologias de análise de risco de processos aplicadas no  
âmbito da indústria agroalimentícia / Gustavo Peron Mendes e  
Silva. – Viçosa, MG, 2018.  
xii, 118 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexo.

Inclui apêndices.

Orientador: Fábio de Ávila Rodrigues.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 74-82.

1. Agroindústria de processamento - Regulamentos de  
segurança. 2. Produtos químicos - Medidas de segurança.  
3. Avaliação de riscos. 4. Avaliação de riscos de saúde.  
5. Dispersão. 6. ALOHA (Software). I. Universidade Federal de  
Viçosa. Departamento de Química. Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Química. II. Título.

CDD 22. ed. 363.179

GUSTAVO PERON MENDES E SILVA

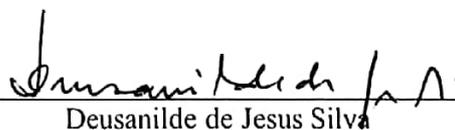
**METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE RISCO DE PROCESSOS  
APLICADAS NO ÂMBITO DA INDÚSTRIA AGROALIMENTÍCIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

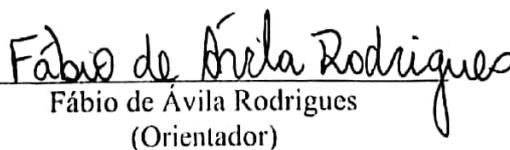
APROVADA: 26 de abril de 2018.



Aéciana Ferreira de Faria



Deusanilde de Jesus Silva



Fábio de Ávila Rodrigues  
(Orientador)

*“The saddest aspect of life right now  
is that science gathers knowledge  
faster than society gathers wisdom.”*

- Isaac Asimov

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, ELE que me forneceu a capacidade, as oportunidades e a determinação para chegar até aqui.

Agradeço à minha família, que sempre esteve ao meu lado não me deixando desistir, mesmo quando essa parecia a única opção plausível.

Agradeço principalmente à minha mãe, que até hoje constantemente me lembra que se eu posso e se eu quero, eu consigo.

Agradeço ao meu orientador, Fábio, e ao meu coorientador, Geraldo, por me guiarem com maestria por todo este trabalho.

Agradeço ao meu namorado, Issa, por garantir que eu passasse por essa jornada com sanidade mental, bem alimentado e muito amado.

Agradeço aos amigos da vida, que nunca estiveram longe, mesmo estando distantes.

Agradeço aos novos amigos de Viçosa e de Uberlândia, que fizeram eu me sentir em casa, mesmo muito longe dela.

Agradeço à Cargill, que me permitiu realizar todo o meu trabalho nas instalações da empresa e possibilitou a realização de todas as atividades inerentes ao programa de Mestrado.

Agradeço a toda uma nova geração de professores que conheci nestes dois últimos anos de pós-graduação. Vocês são minha esperança de uma renovação e de que não precisamos ser como nossos pais (e mestres).

Agradeço por último a todas aquelas pessoas que persistem em fazer ciência no nosso país, mesmo com todos os retrocessos e a desvalorização dos profissionais. Nós somos o futuro do Brasil.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Dispersão de gases - (a) Gás neutro; (b) Gás denso; (c) Liberação contínua; (d) Liberação instantânea.....	25
<b>Figura 2:</b> Composição do milho conforme seus quatro componentes principais. ....	31
<b>Figura 3:</b> Processo de moagem de milho por via úmida.....	32
<b>Figura 4:</b> Alimentação de SO <sub>2</sub> ao sistema de maceração.....	37
<b>Figura 5:</b> Fluxo de trabalho do estudo de PRA.....	42
<b>Figura 6:</b> Modelo genérico de matriz de risco para cenários de PRA. ....	48
<b>Figura 7:</b> Distribuição gaussiana (esquerda) e propagação gaussiana (direita). ....	53
<b>Figura 8:</b> Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo do cilindro pelo garfo da empilhadeira em condições de dia e verão.....	109
<b>Figura 9:</b> Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo do cilindro pelo garfo da empilhadeira em condições de dia e inverno. ....	109
<b>Figura 10:</b> Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo do cilindro pelo garfo da empilhadeira em condições de noite e verão.....	110
<b>Figura 11:</b> Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo do cilindro pelo garfo da empilhadeira em condições de noite e inverno. ....	110
<b>Figura 12:</b> Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo parcial (20%) no mangote flexível de ½” em condições de dia e verão. ....	110
<b>Figura 13:</b> Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo parcial (20%) no mangote flexível de ½” em condições de dia e inverno. ....	111
<b>Figura 14:</b> Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo parcial (20%) no mangote flexível de ½” em condições de noite e verão. ....	111
<b>Figura 15:</b> Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo parcial (20%) no mangote flexível de ½” em condições de noite e inverno.....	111
<b>Figura 16:</b> Distância e a largura das nuvens para a hipótese de rompimento do mangote flexível em condições de dia e verão.....	112
<b>Figura 17:</b> Distância e a largura das nuvens para a hipótese de rompimento do mangote flexível em condições de dia e inverno.....	112
<b>Figura 18:</b> Distância e a largura das nuvens para a hipótese de rompimento do mangote flexível em condições de noite e verão.....	112
<b>Figura 19:</b> Distância e a largura das nuvens para a hipótese de rompimento do mangote flexível em condições de noite e inverno. ....	113
<b>Figura 20:</b> Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo parcial (20%) na tubulação de 1” em condições de dia e verão. ....	113
<b>Figura 21:</b> Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo parcial (20%) na tubulação de 1” em condições de dia e inverno.....	113
<b>Figura 22:</b> Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo parcial (20%) na tubulação de 1” em condições de noite e verão.....	114
<b>Figura 23:</b> Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo parcial (20%) na tubulação de 1” em condições de noite e inverno. ....	114
<b>Figura 24:</b> Distância e a largura das nuvens para a hipótese de rompimento da tubulação em condições de dia e verão. ....	114

<b>Figura 25:</b> Distância e a largura das nuvens para a hipótese de rompimento da tubulação em condições de dia e inverno. ....	115
<b>Figura 26:</b> Distância e a largura das nuvens para a hipótese de rompimento da tubulação em condições de noite e verão. ....	115
<b>Figura 27:</b> Distância e a largura das nuvens para a hipótese de rompimento da tubulação em condições de noite e inverno. ....	115

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Piores acidentes ocorridos na história da humanidade.....	11
<b>Tabela 2:</b> Propriedades do dióxido de enxofre.....	34
<b>Tabela 3:</b> Valores de LOC para o dióxido de enxofre. ....	35
<b>Tabela 4:</b> Nós definidos para estudo de PRA do sistema de SO <sub>2</sub> . ....	44
<b>Tabela 5:</b> Desvios definidos para metodologia de <i>What-If / Checklist</i> . ....	45
<b>Tabela 6:</b> Frequências típicas para eventos iniciadores. ....	47
<b>Tabela 7:</b> Exemplos de salvaguardas válidas. ....	49
<b>Tabela 8:</b> Exemplos de salvaguardas não consideradas válidas. ....	50
<b>Tabela 9:</b> Descrição das hipóteses de modelagem de dispersão de nuvem de vapor. ....	59
<b>Tabela 10:</b> Dados meteorológicos utilizados para configuração do <i>software</i> ALOHA. ....	60
<b>Tabela 11:</b> Propriedades do sistema de SO <sub>2</sub> para modelagem no <i>software</i> ALOHA. ....	61
<b>Tabela 12:</b> Distâncias alcançadas pela nuvem de dióxido de enxofre e quantidades liberadas. ....	63
<b>Tabela 13:</b> Recomendações geradas por meio da análise de risco do processo.....	68
<b>Tabela 14:</b> Análise de risco do processo de dióxido de enxofre. ....	85

## LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ABIQUIM	Associação Brasileira da Indústria Química
AEGL	<i>Acute Exposure Guideline Levels</i> (Níveis de orientação de exposição aguda)
ALOHA	<i>Areal Location Of Hazardous Atmospheres</i>
BPCS	<i>Basic Process Control System</i> (Sistema de Controle Básico de Processo)
CCPS	<i>Center for Chemical and Process Safety</i>
CEPPO	<i>Chemical Emergency Preparedness and Prevention Office</i> (Gabinete de Prevenção e Preparo para Emergências Químicas dos Estados Unidos da América)
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Fluidodinâmica Computacional)
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i> (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América)
EPI	Equipamento de Proteção Individual
ERPG	<i>Emergency Response Planning Guidelines</i> (Diretrizes de planejamento de resposta de emergência)
ETA	<i>Event Tree Analysis</i> (Análise de Árvore de Eventos)
FISPQ	Ficha Individual de Segurança de Produto Químico
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i> (Análise do Modo de Falha e seus Efeitos)
FTA	<i>Failure Tree Analysis</i> (Análise de Árvore de Falhas)
HAZOP	<i>Hazard and Operability Study</i> (Estudo de Perigos e Operabilidade)
HDPE	<i>High Density Polyethylene</i> (Polietileno de alta densidade)
IDLH	<i>Immediately Dangerous to Life or Health</i> (Imediatamente perigoso para vida ou saúde)
LOC	<i>Level of Concern</i> (Nível Tóxico de Preocupação)
LOPA	<i>Layers of Protection Analysis</i> (Análise de Camadas de Proteção)
LoPC	<i>Loss of Primary Containment</i> (Perda de Contenção Primária)
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
MIC	<i>Methyl isocyanate</i> (Isocianato de metila)
NIOSH	<i>National Institute of Occupational Safety and Health</i> (Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional)
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> (Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos da América)
P&ID	<i>Piping and Instrumentation Diagram</i> (Diagrama de Tubulações e Instrumentação)
PFD	<i>Process Flow Diagram</i> (Diagrama de Fluxo de Processo)
PRA	<i>Process Risk Assessment</i> (Avaliação de Risco do Processo)
QRA	<i>Quantitative Risk Analysis</i> (Análise Quantitativa de Riscos)
SWIFT	<i>Structured What-If Technique</i>
TCDD	2,3,7,8-tetraclorodibenzoparadioxina
TNT	Trinitrotolueno

## LISTA DE FÓRMULAS E SÍMBOLOS

%	Porcentagem
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Sulfito de amônio
cm	Centímetros
$\text{CO}_2$	Dióxido de carbono
h	Horas
H	Altura de liberação efetiva (em relação à terra) em metros
$\text{K}_2\text{SO}_3$	Sulfito de potássio
kg	Quilograma
kg/dia	Vazão mássica em quilogramas por dia
$\text{kgf/cm}^2$	Pressão medida em quilogramas-força por centímetro quadrado
kPa	Pressão em quilo Pascals
m	Metros
m/s	Metros por segundo
$\text{m}^3$	Volume medido em metros cúbicos
mg	Miligramas
$\text{mg/m}^3$	Concentração em miligramas por metro cúbico
mL	Volume em mililitros
mm	Milímetros
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$	Metabissulfito de sódio
$\text{Na}_2\text{SO}_3$	Sulfito de sódio
$^\circ\text{C}$	Graus Celsius
pH	Potencial hidrogeniônico
ppm	Concentração em partes por milhão
Q	Taxa de liberação da fonte (mg/s) para liberações químicas
s	Segundos
$\text{SO}_2$	Dióxido de enxofre
u	Velocidade média do vento (m/s)
x	Distância do vento (em relação à localização da fonte) em metros
y	Distância do contravento (em relação à linha central da pluma) em metros
z	Distância do eixo vertical (em relação à terra) em metros
$\pi$	Proporção numérica definida pela relação entre o perímetro de uma circunferência e seu diâmetro, onde $\text{Pi} = 3,14159265359$
$\sigma_y$	Coefficiente de dispersão horizontal (função de x), representando o desvio padrão da distribuição da concentração na direção do eixo do contravento, em metros
$\sigma_z$	Coefficiente de dispersão vertical (função de x), representando o desvio padrão da distribuição da concentração na direção do eixo vertical, em metros
$\chi$	Concentração atmosférica ( $\text{mg/m}^3$ ) para lançamentos químicos

## RESUMO

MENDES-SILVA, Gustavo Peron, MSc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2018. **Metodologias de Análise de Risco de Processos Aplicadas no Âmbito da Indústria Agroalimentícia**. Orientador: Fábio de Ávila Rodrigues. Coorientador: Geraldo André Thurler Fontoura.

Os acidentes de Segurança de Processos podem ter impactos catastróficos, causando múltiplas lesões ou fatalidades, grandes danos econômicos, imobiliários e ambientais e podem afetar o público fora das instalações de fabricação. Diante disso, as Análises de Risco de Processo (PRA) usam uma abordagem de avaliação organizada e metódica para alcançar um consenso multidisciplinar sobre a identificação e o controle dos riscos, com documentação dos resultados da avaliação para uso futuro na gestão de mudanças, planejamento de emergência e treinamento do pessoal envolvido na operação e manutenção do processo. Estes estudos são necessários para atendimento de requisitos legais e obtenção de licença para a operação da unidade. Como forma de se estudar a aplicação de metodologias de análise de risco no âmbito da Segurança de Processos para processos químicos, este estudo utilizou a metodologia de *What-If/Checklist* para a identificação dos riscos existentes na operação com dióxido de enxofre proveniente do processo de moagem de milho por via úmida da unidade produtiva da Cargill Agrícola localizada na cidade de Uberlândia, Minas Gerais. Foi utilizada uma ferramenta de modelagem de dispersão de nuvem de vapor para estimativa de consequências destes cenários de risco. Esta substância tóxica foi escolhida devido à grande quantidade na qual é armazenada, representando uma ameaça à segurança de pessoas. A análise de risco identificou 22 cenários que possuem um alto risco, 18 cenários que possuem um risco médio, e nenhum cenário que possui risco baixo. A modelagem de consequências realizada por meio do *software* ALOHA mostrou que todas as liberações de produto em grande escala possuem potencial de atingir áreas dentro e fora da unidade industrial. A partir da avaliação das salvaguardas existentes, foram apresentadas 23 recomendações de novas medidas de segurança para garantir a eliminação, a redução e o controle destes riscos. A quantificação dos riscos para cada cenário irá auxiliar na priorização de investimentos para cada controle e mitigação dos riscos identificados.

## ABSTRACT

MENDES-SILVA, Gustavo Peron, MSc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2018. **Process Risk Analysis Methodologies Applied for the Agro-Food Industry**. Adviser: Fábio de Ávila Rodrigues. Co-adviser: Geraldo André Thurler Fontoura.

Process Safety incidents can have catastrophic impacts, causing multiple injuries or fatalities, major economic, real estate and environmental damage and may affect the public outside of the processing facilities. Thus, Process Risk Analysis (PRA) uses an organized and methodical assessment approach to achieve a multidisciplinary consensus on risk identification and control, generating registers of the evaluation results for future use in change management, emergency planning and training of personnel involved in the process operation and maintenance. These studies are mandatory for complying with legal requirements and obtaining the unit's operational license. As a way of studying the application of risk analysis methodologies under the Process Safety for chemical processes, this study used the What-If / Checklist methodology to identify risks existing in the operations with sulphur dioxide on the wet corn milling process at the Cargill facility in Uberlandia, Minas Gerais. A vapour cloud dispersion modelling tool was applied to estimate the drawbacks of these risk scenarios. This toxic substance has been chosen because of the large amount in which it is stored, posing a threat to the safety of people. The risk analysis identified 22 scenarios with high risk, 18 scenarios with medium risk, and no scenario with low risk. The consequence modelling carried out through the ALOHA software showed that all large-scale releases have the potential to reach areas inside and outside the facility. Based on the evaluation of existing safeguards, 23 recommendations were presented for new safety measures to ensure the elimination, reduction and control of these risks. The assignment of risks to each scenario helps in the decision-making process and prioritization of investments to control and mitigate the identified risks.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
2.1	Segurança de Processos.....	6
2.2	A Segurança de Processos comparada com a Segurança Operacional .....	8
2.3	O risco da indústria química .....	9
2.4	Metodologias de Análise de Risco .....	14
2.4.1	<i>Checklist</i> .....	16
2.4.2	<i>What-If</i> .....	17
2.4.3	<i>What-If/ Checklist</i> .....	17
2.4.4	Estudo de Perigos e Operabilidade (HAZOP) .....	18
2.4.5	Análise do Modo de Falha e seus Efeitos (FMEA) .....	19
2.4.6	Análise de Árvore de Falhas (FTA).....	20
2.4.7	Análise de Camadas de Proteção (LOPA).....	21
2.5	Avaliação Quantitativa de Risco aplicada à liberação de produtos e materiais tóxicos.....	22
2.6	Toxicidade.....	28
<b>3</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>30</b>
3.1	Dióxido de Enxofre .....	34
3.2	Utilização de SO <sub>2</sub> na Cargill .....	36
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODO .....</b>	<b>40</b>
4.1	Avaliação de Risco do Processo .....	40
4.1.1	Identificação dos eventos iniciadores .....	45
4.1.2	Estimativa das consequências.....	46
4.1.3	Determinação do risco de cada cenário .....	48
4.1.4	Identificação e avaliação das salvaguardas.....	48
4.2	Avaliação Quantitativa de Riscos para estimativa das consequências.....	51
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>56</b>
5.1	Determinação dos eventos iniciadores .....	56
5.2	Estimativa das consequências .....	57
5.3	Determinação dos riscos não mitigados .....	66
5.4	Avaliação das salvaguardas existentes.....	66
5.5	Recomendações adicionais .....	67

<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>72</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>74</b>
<b>APÊNDICE 1 - TABELA DE ANÁLISE DE RISCO DO PROCESSO (PRA) .....</b>	<b>84</b>
<b>APÊNDICE 2 - RESULTADOS DE MODELAGEM NO <i>SOFTWARE</i> ALOHA .....</b>	<b>109</b>
<b>ANEXO 1 - AUTORIZAÇÃO PARA USO DE INFORMAÇÃO .....</b>	<b>117</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A humanidade sempre desenvolveu formas de tentar tornar a vida um pouco melhor ou mais fácil. Pode-se considerar que pessoas pré-históricas praticavam química começando com o uso do fogo para produzir mudanças químicas como queimar madeira, cozinhar alimentos e modelar cerâmica e tijolos (SANDERS, 2005).

A indústria química estava sendo formada à medida que a Revolução Industrial começou, mas, até o ano 1700, apenas 14 elementos químicos haviam sido identificados. Durante os anos 1800, os químicos descobriram cerca de metade dos 118 elementos conhecidos. Após 1850, produtos químicos orgânicos, como corantes de alcatrão de carvão, drogas, explosivos de nitroglicerina e plásticos foram desenvolvidos e fabricados. As duas guerras mundiais criaram necessidades de processos químicos novos e melhorados para munições, fibras, metais leves, borracha sintética e combustíveis. Nas décadas de 1950 e 1960, o processamento químico tornou-se cada vez mais sofisticado, com estoques maiores de produtos químicos corrosivos, tóxicos e inflamáveis, temperaturas mais altas e pressões mais elevadas (SANDERS, 2005).

À medida que a tecnologia dos processos químicos foi se tornando mais complexa, os engenheiros químicos passam a precisar de uma compreensão mais detalhada e fundamental da segurança envolvendo os processos industriais (CROW e LOUVAR, 2015). A falha em compreender essas questões podem ter severas consequências. Alguns acidentes históricos da indústria química mostram como as catástrofes foram importantes para aumentar a percepção da segurança como algo essencial para os processos químicos:

- **Flixborough, Reino Unido (1974):** a instalação da Nypro, em Flixborough, era responsável pela produção de ciclohexano. Devido à uma falha em um dos seis reatores em série do processo, foi necessário retirar este equipamento de operação e fazer uma interligação provisória entre os demais. Por uma falha de projeto, esta tubulação não suportou as condições de operação e rompeu, liberando cerca de 50 toneladas de ciclohexano a 150 °C, que se vaporizou e logo encontrou uma fonte de ignição. A planta foi severamente danificada por uma grande explosão da nuvem de vapor, que matou vinte e oito trabalhadores e deixou outros trinta e seis lesionados. O número de mortes teria sido maior se o evento não tivesse ocorrido em um final de semana, fazendo com que o bloco de

escritório principal não estivesse ocupado. As consequências causadas fora da fábrica resultaram em 53 feridos reportados. Apesar de nenhuma fatalidade ter sido reportada fora da planta, 1821 casas e 167 instalações comerciais ao redor da planta foram danificadas em níveis diversos (MARSH & MCLENNAN, 2014).

- **Seveso, Itália (1976):** nesta planta o produto era hexaclorofeno, um bactericida, com triclorofenol produzido como intermediário. Durante o funcionamento normal, uma pequena quantidade de TCDD (2,3,7,8-tetraclorodibenzoparadioxina) era produzida no reator como um produto secundário indesejável. O TCDD é talvez a toxina mais potente conhecida pelos humanos. As doses não letais de TCDD resultam em cloracne, uma doença semelhante a acne que pode persistir por vários anos. Em 10 de julho de 1976, o reator de triclorofenol saiu de controle, resultando em uma temperatura operacional mais alta do que a normal, aumentando a produção de TCDD. Estima-se que 2 kg de TCDD foram liberados através de um sistema de alívio de pressão em uma nuvem branca sobre Seveso. Uma chuva prolongada lavou o TCDD para o solo, causando a contaminação de aproximadamente 26 quilômetros quadrados. Por falta de comunicação com autoridades locais, a evacuação civil não foi iniciada até vários dias depois. Mais de 250 casos de cloracne foram relatados. A área mais contaminada imediatamente adjacente à planta foi cercada, condição em que permanece até hoje (CROW e LOUVAR, 2015).
- **Bhopal, Índia (1984):** a planta da Union Carbide localizada em Bhopal produzia pesticidas. Um composto intermediário neste processo é o isocianato de metila (MIC). O MIC é um composto extremamente perigoso, sendo reativo, tóxico, volátil e inflamável. O MIC apresenta uma série de propriedades físicas perigosas. Ele reage exotermicamente com água. Embora a taxa de reação seja lenta, com um resfriamento inadequado, a temperatura aumenta e o MIC entra em ebulição. Os tanques de armazenamento de MIC são geralmente refrigerados para evitar esse problema. A unidade que usava o MIC não estava operando devido a uma disputa trabalhista local. De alguma forma, um tanque de armazenamento contendo uma grande quantidade de MIC ficou contaminado com água ou alguma outra substância. Uma reação química aqueceu o MIC a

uma temperatura além de seu ponto de ebulição. Os vapores de MIC se deslocaram através de um sistema de alívio de pressão para um sistema lavador de gases e, em seguida, para um *flare* instalado para consumir o MIC em caso de liberação. Infelizmente, os sistemas de lavagem e resfriamento não estavam funcionando, por uma variedade de razões. Estima-se que 40 toneladas de vapor tóxico de MIC foram liberados. A nuvem tóxica se espalhou para a cidade de Bhopal, matando mais de dois mil civis e ferindo cerca de 20 mil mais. Nenhum trabalhador da planta foi ferido ou morto. Nenhum equipamento da planta foi danificado. Este acidente é considerado como o pior acidente industrial ocorrido em toda a história da indústria química (CCPS, 2014a).

- **Pasadena, Estados Unidos (1989):** neste acidente, um grande fluxo de etileno (o reagente) e isobutano (um transportador de catalisador) foi liberado de uma das unidades de polietileno de alta densidade (HDPE) no complexo químico da Phillips 66 Company, localizado na cidade de Pasadena. A liberação ocorreu durante uma atividade de manutenção em um dos reatores devido a um procedimento de bloqueio que não foi seguido corretamente. A nuvem de vapor flutuou para o norte em direção ao centro da área de processo de HDPE antes da ignição, que se acredita ter ocorrido aproximadamente 60 segundos após a liberação. Os dados do sismógrafo das estações de gravação na área sugeriram que a explosão foi equivalente à detonação de 10 toneladas de explosivo TNT. A explosão destruiu duas unidades de HDPE. A radiação térmica da explosão causou explosões de tanques de armazenamento pressurizados próximos ao local de liberação. Outras unidades de processo neste complexo químico sofreram apenas danos menores e retomaram a produção normal dentro de poucas semanas após o acidente (LEES, 1996c).

Todos esses acidentes tiveram um impacto significativo nas percepções do público e na profissão de Engenharia Química, acrescentando uma nova ênfase e novos padrões na prática de segurança, impulsionando o desenvolvimento da Segurança de Processos Químicos como área fundamental nos processos de manufatura. Mesmo assim, os acidentes continuam a acontecer, fazendo com que a identificação e avaliação dos riscos e o desenvolvimento de controle seja uma necessidade constante e, ainda, extremamente atual.

Considerando a importância de se conhecer os riscos dos processos químicos e os possíveis eventos que apresentam risco para pessoas e para o meio ambiente, esta pesquisa tem como objetivo geral apresentar e aplicar um protocolo de metodologias de análise de risco selecionadas para constituir um estudo consistente de Avaliação de Risco do Processo. Além disso, esta pesquisa permite trabalhar o tema da Segurança de Processos dentro do âmbito acadêmico da Pós-Graduação em Engenharia Química, aproximando a Universidade da Indústria, visto que este tema ainda é muito restrito ao ambiente industrial.

Este estudo foi utilizado na identificação dos riscos existentes na operação de um processo da indústria para apresentar propostas de engenharia para mitigação dos mesmos. O desenvolvimento deste trabalho é de interesse da empresa pois compõe o portfólio de análises de risco que precisam ser realizadas para atendimento de requisitos legais e licenciamento ambiental e de operação. Além disso, o produto escolhido como objeto de estudo nesta pesquisa é utilizado apenas pela unidade da empresa no Brasil, não possuindo nenhuma referência de estudos feitos em processos similares em outras unidades da empresa ao redor do mundo.

Por fim, este estudo tem como objetivos específicos:

1. contribuir para o entendimento da aplicação, de forma estruturada, de diversas metodologias independentes de análise de risco em um estudo único de análise de risco do processo;
2. utilizar metodologias de análise de risco aplicadas a um caso real da indústria agro alimentícia de forma a identificar e avaliar os riscos de operação da unidade;
3. utilizar ferramentas de simulação de consequências para avaliar o impacto da liberação de materiais perigosos a partir da determinação dos cenários de risco;  
e
4. desenvolver recomendações de salvaguardas para redução do risco identificado ou mitigação das possíveis consequências dos cenários de risco.

Este trabalho está organizado em sete capítulos diferentes: Introdução, onde foi feita a contextualização do tema e apresentação de objetivos; Revisão Bibliográfica, onde foi realizado um levantamento das informações relevantes que serviram de base para a elaboração desta pesquisa; Estudo de Caso, onde foram apresentadas informações sobre a empresa e sobre o processo escolhido; Materiais e Métodos, onde foi

desenvolvida a metodologia aplicada; Resultados e Discussão, onde foram discutidos os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia definida; Conclusão, onde se apresentou um resumo dos resultados obtidos e sua contribuição perante os objetivos; e Apêndices, onde foram apresentados os materiais suplementares. Ao final deste trabalho, os anexos trazem informações relevantes sobre a autorização do uso de informações pela empresa.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A segurança sempre foi um elemento chave de todas as disciplinas de engenharia, incluindo a engenharia química, desde suas origens. Por exemplo, o Código de Hammurabi, rei da Babilônia de aproximadamente 1792-1750 a.C., inclui um código de construção inicial, descrevendo a responsabilidade do construtor de uma casa para a segurança dos ocupantes da casa e a proteção da propriedade contida na casa. O Código de Hammurabi deixa claro que as sociedades civilizadas, por pelo menos 4.000 anos, tiveram a expectativa de que o projetista e construtor de um artefato tecnológico é o responsável por qualquer dano ou prejuízo que possa resultar da falha desse artefato (HENDERSHOT, 2009).

Os acidentes catastróficos têm existido desde o início da era industrial. Onze anos após a invenção da caldeira em 1804, o primeiro acidente fatal com uma delas ocorreu em uma ferrovia inglesa. No ano seguinte, o primeiro acidente de barco a vapor matou 14 pessoas nos Estados Unidos, e acidentes subsequentes resultaram em 2.500 mortes antes de 1850 (MOSEMAN, 2016). A indústria química tem uma longa história, e o atendimento às expectativas da sociedade da época com relação à segurança sempre foi um requisito para aqueles que praticam a tecnologia química (HENDERSHOT, 2009).

### 2.1 Segurança de Processos

Nos primórdios da indústria química, os processos eram relativamente simples e as expectativas da sociedade quanto à segurança eram baixas pelos padrões da época. À medida em que a tecnologia química evoluiu e aumentou em complexidade, as expectativas sociais de segurança em todas as atividades industriais aumentaram. Ficou claro que havia uma necessidade de conhecimentos cada vez mais especializados em segurança e prevenção de perdas para a indústria química (HENDERSHOT, 2009). Em particular, a Segurança de Processos passou a ser reconhecida como um aspecto crítico da segurança química e de outros processos industriais.

Desde o acidente de Bhopal, a Segurança de Processos ganhou importância corporativa. O conhecimento em Segurança de Processos se estendeu ao conjunto de habilidades gerais de engenheiros e operadores de produtos e processos químicos e

petrolíferos, e muitas diretrizes para segurança de processo foram desenvolvidas em todo o setor (CCPS, 2006).

A Segurança de Processos é um elemento essencial para obtenção de excelência em fabricação, aumento da rentabilidade e do valor para os acionistas, independentemente do tamanho da empresa (CCPS, 2006). Ela se concentra nos riscos dos processos que envolvem tecnologia de fabricação química e processamento de material, incluindo grandes acidentes envolvendo a liberação de materiais perigosos ou energia, resultando em incêndios, explosões, exposição de pessoas a materiais tóxicos, danos ambientais e grandes perdas econômicas (HENDERSHOT, 2009).

A Segurança de Processos é um sistema de gestão a ser implementado nas empresas de modo a prevenir grandes acidentes envolvendo materiais perigosos. É necessário administrar as operações químicas complexas. Um sistema de gerenciamento de Segurança de Processos se concentra em três aspectos importantes de uma empresa (CCPS, 2006):

- **Tecnologia:** inclui o desenvolvimento de informações precisas de Segurança de Processos sobre os equipamentos e tecnologia, realizando análises de risco do processo, desenvolvendo procedimentos operacionais e práticas de trabalho seguras e, em seguida, gerenciando as mudanças à medida que elas surgem. Também inclui a concepção de processos de fabricação inerentemente mais seguros.
- **Instalações:** possui foco na integridade mecânica dos equipamentos e nos *softwares* que os controlam. Este aspecto inclui programas de manutenção preventiva, realizando revisões de segurança antes do projeto, durante o projeto e antes da partida, alinhando com o gerenciamento de mudanças para ajudar a garantir uma operação segura e contínua. Um bom projeto e uma manutenção de qualidade, juntamente com revisões periódicas de segurança, protegem os meios de produção de uma empresa.
- **Pessoal:** envolver os funcionários na construção e manutenção de um programa de Segurança de Processos é a melhor maneira de comunicar sua importância contínua a toda a organização. Outros elementos de Segurança de Processos que envolvem pessoas incluem capacitar os funcionários acerca dos riscos existentes no processo e suas relações com as tarefas de trabalho, o gerenciamento correto de contratados, a investigação de acidentes para entender suas causas, a

implementação de ações para prevenir a recorrência, a elaboração de plano de ação à emergências, o planejamento da resposta efetiva aos acidentes e a realização de auditorias internas para avaliar o desempenho destes elementos.

Para o Centro de Segurança Química e de Processos (*Center for Chemical and Process Safety*) – CCPS (2006), a implementação de um sistema de gerenciamento de Segurança de Processos influencia positivamente a maneira com a qual o público, os acionistas, os órgãos governamentais e os clientes se relacionam com a empresa. Além disso, ajuda a garantir a redução e o controle dos riscos identificados nos processos existentes e garantem a continuidade do negócio, evitando perdas catastróficas. Todos os benefícios, quando obtidos em conjunto, aderindo a um sistema de Segurança de Processos sólido, combinam-se para apoiar a rentabilidade, imagem, desempenho de segurança, qualidade e responsabilidade ambiental da empresa.

Os acidentes relacionados à Segurança de Processos podem ter impactos catastróficos, causando múltiplas lesões ou fatalidades, grandes danos econômicos, imobiliários e ambientais e podem afetar o público fora das instalações de fabricação (HENDERSHOT, 2009). Os acidentes que resultam em grandes perdas geralmente ocorrem por causa da falha de alguns sistemas ou barreiras no sistema de gerenciamento de Segurança de Processos - todos ocorrendo ao mesmo tempo. Tipicamente, nenhuma dessas perdas são o resultado da falha de uma única barreira ou medida de proteção (MARSH & MCLENNAN, 2014).

## **2.2 A Segurança de Processos comparada com a Segurança Operacional**

Desde que o desenvolvimento das relações trabalhistas foi iniciado, estabeleceram-se várias evidências e correlações do trabalho com os acidentes e doenças. Porém, somente em meados dos anos 1960, com Frank Bird, que os estudos dos acidentes de trabalho começaram a ser desenvolvidos. No Brasil, foi apenas em 1972, com a Portaria nº 3237, que se tornou obrigatório o cumprimento de regulamentações voltadas à higiene e segurança ocupacional para empresas com mais de cem trabalhadores (SENAI, 2012).

A Segurança Ocupacional pode ser definida como a área da segurança que tem como objetivo evitar qualquer dano físico ou risco de dano físico às pessoas. Esta palavra é normalmente associada aos riscos de acidentes envolvendo quedas, tropeções, escorregões, colisões, esmagamento, acidentes com veículos motorizados, produtos

químicos e outras atividades de risco, e também uso adequado dos Equipamentos de Proteção Individual (MATAQI e ADIVI, 2013). Estes acidentes de segurança ocupacional normalmente possuem impacto direto em apenas uma ou poucas pessoas dentro do local de trabalho.

A ausência de um sistema de gerenciamento de Segurança de Processos, por outro lado, pode levar a acidentes de grandes proporções envolvendo a liberação de materiais potencialmente perigosos, incêndios e explosões. Os efeitos destes acidentes podem ter proporções catastróficas e podem resultar em múltiplas fatalidades, assim como grandes perdas econômicas e de propriedade, além de consideráveis danos ambientais (CCPS, 2008). Os acidentes relacionados à Segurança de Processos podem afetar tanto as pessoas na planta industrial como os membros da comunidade ao redor.

Quando se fala em segurança, normalmente se pensa na Segurança Ocupacional. Na indústria de uma maneira geral, a segurança normalmente é descrita apenas como a segurança pessoal com foco nas taxas de ferimento, taxas e frequência de lesões, taxas de tempo perdido ou taxas de acidentes totais registráveis (MATAQI e ADIVI, 2013).

Entretanto, um bom gerenciamento de Segurança Ocupacional não garante um bom gerenciamento dos riscos de Segurança de Processos. Apesar de possuírem pontos em comum, a Segurança de Processos requer um entendimento completo dos riscos associados aos materiais perigosos manipulados na unidade e às condições de processo (temperatura, pressão, etc.) adotadas na operação da planta (MATAQI e ADIVI, 2013).

Por muitas vezes a Segurança de Processos é subestimada, visto que os acidentes deste tipo ocorrem com uma frequência muito menor, se comparados com os acidentes de segurança ocupacional, apesar de possuírem normalmente uma consequência muito maior (CCPS, 2008). Por isso, é fundamental que a Segurança de Processos seja discutida por todos os funcionários da planta e que haja comprometimento da alta liderança da empresa para garantir que todos os requisitos necessários sejam implementados.

### **2.3 O risco da indústria química**

No início da década de 1960 começou-se a observar uma grande mudança na indústria química, petroquímica e de óleo e gás. As quantidades de produtos produzidos nas fábricas aumentavam consideravelmente, fazendo com que condições operacionais,

tais como temperatura e pressão, se tornassem cada vez mais severas, além de aumentar a quantidade de materiais perigosos armazenados. Porém, um dos problemas de se trabalhar em condições extremas é que o processo se aproxima cada vez mais dos limites operacionais seguros. Por conta disso, em meados da década de 1960, diversos sistemas foram elaborados para garantir a integridade dos processos de fabricação (LEES, 1996a).

Entretanto, até o início da década de 1970 a questão da segurança na indústria química era tratada unicamente no âmbito das empresas, sem maiores interferências externas do governo ou do público. Nos projetos industriais e de equipamentos em geral, o enfoque de segurança era essencialmente baseado nos fatores de segurança embutidos nas normas e nos códigos de projeto. Na indústria havia uma ênfase exagerada na produção em comparação às prioridades dadas aos aspectos de saúde e segurança. A questão ambiental sequer era colocada na agenda das discussões de investimentos da indústria (LEES, 1996a).

Foi somente a partir do início da década de 1970 que começaram a surgir os primeiros sinais de insatisfação de algumas parcelas da população, de autoridades governamentais e de alguns setores da própria indústria. Alguns acidentes industriais de grande repercussão durante as décadas de 1970/1980 (Flixborough, Bhopal, Pasadena, Seveso) levaram ao aparecimento de importantes leis e regulamentações sobre segurança industrial e controle ambiental nos principais países industrializados (DNV GL, 2015a).

É da natureza do ser humano perceber o acidente que causa o maior número de perdas de vida como sendo mais trágico do que os demais. O potencial de grande perda de vida dá a percepção de que a indústria química é insegura. Porém, de acordo com o *Bureau of Labor Statistics* (2016), das ocorrências de morte registradas na indústria no ano de 2015, nos Estados Unidos, 1816 delas (cerca de 41%) foram decorrentes de acidentes no transporte. Os demais óbitos se dividem entre quedas e tropeços (17%), contato com objetos e equipamentos (16%), violência e homicídio (14%), enquanto a exposição a substâncias perigosas e os incêndios e explosões contribuem com apenas 9% e 3% deste número, respectivamente.

Quando são considerados todos os setores de atividade, a principal causa de óbitos no local de trabalho foram os acidentes relacionados a veículos rodoviários, que representaram 43% das mortes no local de trabalho. A **Tabela 1** traz um comparativo

dos piores acidentes ocorridos na história da humanidade por setor e o número de pessoas afetadas por cada um deles.

**Tabela 1:** Piores acidentes ocorridos na história da humanidade.

Evento	Local	Data	Nº de pessoas afetadas
Terremoto	Leste mediterrâneo	1201	1.100.000
Erupção vulcânica	Tambora Sumbawa, Indonésia	1815	92.000
Deslizamento de terra	Província de Kansu, China	1920	180.000
Avalanche	Yungay, Juascaran, Peru	1970	~18.000
Tornado	Shaturia, Bangladesh	1989	~1.300
Inundação	Rio Hwang-ho, China	1887	900.000
Relâmpago (descarga única)	Hut in Chinamasa Krael nr Umtali, Zimbabue	1975	21
Pânico	Abrigo antibombas, Zhong qing, China	1941	~4.000
Estouro de represa	Represa do rio Manchu, Morvi, Gujarat, Índia	1979	~5.000
Incêndio (único prédio)	The Theatre, Canton, China	1845	1.670
Explosão	Halifax, Nova Escócia, Canadá	1917	1.963
Mineração	Hankeiko Colliery, China	1942	1.572
Indústria	Planta de MIC da Union Carbide, Bhopal, Índia	1984	~2.500
Plataforma <i>offshore</i>	Piper Alpha, Mar do Norte	1988	167
Reator nuclear	Reator nº 4, Chernobyl	1986	31
Aviação	Queda do Boeing 747 da KLM, Tenerife	1977	583
Marítimo (único navio)	Navio alemão <i>Wilhelm Gustloff</i>	1945	~7.700
Trilho	Rio Bagmati, Bihar, Índia	1981	> 800
Estrada	Explosão de tanque de gasolina no interior de um túnel, Afeganistão	1982	~1.100
Bomba atômica	Hiroshima, Japão	1945	141.000
Bombardeio convencional	Tóquio, Japão	1945	~140.000

**Fonte:** (LEES, 1996a - adaptado).

Como resultado de várias consequências causadas pelos acidentes da indústria química, no ano de 1984 a *Canadian Chemical Producers Association* criou o programa *Responsible Care*® (ACC, 2018), como forma de garantir a melhoria contínua do desempenho das indústrias em saúde, segurança, meio ambiente e sustentabilidade. Este

programa se espalhou rapidamente pelo mundo, tendo adesão em diversos países. No Brasil, o programa chegou no ano de 1992 através da ABIQUIM – Associação Brasileira da Indústria Química – com o nome de Programa Atuação Responsável®. Este programa engloba requisitos de normas internacionais em sustentabilidade e Segurança Ocupacional, além de abranger a Segurança de Processos, o gerenciamento de produtos e a segurança das instalações (ABIQUIM, 2017).

Desde então, a Segurança de Processos ganhou particular importância nas indústrias de processamento químico. Avanços recentes na área da Segurança de Processos substituíram o antigo conceito de prevenção de acidentes. Isso inclui identificação de perigo e o *design* de novos recursos de engenharia para evitar perdas humanas e materiais.

De forma geral, diversas legislações foram criadas para determinar os requisitos mínimos que as empresas deveriam atender com relação ao gerenciamento dos riscos de Segurança de Processos. Nos Estados Unidos, diversas legislações compõem o portfólio de normas a serem atendidas, como o *Clean Air Act Amendments*, as normas de PSM da OSHA (29 CFR, 1910.119) e OSHA 31312, o *Risk Management Plan* da Agência de Proteção Ambiental (EPA), além de outras resoluções referentes à operações do tipo *off-shore*. Na União Europeia existem as Diretiva Seveso (82/501/EEC), criada após o incidente de Seveso, e a Diretiva 89/391/EEC da *EU Occupation Safety and Health Framework*. Algumas resoluções ambientais e antiterrorismo complementam estas diretivas. Outros países como Reino Unido, China e Índia também possuem legislações relevantes para implementação de sistemas de gerenciamento de riscos de Segurança de Processos (BESSERMAN e MENTZER, 2017).

No Brasil, por outro lado, não há nenhuma legislação específica que obrigue as empresas a estabelecer um programa de Segurança de Processos. Algumas legislações específicas, como a Norma Regulamentadora N° 9 (MTE, 2017a) e a resolução CONAMA 001/86 (CONAMA, 1986), possuem elementos específicos de identificação, avaliação e controle dos riscos. Entretanto, um sistema formal e estruturado, na maioria das vezes, não é implementado nas empresas de forma a ir além do mínimo exigido pela legislação.

Muitas técnicas foram desenvolvidas para a identificação de perigos e a análise de risco ao longo dos anos. Nas indústrias de processamento químico, as ferramentas

mais comuns são as avaliações de segurança, a lista de verificação de perigo do processo, a classificação relativa (índices de perigo), a análise preliminar dos perigos, análise do tipo “*What-If*”, o estudo do risco de operabilidade do processo (HAZOP), a análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA), análise de árvore de falhas (FTA), análise de árvore de eventos (ETA), análise de camadas de proteção (LOPA), análise de causa e consequências e análise de confiabilidade humana (HENDERSHOT, 2009).

Nenhuma técnica consegue, sozinha, garantir a identificação completa dos riscos de um processo. Dessa forma, o processo de avaliação de risco ocorre de maneira mais efetiva por meio de uma abordagem sistemática usando combinações das técnicas acima citadas. Portanto, os estudos de análise de risco são baseados em combinações destas técnicas.

Existem várias formas de se classificar os riscos encontrados na indústria moderna. Na indústria química, os riscos mais comuns são aqueles decorrentes das atividades rotineiras da operação, como as atividades de manutenção, trabalho em altura, trabalho a quente, trabalho em espaço confinado, etc. Porém os acidentes catastróficos ou com impactos de grande escala estão geralmente relacionados a algum tipo de perda de contenção dos produtos manuseados na produção, seja por vazamento ou ruptura de equipamentos e tubulações ou mesmo por explosões confinadas (pressurização, reações descontroladas, etc.) que, em última instância, acabam por causar liberações súbitas de produtos perigosos ou de grande quantidade de energia armazenada no processo (DNV GL, 2015a).

Não é possível eliminar o risco completamente. Todo processo químico possui um certo grau de risco associado a ele. Em algum momento do estágio de um projeto, alguém precisa decidir se os riscos são “aceitáveis” ou não. Ou seja, se os riscos forem maiores do que os riscos normais do dia-a-dia assumidos pelos indivíduos em seu ambiente não industrial, este risco passa a ser inaceitável.

Certamente, exigiria um esforço substancial e despesas consideráveis para projetar um processo com um risco comparável, por exemplo, ao de ser atingido por um relâmpago. Para um único processo químico em uma planta composta por vários processos, esse risco pode ser muito alto porque os riscos resultantes de exposições múltiplas são aditivos, tornando difícil sua completa eliminação (CROW e LOUVAR, 2015).

## 2.4 Metodologias de Análise de Risco

As Análises de Risco de Processo (PRA) usam uma abordagem de avaliação organizada e metódica com os objetivos de alcançar um consenso multidisciplinar sobre o controle do risco, documentar os resultados da avaliação para uso futuro na gestão de mudanças, auxiliar no treinamento do pessoal de operação e manutenção e desenvolver os cenários que serão incluídos no planejamento de emergência (CCPS, 2014b). A metodologia de análise de risco do processo selecionada deve ser apropriada à complexidade do processo e deve identificar, avaliar e controlar os riscos envolvidos no processo (EPA, 2008).

As regulamentações norte-americanas sobre Segurança de Processos especificam seis métodos de PRA aceitáveis, mas permitem o uso de qualquer metodologia equivalente apropriada. Os métodos mais utilizados são o estudo de risco e operabilidade (HAZOP) e o método *What-If* ou a abordagem *What-If/Checklist* (BAYBUTT, 2003a). A decisão de usar metodologias de mais complexas, como Análise de Risco Quantitativo (QRA) e Análise de Árvore de Falhas (FTA), precisa ser devidamente considerada devido à complexidade, nível de habilidade, tempo e recursos necessários para sua execução. Em alguns casos, esta decisão pode ser feita conforme os requisitos legais de órgãos ambientais e governamentais.

Metodologias menos complexas – como uma avaliação qualitativa utilizando Estudos de Perigos e Operabilidade (HAZOP), revisões do tipo *What-If* ou *Checklists* e técnicas semiquantitativas como a Análise de Camadas de Proteção (LOPA) – são geralmente aceitas como métodos preferenciais em muitas indústrias por serem mais fáceis de executar e por demandarem de menos recursos (CHASTAIN, DELANOY, *et al.*, 2016).

Ao identificar situações ou condições perigosas que podem levar a um evento de Segurança de Processos, deve-se considerar os seguintes aspectos (WSH COUNCIL, 2017):

- Os equipamentos de processo e sua capacidade de lidar com desvios das condições normais de operação;
- A precisão dos dados dos instrumentos de monitoramento do processo (por exemplo, temperatura, pressão ou sensor de fluxo);
- A confiabilidade de dispositivos de segurança (por exemplo, válvula de alívio de pressão, válvula de retenção, sistema de desarme);

- A integridade da contenção primária (por exemplo, tubos, vasos, mangotes flexíveis, juntas ou selos);
- A falha não planejada de utilidades (por exemplo, perda de vapor ou água de refrigeração);
- A compatibilidade entre diferentes materiais que são alimentados ao processo;
- A compatibilidade de materiais de processo com o material de construção do equipamento de processo;
- As atividades realizadas no local por funcionários e/ou contratados e a possibilidade de erro humano; e
- O impacto de fatores externos (por exemplo, impacto de veículo, impacto de acidentes em uma planta vizinha ou mudança significativa nas condições ambientais).

A PRA depende de que a equipe possa identificar os eventos que possam resultar em acidentes e julgar sua probabilidade para determinar se é possível ou não que os acidentes ocorram. Quanto mais eventos envolvidos em uma sequência de acidentes, mais difícil é para a equipe conceituar e identificar a sequência, e menor a probabilidade de que ele seja julgado como credível (BAYBUTT, 2003b). Em uma análise de risco, essas decisões são feitas qualitativamente, quase sempre sem a utilização de recursos como cálculos ou modelagem de consequências.

Pelo menos a cada cinco anos após a conclusão da análise inicial do risco do processo, a PRA deve ser atualizada e revalidada por uma equipe qualificada para garantir que a análise de risco seja consistente com o processo atual (EPA, 2008). Essa revalidação se faz necessária, pois, durante um período de cinco anos, é esperada que haja modificações no processo, além de poder ocorrer uma mudança de conceito ou histórico de risco que altere a classificação estabelecida em algum cenário.

A análise de risco, por si só, não identifica mecanismos de falha que causam acidentes. Em vez disso, proporciona uma oportunidade para a equipe que conduz o estudo de usar seu conhecimento e experiência para identificar sequências de acidentes envolvendo a ocorrência de mecanismos de falha e os riscos subsequentes. Se a equipe não tem conhecimento ou experiência dos mecanismos de falha envolvidos para certos acidentes, eles não serão identificados no estudo (BAYBUTT, 2003b).

### 2.4.1 Checklist

Um *Checklist* é a ferramenta mais simples que pode ser usada para identificação e análise de perigos, além de ser também um meio de transmitir lições aprendidas com a experiência. Os *Checklists* podem ser usados para verificar os perigos a serem avaliados e as tarefas a serem realizadas para garantir que todos os riscos no local de trabalho e no processo tenham sido identificados, abordados e controlados (WSH COUNCIL, 2017).

Eles podem variar no nível de detalhes e são frequentemente usados para indicar conformidade com os requisitos legais ou conformidade com padrões de segurança e práticas da indústria. Um *Checklist* típico compreende uma lista escrita de itens ou etapas processuais a serem verificadas para determinar se o status desejado de um processo ou atividade de trabalho foi alcançado (WSH COUNCIL, 2017).

Os *Checklists* são criados usando padrões e práticas aplicáveis para gerar uma lista de perguntas que buscam identificar quaisquer diferenças ou deficiências destes padrões. Se um *Checklist* para um processo não existe, uma pessoa experiente deve desenvolvê-lo baseada em padrões, práticas e experiência nas instalações ou equipamentos (EPA, 2008). Um *Checklist* completo geralmente fornece "sim", "não", "não aplicável" e "precisa de mais informações" para cada item. Uma análise de *Checklist* envolve uma visita à área do processo, comparando os equipamentos com os requisitos da lista.

Uma vantagem fundamental do uso de *Checklists* é que eles são fáceis de usar e podem ser aplicados a qualquer processo ou atividade de trabalho. Eles também podem ser usados para ajudar os trabalhadores novos ou inexperientes a se familiarizarem com os requisitos operacionais da tarefa em questão (WSH COUNCIL, 2017).

Os *Checklists*, no entanto, são limitados pela experiência do autor. Portanto, é ideal que as listas de verificação sejam desenvolvidas por uma equipe de PRA, composta por membros com origens variadas e ampla experiência com o processo ou atividade de trabalho. A qualidade da análise depende da qualidade do *Checklist*.

#### 2.4.2 *What-If*

A análise de *What-If* é uma abordagem de *brainstorming* em que um grupo de pessoas familiarizadas com o processo fazem perguntas sobre possíveis desvios ou falhas que podem ocorrer. Essas questões podem ser enquadradas como “E se?”, como em “E se a bomba falhar?”; ou podem ser expressões de interesse mais geral, como em “Eu me preocupo com a contaminação durante a descarga” (EPA, 2008). Uma pessoa fica responsável por registrar todas as perguntas em um mural ou em um computador. As questões são então divididas em áreas específicas de investigação, geralmente relacionadas à consequência de interesse.

As análises *What-If* destinam-se a identificar perigos, situações perigosas ou cenários de acidentes. A equipe composta por pessoas experientes identifica cenários de acidentes, consequências e salvaguardas existentes e, em seguida, sugere possíveis alternativas para a redução do risco (EPA, 2008). Esta metodologia pode ser utilizada para examinar desvios no projeto, construção, modificação ou parâmetros operacionais. Essa análise exige uma compreensão básica do processo e uma capacidade de combinar possíveis desvios dos parâmetros de projeto com os resultados.

A análise *What-If* geralmente faz uma revisão de todo o processo, desde a entrada dos produtos químicos até o descarregamento e armazenamento do produto final. É possível, porém, que análise se concentre em determinadas consequências de preocupação (EPA, 2008).

#### 2.4.3 *What-If / Checklist*

O método *What-If / Checklist* é um híbrido do método *What-If* e do método *Checklist*. Ele combina a característica sistemática do método *Checklist* com o recurso de *brainstorming* do método *What-If* para melhorar a qualidade da análise de risco. O método *What-If / Checklist* capitaliza os pontos fortes e compensa os defeitos de cada abordagem. Por exemplo, se um *Checklist* de análise de risco estiver incompleto, a análise pode não resolver de forma efetiva uma condição ou situação perigosa (WSH COUNCIL, 2017).

O método *What-If* serve para encorajar a equipe de análise de risco a avaliar outros eventos de Segurança de Processos possíveis ou cenários de acidentes que possam ter sido esquecidos quando o *Checklist* foi desenvolvido. Desta forma, qualquer

perigo ou item que esteja ausente em um *Checklist* de análise de risco existente pode ser facilmente detectado e o *Checklist* atualizado conforme necessário (WSH COUNCIL, 2017).

#### 2.4.4 Estudo de Perigos e Operabilidade (HAZOP)

Um Estudo de Perigos e Operabilidade (HAZOP) é um procedimento altamente disciplinado destinado a identificar como um processo pode desviar dos parâmetros de projeto. É definido como a aplicação de um exame crítico formal e sistemático do processo e dos parâmetros de engenharia para instalações novas ou existentes para avaliar o potencial de mau funcionamento de equipamentos individuais e os consequentes efeitos sobre a instalação como um todo. Seu sucesso reside na força dessa metodologia ao seguir os Diagramas de Fluxo de Processo (PFD) de um sistema e os Diagramas de Tubulação e Instrumentação (P&ID), quebrando o processo em seções gerenciáveis com limites definidos chamados nós, garantindo assim a análise de cada peça de equipamento em um processo (DUNJÓA, FTHENAKIS, *et al.*, 2010).

Como nas outras metodologias, uma pequena equipe multidisciplinar realiza a análise, cujos membros devem ter experiência e conhecimento suficientes para responder a todas as questões relacionadas ao sistema em estudo. Os membros são selecionados com cuidado de acordo com suas áreas de experiência e conhecimento. Eles recebem a autoridade para recomendar as mudanças necessárias no projeto de acordo com a necessidade de eliminação ou mitigação dos riscos identificados. Para um estudo de HAZOP não é recomendado mais do que dez pessoas, desde que todas as áreas necessárias estejam representadas.

Executar o método depende do uso de palavras-chave (como, não, mais, menos) combinadas com parâmetros de processo (por exemplo, temperatura, fluxo, pressão) que visam a revelar desvios (como menor fluxo, mais temperatura) dos parâmetros do processo ou de operação normal. Este procedimento é aplicado em um nó específico, isto é, a uma parte específica do sistema caracterizado pelos parâmetros operacionais definidos.

Tendo determinado os desvios, a equipe explora suas possíveis causas e consequências. Para cada par de causa-consequência, devem ser identificadas salvaguardas que podem prevenir, detectar, controlar ou mitigar a situação perigosa. Finalmente, se as salvaguardas forem insuficientes para resolver o problema, devem ser

consideradas as recomendações de implementação de novas barreiras de segurança (DUNJÓA, FTHENAKIS, *et al.*, 2010).

As recomendações para a redução de risco para um cenário desenvolvido durante um estudo HAZOP se referem aos desvios dos parâmetros de projeto que não foram considerados pelos projetistas porque eles não conceberam o cenário e a forma como ele poderia ocorrer (BAYBUTT, 2014). Assim, os estudos HAZOP, em grande parte, se destinam a garantir que a os parâmetros definidos no projeto de um processo abordem cenários que, de forma credível, possam ocorrer e que as proteções corretas para estes cenários estejam implementadas.

Os HAZOPs requerem mais recursos do que as técnicas anteriores. Um processo simples ou uma revisão com um escopo pequeno pode ser feito por apenas três ou quatro pessoas, se eles tiverem as habilidades técnicas e a experiência. Um processo grande ou complexo geralmente requer uma equipe de cinco a sete pessoas. O CCPS estima que, para um sistema pequeno ou simples, uma análise HAZOP levará de 8 a 12 horas para sua preparação, de 1 a 3 dias para avaliação do processo e de 2 a 6 dias para documentar os resultados. Para processos maiores ou mais complexos, um HAZOP levará de 2 a 4 dias para preparar, de 1 a 3 semanas para avaliar e de 2 a 6 semanas para documentar (EPA, 2008).

#### 2.4.5 Análise do Modo de Falha e seus Efeitos (FMEA)

Uma Análise do Modo de Falha e seus Efeitos (FMEA) avalia as maneiras em que o equipamento ou sistema falha e a resposta do sistema à falha. O foco do FMEA é em falhas de equipamento único e falhas no sistema (EPA, 2008). Um FMEA geralmente gera recomendações para aumentar a confiabilidade dos equipamentos. Ele não examina diretamente os erros humanos, mas considerará o impacto de erro humano nos equipamentos.

Um FMEA produz uma lista qualitativa e sistemática de equipamentos, modos de falha e efeitos. A análise pode ser facilmente atualizada para mudanças de projeto ou sistema. O FMEA geralmente produz uma tabela que, para cada item de equipamento, inclui uma descrição, uma lista de modos de falha, os efeitos de cada falha, as salvaguardas existentes e as ações recomendadas para resolver a falha (KHAN e ABBASI, 1998).

Por exemplo, para a operação normal da bomba, os modos de falha incluirão falhas na parada quando necessário parar, paradas quando necessário seu funcionamento, vazamentos ou rupturas de vedação, e vazamentos ou rupturas no corpo da bomba. Os efeitos detalhariam a consequência imediata e o impacto em outros equipamentos. Geralmente, ao analisar os impactos, os especialistas assumem que as salvaguardas existentes não funcionam.

#### 2.4.6 Análise de Árvore de Falhas (FTA)

A Análise de Árvore de Falhas (FTA) é uma técnica dedutiva que se concentra em um acidente particular ou falha no sistema principal e fornece um método para determinar as causas do evento. A árvore de falhas é um gráfico que exhibe as combinações de falhas de equipamentos e erros humanos que podem resultar no acidente (KHAN e ABBASI, 1998).

A FTA começa com o acidente e identifica as causas imediatas. Cada causa imediata é examinada para determinar suas causas até que as causas básicas de cada uma sejam identificadas. Por meio dessa análise é possível identificar combinações de equipamentos básicos e falhas humanas que podem levar a um acidente, permitindo a definição de medidas preventivas para as causas básicas significativas (KHAN e ABBASI, 1998).

A FTA é adequada para análises de sistemas altamente redundantes. Para sistemas vulneráveis a falhas únicas que podem levar a acidentes, FMEA ou HAZOP são técnicas mais adequadas para serem usadas. A FTA é frequentemente usada quando outra técnica identificou um acidente que requer uma análise mais detalhada. Ele examina avarias que exigem que o componente seja reparado e falhas que irão se corrigir uma vez que as condições retornem à normalidade (EPA, 2008).

Falhas e erros são divididas em três grupos: falhas primárias e erros que ocorrem quando o equipamento está operando no ambiente para o qual se destinava; falhas secundárias e erros que ocorrem quando o sistema está operando fora dos parâmetros pretendidos; e falhas de comando e erros no funcionamento do equipamento conforme projetado, mas que ocorrem quando o sistema que o comandava apresentou mau funcionamento (EPA, 2008).

Uma FTA requer um conhecimento detalhado de como a planta ou sistema funciona, desenhos e procedimentos detalhados do processo e conhecimento de modos e efeitos de falha de componentes.

#### 2.4.7 Análise de Camadas de Proteção (LOPA)

A Análise de Camadas de Proteção (LOPA) é uma metodologia semiquantitativa normalmente utilizada em conjunto com outras metodologias qualitativas de Análise de Risco de Processo. Como as metodologias de PRA dependem do julgamento de valor atribuído pela equipe de análise, da informação fornecida, dos resultados das análises de consequências e da experiência com acidentes passados para atribuição do risco individual de cada cenário, esta atribuição qualitativa pode nem sempre representar o risco real do cenário. Desta forma, a metodologia de LOPA é utilizada para uma avaliação mais sistemática dos cenários e dos controles atribuídos a estes cenários como camadas de proteção independentes (MORRISON, AIKEN, *et al.*, 2017).

Para ser considerada uma camada de proteção independente, uma salvaguarda deve atender aos seguintes critérios (SUMMERS, 2007):

- **Especificidade:** a camada de proteção deve ser capaz de detectar e prevenir ou mitigar as consequências de eventos específicos potencialmente perigosos, como uma reação descontrolada, perda de contenção ou uma explosão.
- **Independência:** uma camada de proteção deve ser independente de todas as outras camadas de proteção associadas ao evento potencialmente perigoso identificado. A independência exige que o seu desempenho não seja afetado pela falha de outra camada de proteção ou pelas condições que causaram a falha. Mais importante, a camada de proteção é independente da causa iniciadora.
- **Confiabilidade:** a proteção fornecida pela camada de proteção deve reduzir o risco identificado conforme um valor conhecido e especificado.
- **Auditabilidade:** a camada de proteção deve ser projetada para permitir a validação periódica da sua função.

A metodologia de LOPA pode ser usada em qualquer ponto do ciclo de vida de um projeto ou processo, mas é mais eficiente quando implementada durante o projeto inicial, quando os diagramas de fluxo do processo estão completos e os fluxogramas estão em desenvolvimento (SUMMERS, 2007).

Para os processos existentes, a LOPA deve ser usada durante ou após a revisão ou revalidação com a metodologia de HAZOP. A LOPA é tipicamente aplicada depois que uma análise de riscos qualitativa foi concluída, o que fornece à equipe LOPA uma listagem de cenários de risco com descrição de consequência associada e possíveis salvaguardas para consideração (SUMMERS, 2007).

Apesar de poder ser utilizada a qualquer momento no ciclo de vida de uma fábrica, a metodologia de LOPA é mais eficiente para cenários de risco causados por falha de um único equipamento, falha de um único sistema de controle ou erro humano. Para cenários mais complexos, onde existem diversas ações que podem ser tomadas pelo operador para evitar que um acidente ocorra, esta metodologia começa a encontrar dificuldades para sua aplicação (MORRISON, AIKEN, *et al.*, 2017).

A LOPA não é apenas outra ferramenta de avaliação de risco, mas sim uma ferramenta de engenharia usada para garantir que o risco do processo seja mitigado com sucesso a um nível aceitável. A LOPA é uma metodologia racional que permite um meio rápido e econômico para identificar as camadas de proteção que reduzem a frequência ou as consequências de acidentes perigosos específicos (SUMMERS, 2007).

Não existem abordagens sistemáticas de análise de risco que identifiquem todos os cenários de acidentes para processos, uma vez que os meios técnicos não estão disponíveis. Mesmo depois de aplicar os melhores esforços, sempre haverá a possibilidade de ocorrência de acidentes não identificados. Assim, não há garantias de que um cenário de acidente específico seja identificado pela PRA. Na verdade, isso está implícito na própria definição da palavra "acidente" como "um evento infeliz que ocorre de forma inesperada e involuntária" ou "algo que acontece por acaso ou sem causa aparente" (BAYBUTT, 2003a). Sempre haverá o risco residual de acidentes, uma vez que não é possível praticar novas medidas para reduzir o risco, ou para identificar os acidentes que representam o risco.

## **2.5 Avaliação Quantitativa de Risco aplicada à liberação de produtos e materiais tóxicos**

A ocorrência de vazamentos de produtos químicos representa uma grave ameaça à segurança dos moradores ao redor das plantas industriais, à qualidade do ar e à segurança no trabalho. As legislações mais recentes em nível internacional destinadas a controlar os riscos tecnológicos dos processos industriais incorporaram o critério de

dose na definição de áreas de vulnerabilidade. Isso implica saber a concentração e o tempo a que uma pessoa está exposta durante a emergência (CARRARI, APARICIO, *et al.*, 2004). Essas informações são valiosas para se determinar planos de emergência mais eficazes para cada cenário de risco.

Uma Avaliação Quantitativa de Risco (QRA) é uma ferramenta valiosa para determinar o risco de uso, manuseio, transporte e armazenamento de substâncias perigosas. As QRA são usadas para demonstrar o risco causado pela atividade e fornecer às autoridades competentes informações relevantes para permitir decisões sobre a aceitabilidade dos riscos referentes às atividades do estabelecimento ou da rota de transporte (UIJT DE HAAG e ALE, 2005).

As QRA são feitas quando se verifica que substâncias perigosas estão presentes em um local (por exemplo, processos industriais e rotas de transporte) em quantidades que possam apresentar perigo para o meio ambiente. Uma vez que nem todas as instalações contribuem significativamente para o risco, não vale a pena incluir todas as instalações na QRA. Uma substância perigosa particular pode ser excluída se pelo menos um dos seguintes critérios genéricos for cumprido (UIJT DE HAAG e ALE, 2005):

- Forma física da substância;
- Contenção e capacidades;
- Localização e quantidades; e
- Classificação.

As QRA têm foco principalmente nos cenários envolvendo perda de contenção primária (LOPC). De acordo com o AIChE (2017), a perda de contenção primária é uma liberação não planejada ou descontrolada de material de sua contenção primária, incluindo materiais não tóxicos e não inflamáveis (por exemplo: vapor, condensado quente, nitrogênio, CO<sub>2</sub> comprimido ou ar comprimido). Estas liberações descontroladas geram os chamados efeitos físicos dos acidentes (sobrepessão, fluxo térmico e nuvens de gases tóxicos) que potencialmente podem gerar danos às pessoas e/ou instalações. A extensão dos possíveis danos é delimitada pela intensidade do efeito físico causador do dano, sendo que a relação entre a intensidade do efeito físico e o dano correspondente pode ser estabelecida por meio dos modelos de vulnerabilidade (DNV GL, 2015a).

Para projetistas, fabricantes de equipamentos industriais, operadores e autoridades responsáveis, é essencial ter modelos disponíveis para avaliar os efeitos físicos das liberações acidentais de materiais perigosos (VAN DEN BOSCH e WETERINGS, 2005). A avaliação dos efeitos físicos decorrentes de vazamentos de produtos perigosos, incêndios e explosões, dependendo do tipo de material e das condições em que este se encontra, pode requerer o uso de modelos, os quais possibilitam o cálculo dos seguintes parâmetros (DNV GL, 2015b):

- Descarga: quantidades vazadas ou taxas de descarga de material (líquido, gasoso e bifásico);
- Evaporação súbita ("flasheamento") de líquidos superaquecidos;
- Espalhamento das poças de líquidos ou gases liquefeitos e evaporação;
- Dispersão de gases (leves ou pesados) na atmosfera; e
- Determinação dos efeitos tóxicos e inflamáveis.

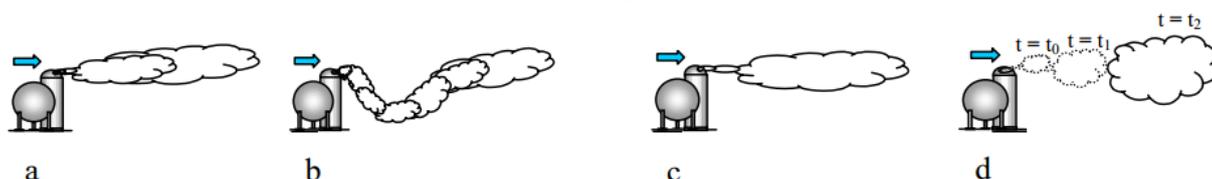
Para a avaliação da área vulnerável, a primeira etapa é a caracterização do cenário de acidente, que consiste na apresentação de todas as condições físicas e das hipóteses necessárias para a determinação dos efeitos físicos do acidente, tais como, a localização do vazamento (ponto de liberação), o produto envolvido e as suas condições termodinâmicas no momento do vazamento. Essa etapa de caracterização inclui a determinação da substância a ser liberada, a determinação do inventário, a determinação das condições da substância a ser liberada e a determinação do tipo de liberação (DNV GL, 2015b).

Após a etapa de caracterização do cenário de acidente, deve ser feita a caracterização do local do acidente. Essa etapa inclui a localização do ponto de vazamento, a definição da existência de dique de contenção, caracterizar o tipo de solo e determinar a direção do vazamento (DNV GL, 2015b).

A partir da caracterização do cenário do acidente, faz-se necessária a determinação do termo fonte, ou seja, a definição da quantidade de material liberado e a forma como o mesmo é liberado ao longo do tempo. Isto exige o cálculo da quantidade ou taxa de descarga do material para atmosfera, a qual pode ser líquida, gasosa ou bifásica (DNV GL, 2015b). Para se determinar o melhor modelo de dispersão, é importante entender como a densidade do material e o modo de liberação podem influenciar na sua dispersão no ambiente (CARRARI, APARICIO, *et al.*, 2004):

- **Gases neutros e pesados:** Os gases com características de sustentação semelhantes ao ar são referidos como "neutros" e um modelo Gaussiano é usado para prever sua dispersão. Neste modelo, turbulência eólica e atmosférica são as forças que movem as moléculas de gás pelo ar. Assim, a nuvem é desenhada na direção do vento formando uma pena como mostrado na Figura 1(a). Devido à mistura turbulenta, difunde-se na direção transversal, gerando uma curva em forma de sino para a concentração. Quando temos um gás "denso", ou seja, um gás cuja densidade é maior do que o do ar ou está a uma temperatura muito baixa, o comportamento inicial difere substancialmente do de um gás neutro. Em primeiro lugar, o gás colapsa porque é mais pesado do que o ar à sua volta. A nuvem se move na direção do vento que se prolonga devido à gravidade. Em seguida a nuvem se dilui na direção do vento, fazendo com que sua densidade se aproxime da do ar e, então, se comporta como gás neutro, como mostrado na Figura 1(b).
- **Liberações contínuas e instantâneas:** Se o orifício através do qual a perda ocorre é relativamente pequeno ou a massa contida no vaso é muito grande, a duração do vazamento será grande. Sob estas condições, os gases são dispersos na atmosfera formando uma pena que atingirá sua extensão máxima e permanecerá durante todo o período de derramamento. Este cenário é conhecido como perda contínua e está demonstrado na Figura 1(c). Quando a ruptura é muito grande ou catastrófica ou a massa contida no vaso é pequena, a liberação de praticamente toda a massa é feita muito rapidamente, formando uma nuvem chamada "sopro" que não foi anexada à fonte do derramamento e dele se afasta na direção do vento, modificando seu tamanho e posição conforme o tempo passa como mostrado na Figura 1(d). Este cenário é considerado uma perda instantânea.

**Figura 1:** Dispersão de gases - (a) Gás neutro; (b) Gás denso; (c) Liberação contínua; (d) Liberação instantânea.



**Fonte:** (CARRARI, APARICIO, *et al.*, 2004).

Em seguida, caso o material no estado líquido seja volátil, é preciso avaliar a taxa com que este evapora, servindo de fonte para a formação da nuvem de gás. Para líquidos com ponto de ebulição abaixo da temperatura ambiente, como por exemplo gases liquefeitos por pressurização, a liberação é acompanhada de evaporação súbita (“flasheamento”), fazendo com que uma fração do material seja emitida diretamente para a atmosfera. A parte que não é evaporada subitamente deposita-se, formando uma poça líquida que, por troca de calor com o meio ambiente, evapora liberando gases do material que irão se dispersar na atmosfera (DNV GL, 2015b).

Uma vez estabelecida a taxa com que o material está sendo liberado para dispersão na atmosfera, o campo de concentrações resultante da liberação pode ser determinado com o uso de modelos de dispersão apropriados. Os danos causados pelos efeitos físicos são de natureza estocástica, isto é, somente se pode prever a probabilidade de se observar um certo dano a um indivíduo ou a percentagem esperada de pessoas da população exposta ao efeito físico daquele dano (DNV GL, 2015b).

Uma vez que foram realizados os cálculos de dispersão, devem ser definidas quais as concentrações são consideradas perigosas. Para os cenários de liberação não esperada de produtos químicos, os valores de exposição a curto prazo nas situações de emergência devem ser considerados ao invés dos valores de exposição ocupacional (CROW e LOUVAR, 2015). Para valores de exposição de curto prazo, se pode utilizar diretrizes de exposição pública elaboradas por órgãos governamentais. As diretrizes de exposição pública se destinam a prever como os membros do público em geral seriam afetados (ou seja, a gravidade do perigo) se estiverem expostos a um produto químico perigoso específico em uma situação de resposta de emergência (NOAA, 2017).

Para se fazer a modelagem de uma liberação de produto químico tóxico, pode-se utilizar qualquer uma das diretrizes disponíveis como Níveis Tóxicos de Preocupação (LOCs). Os LOCs e outras informações de cenário são utilizados para gerar uma estimativa de zona de ameaça onde zonas vermelhas, laranja e amarelas indicam áreas em que as concentrações de produtos químicos referente a cada LOC foram excedidas em algum ponto após a liberação ter começado (NOAA, 2017). Os LOCs padrão devem ser utilizados de acordo com esta hierarquia (CROW e LOUVAR, 2015):

- **AEGL – *Acute Exposure Guideline Levels* (Níveis de orientação de exposição aguda):** os AEGLs estimam as concentrações em que a maioria das pessoas - incluindo indivíduos sensíveis, como pessoas idosas, doentes ou muito jovens -

começará a ter efeitos para a saúde se estiverem expostas a um produto químico perigoso por um período de tempo específico (duração). Para uma determinada duração da exposição, um produto químico pode ter até três valores de AEGL, cada um dos quais corresponde a um nível específico de efeitos sobre a saúde. As três camadas AEGL são definidas da seguinte forma:

- O **AEGL-3** é a concentração no ar, expressa em partes por milhão (ppm) ou miligramas por metro cúbico ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ), de uma substância acima da qual se prevê que a população em geral, incluindo indivíduos suscetíveis, possa ter um risco de vida, graves efeitos à saúde ou morte.
  - O **AEGL-2** é a concentração no ar (expressa em ppm ou  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) de uma substância acima da qual se prevê que a população em geral, incluindo indivíduos susceptíveis, possa ter efeitos adversos irreversíveis ou outros efeitos adversos graves e duradouros para a saúde ou tenham a habilidade de escapar prejudicada.
  - O **AEGL-1** é a concentração no ar (expressa em ppm ou  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) de uma substância acima da qual se prevê que a população em geral, incluindo indivíduos suscetíveis, possa sofrer desconforto notável, irritação ou certos efeitos não-sensíveis assintomáticos. No entanto, os efeitos não são incapacitantes e são transitórios e reversíveis após a cessação da exposição.
- **ERPG – *Emergency Response Planning Guidelines* (Diretrizes de planejamento de resposta de emergência):** os ERPGs estimam as concentrações em que a maioria das pessoas começará a sentir efeitos para a saúde se estiverem expostas a um produto químico perigoso no ar por 1 hora. Os indivíduos sensíveis do público - como pessoas idosas, doentes ou muito jovens - não são abrangidos por essas diretrizes e podem sofrer efeitos adversos em concentrações abaixo dos valores do ERPG. Um produto químico pode ter até três valores de ERPG, cada um correspondendo a um nível específico de efeitos sobre a saúde. Os três níveis ERPG são definidos da seguinte forma:
- O ERPG-3 é a concentração máxima no ar abaixo da qual quase todos os indivíduos podem estar expostos por até 1 hora sem experimentar ou desenvolver graves efeitos para a saúde que coloquem a vida em risco.
  - O ERPG-2 é a concentração máxima no ar abaixo da qual quase todos os indivíduos podem estar expostos por até 1 hora sem experimentar ou

desenvolver efeitos ou sintomas irreversíveis ou outros efeitos graves para a saúde que possam prejudicar a habilidade de um indivíduo em tomar medidas protetoras.

- O ERPG-1 é a concentração máxima no ar abaixo da qual quase todos os indivíduos podem ser expostos por até 1 hora sem experimentar mais do que efeitos secundários leves, transitórios ou sem perceber um odor desprezível claramente definido.
- **IDLH – *Immediately Dangerous to Life or Health* (Imediatamente perigoso para vida ou saúde):** O Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional (NIOSH) define uma condição de vida ou de saúde imediatamente perigosa como uma situação "que representa uma ameaça de exposição a contaminantes aéreos quando essa exposição é susceptível de causar morte ou efeitos adversos permanentes imediatos ou retardados para a saúde ou evitar fugas de tal ambiente". O limite de IDLH representa a concentração de um produto químico no ar ao qual trabalhadores adultos saudáveis poderiam estar expostos (se seus respiradores falharem) sem sofrer efeitos permanentes ou prejudiciais para a saúde. Embora, na maioria dos casos, a saída de um determinado local de trabalho possa ocorrer em muito menos de 30 minutos, como margem de segurança, os valores IDLH foram baseados nos efeitos que podem ocorrer como consequência de uma exposição de 30 minutos.

A utilização destas diretrizes de exposição pública pode resultar em inconsistências, pois os diferentes métodos se baseiam em conceitos diferentes. Deve-se verificar qual método se adequa melhor ao cenário em estudo e deve prevalecer o bom senso.

## 2.6 Toxicidade

O que diferencia um remédio de um veneno é a dose na qual ele é administrado a um organismo. Sendo assim, não existem substâncias inofensivas, apenas modos inofensivos de usar substâncias. A toxicidade é, portanto, uma propriedade da substância que descreve a sua probabilidade de causar danos aos organismos biológicos, baseado na exposição destes organismos a esta substância (CROW e LOUVAR, 2015).

As substâncias tóxicas podem entrar nos organismos através da boca, para o estômago; através da boca ou do nariz, para o pulmão; através de cortes nas peles; e

através de absorção pela membrana da pele. Das quatro rotas de entrada, as mais significativas na indústria são as de inalação e absorção dérmica. A exposição usual é ao vapor, mas material particulado sólido e líquido também podem contribuir (CROW e LOUVAR, 2015).

Os efeitos da exposição a substâncias tóxicas podem ser agudos, quando resultantes de uma exposição única a grandes concentrações da substância; ou crônicos, quando resultantes de uma exposição a pequenas concentrações da substância por longos períodos de tempo. Os efeitos crônicos, por muitas vezes, só são percebidos muitos anos após a exposição do organismo à substância (LEES, 1996b).

Uma vez absorvidas pelos organismos, as substâncias tóxicas somente se tornam inativas caso sejam eliminadas. A eliminação pode ocorrer por excreção por meio dos rins, fígado, pulmões ou outros órgãos; pela transformação da substância química em algo menos nocivo por meio de reações metabólicas; ou por armazenamento no tecido adiposo (CROW e LOUVAR, 2015).

É importante conhecer as propriedades toxicológicas de uma substância para poder quantificar os efeitos de uma possível contaminação em um organismo. Uma vez que os efeitos de um possível agente tenham sido quantificados, procedimentos apropriados podem ser desenvolvidos para garantir que a substância seja manuseada adequadamente. As informações toxicológicas normalmente são obtidas nas Fichas de Informação de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ) de cada produto.

### 3 ESTUDO DE CASO

Fundada em 1865 nos Estados Unidos e presente no Brasil há 51 anos, a Cargill é uma das maiores indústrias de alimentos do mundo. A empresa atua há mais de 150 anos oferecendo serviços e produtos alimentícios, agrícolas, financeiros e industriais ao mundo, trabalhando juntamente com produtores rurais, clientes, governos e comunidades. Atualmente possui operações em mais de 70 países, contando com mais de 155 mil funcionários, e tem como missão ser líder em nutrir o mundo de forma segura, responsável e sustentável (CARGILL, 2015b).

Com sede em São Paulo (SP) no Brasil, a empresa está presente em 17 estados brasileiros e no Distrito Federal por meio de unidades industriais e escritórios em mais 150 municípios, contando com mais de 8 mil funcionários. A Cargill processa, comercializa e negocia globalmente soja, açúcar, algodão, milho, cacau e outros grãos e, por meio de *joint ventures*, realiza negócios no mercado de etanol e energia. Além disso, produz e comercializa ingredientes para a indústria alimentícia, como amidos, adoçantes, chocolates, gorduras, texturizantes, polióis, entre outros. A empresa também atua na área financeira, no gerenciamento de riscos, na comercialização de energia, na área de transporte e no segmento industrial, com soluções em óleos industriais para aplicações em cosméticos, transformadores, lubrificantes, tintas, entre outras aplicações. A Cargill produz e comercializa, ainda, produtos voltados ao consumidor final, como óleos refinados e compostos, molhos para salada, maionese, molhos e extratos de tomate. Também distribui e comercializa no Brasil azeites, azeitonas e vinagres (CARGILL, 2016a).

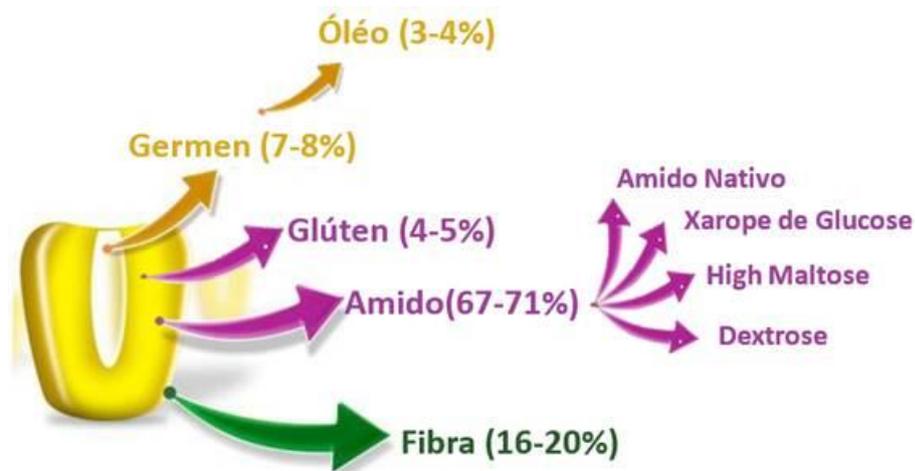
A unidade da Cargill em Uberlândia conta com um centro administrativo e três fábricas: Ácido Cítrico, Soja e Milho. A fábrica foi fundada em 1986, começando apenas com o processamento de Soja, iniciando o processamento de Milho em 1990 e a produção de Ácido Cítrico apenas no ano de 2000. Atualmente, a fábrica conta com cerca de 1500 pessoas, entre funcionários e contratados.

O foco deste trabalho foi a fábrica do Milho, escolhido por ser o local de atuação profissional do autor e pela presença de materiais tóxicos. Esta fábrica tem capacidade de moer cerca de 1800 toneladas de milho por dia e é responsável pela produção de produtos principais à base de amido de milho: amido nativo e modificado, xaropes de glucose, xaropes de alta maltose e xarope de dextrose. Produz também os

produtos secundários (coprodutos): óleo de milho bruto, glúten e farelo de milho. Esses produtos, comercializados pela Cargill, possuem aplicações nas mais diversas indústrias, tais como: de bebidas, alimentícia, farmacêutica, química, papelaria e de ração animal (CARGILL, 2016b).

Apesar de grande parte do milho ser utilizado para alimentação animal, mais de 5 milhões de toneladas de milho são destinadas anualmente para o consumo humano e outras aplicações industriais. Sua aplicação versátil é devido, principalmente, à composição de sua matriz vegetal, formada por quatro principais estruturas físicas: endosperma, de onde se extrai o amido; gérmen, onde se concentra quase a totalidade dos lipídeos e minerais do grão e de onde se extrai o óleo de milho; pericarpo ou casca, de onde se extrai as fibras; e a ponta. As proteínas (glúten) estão presentes tanto no endosperma como no gérmen (STRAZZI, 2015). A Figura 2 apresenta a composição média dos produtos extraídos do milho à partir de seus quatro componentes principais.

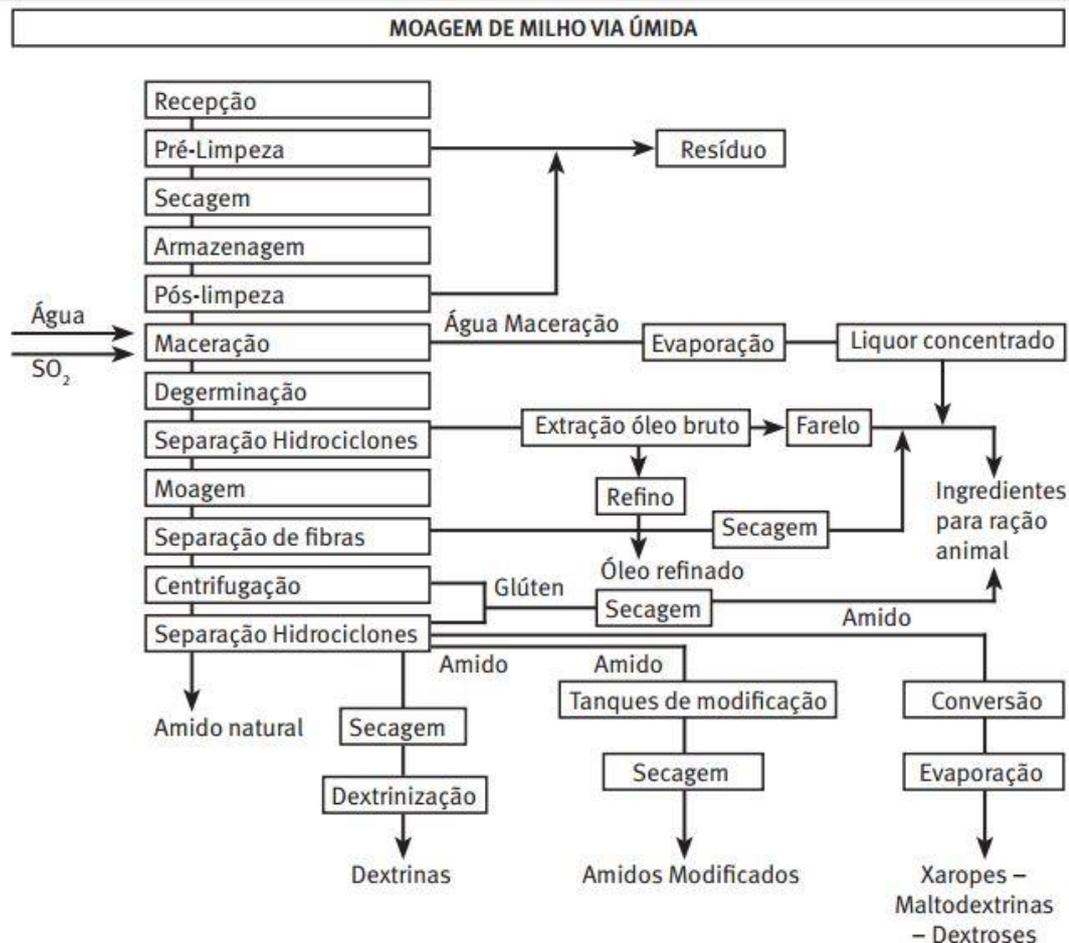
**Figura 2:** Composição do milho conforme seus quatro componentes principais.



Fonte: (CARGILL, 2016b).

O processamento industrial do milho para produção de seus derivados pode ocorrer em dois processos distintos: processamento por via seca (menos tecnológico, com geração de produtos com menor valor agregado) ou por via úmida (processo mais tecnológico, gerando produtos de maior valor agregado) (STRAZZI, 2015). Na Cargill em Uberlândia é utilizado o processamento por via úmida, similar ao apresentado na Figura 3.

**Figura 3:** Processo de moagem de milho por via úmida.



**Fonte:** (STRAZZI, 2015).

Este processo se inicia com a etapa de recebimento, onde o milho é classificado de acordo com suas características (contaminação, tamanho e integridade dos grãos e umidade) e direcionado para o armazenamento. Antes de ser enviado para processamento, o milho passa por etapas de limpeza, classificação e secagem, eliminando impurezas e contribuindo para obtenção de produtos de elevada qualidade (CARDOSO, PINHEIRO, *et al.*, 2011).

O processo de moagem por via úmida se diferencia pelo processamento por via seca devido à presença de uma etapa de maceração, onde se incorpora água aos grãos de milho, aumentando, assim, a eficiência da separação dos grânulos de amido e proteínas do endosperma, permitindo que mais produtos sejam extraídos da matriz vegetal. A maceração ocorre em grandes tanques preenchidos com milho e água aquecida contendo leveduras, mantida a cerca de 50 °C por um período superior a 30h, podendo variar conforme o tipo de milho que está sendo utilizado (STRAZZI, 2015).

O processo de maceração somente irá ocorrer se à água for feita a adição de dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), que em contato com a água forma ácido sulfuroso. Este ácido irá alterar o pH do meio, fazendo o controle microbiológico da fermentação e ajudando na separação do amido e das proteínas (STRAZZI, 2015). O seu papel principal no processo de maceração é romper as ligações de dissulfeto, enfraquecendo a matriz proteica que encapsula os grânulos de amido. Isso faz com que ocorra no sistema uma degradação acelerada das proteínas insolúveis do milho, aumentando a quantidade de proteínas solúveis no meio (BISS e COGAN, 1996).

A adição de  $\text{SO}_2$  pode ser feita de diversas maneiras ao processo, sendo as mais comuns a queima de enxofre, a utilização de dióxido de enxofre gasoso ou a adição de sais de enxofre tais como sulfito de potássio ( $\text{K}_2\text{SO}_3$ ), sulfito de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ), sulfito de amônio ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) e metabissulfito de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) (YANG, HAKEN, *et al.*, 2005). A escolha da fonte de  $\text{SO}_2$  irá depender da aplicação do produto e da água de maceração, além de levar em consideração questões econômicas relacionadas ao preço da matéria-prima. No processo da Cargill em Uberlândia são utilizados cilindros de dióxido de enxofre liquefeito para adição direta do gás ao tanque de água de maceração (CARGILL, 2010).

Durante a maceração ocorre a extração dos componentes solúveis da matriz vegetal para a fase líquida, que passa a ser chamada de líquido. Esse líquido é drenado do tanque, concentrado por meio de evaporação e aproveitado para enriquecer nutricionalmente rações animais. O milho segue para a etapa de moagem, onde ocorre a separação de cada um dos seus elementos para produção dos diversos produtos finais (STRAZZI, 2015).

Este trabalho teve como foco apenas a etapa de maceração, por ser a única etapa do processo onde há a alimentação de  $\text{SO}_2$  ao sistema. Nas etapas seguintes, o dióxido de enxofre está presente apenas em quantidades residuais e incorporado ao produto, apresentando apenas risco de exposição ocupacional e não mais um risco de Segurança de Processos. Esta etapa e este produto foram escolhidos pelas oportunidades identificadas na melhoria das análises de risco existentes. Além disso, as unidades da Cargill em Uberlândia são as únicas unidades da empresa no mundo que operam com a utilização de dióxido de enxofre liquefeito. Por isso, não há nenhuma referência de outras unidades da empresa acerca dos riscos deste processo e dos controles necessários.

### 3.1 Dióxido de Enxofre

O dióxido de enxofre é um gás incolor, de odor pungente, não inflamável e mais denso do que o ar. Quando armazenado sob pressão, ele se encontra liquefeito. É facilmente dissolúvel em água (ATSDR, 1998).

Sua utilização principal é para produção de ácido sulfúrico, mas também pode ser utilizado como matéria-prima nas indústrias de papel e celulose, açúcar, mineração, refinarias de óleo e outras indústrias alimentícias. Pode ser gerado a partir da combustão de combustíveis para aquecimento e geração de energia. Naturalmente, ele ocorre a partir de erupções vulcânicas, emissões marinhas e oxidações de outros gases sulfurosos (RAY e KIM, 2014). As principais características do dióxido de enxofre são apresentadas na **Tabela 2**.

**Tabela 2:** Propriedades do dióxido de enxofre.

Propriedade	Valor
Número de CAS	7446-09-5
Massa molecular	64,1
Ponto de Fusão	-75,5 °C
Ponto de Ebulição	-10 °C
Pressão de Vapor a 20 °C	330 kPa
Densidade relativa do líquido (água = 1)	1,4 a -10 °C
Densidade relativa do vapor (ar = 1)	2,25
Solubilidade em água a 25 °C	8,5 mL / 100 mL
Limiar de detecção de odor	1 ppm
Limite inferior de explosividade	Não aplicável
Limite superior de explosividade	Não aplicável
Ponto de fulgor	Não aplicável

**Fonte:** (NIOSH, 2015).

A exposição ao dióxido de enxofre pode causar, nos olhos, lacrimação, sensação de queimação nos olhos, conjuntivite aguda ou queimadura das córneas. No sistema respiratório, a exposição pode causar sensação de queimação na garganta, tosse, dificuldades para respirar, broncoconstrição, edema pulmonar ou parada respiratória. O dióxido de enxofre liquefeito, em contato com a pele, pode causar queimaduras (VALE, 2012).

Acredita-se que os efeitos do dióxido de enxofre são causados pela forma rápida com a qual o ácido sulfuroso é formado quando este composto entra em contato

com a umidade presente nas membranas mucosas das vias respiratórias e dos olhos (VALE, 2012). Os limites para exposição aguda ao dióxido de enxofre, conforme seus valores de LOC (Níveis Tóxicos de Preocupação), são apresentados na **Tabela 3**.

**Tabela 3:** Valores de LOC para o dióxido de enxofre.

LOC	Valor
IDLH	100 ppm
ERPG-3	25 ppm
ERPG-2	3 ppm
ERPG-1	0,3 ppm

**Fonte:** (NOAA, 2016).

Estudos de caso de acidentes com liberação de dióxido de enxofre e exposição de pessoas a este produto na atmosfera foram realizados por Li e colaboradores (2014), Devalia e colaboradores (1994), Sunyer e colaboradores (2003) e por Spix e colaboradores (1998). Os resultados mostram o alto potencial de fatalidades para exposições a curto prazo e registros de sequelas a longo prazo, restringindo a capacidade de funcionamento de seus sistemas respiratórios.

Em caso de exposição a este produto deve-se, primeiro, remover a vítima do local de exposição, irrigar os olhos e a pele com quantidades volumosas de água e administrar oxigênio por meio de sistema de ar mandado, caso dificuldades respiratórias sejam observadas. Por fim, deve-se encaminhar a vítima para um hospital para observação, de forma a garantir que qualquer edema pulmonar que possa ser formado posteriormente seja devidamente tratado (VALE, 2012).

Além de tóxico, o dióxido de enxofre também é um poluente ambiental significativo. Ele exerce uma grande influência no clima do planeta por meio da alteração da composição química das camadas da atmosfera. Uma grande camada de particulados de sulfato contribui para aumentar a radiação solar refletida de volta para o espaço (RAY e KIM, 2014).

Em altitudes mais próximas do solo, uma grande quantidade de dióxido de enxofre ajuda a aumentar a mortalidade por doenças cardiorrespiratórias na população exposta (KATSOUYANNI, TOULOUMI, *et al.*, 1997). De acordo com a legislação brasileira, o limite de exposição crônica a SO<sub>2</sub> na atmosfera é de 4 ppm ou 10 mg/m<sup>3</sup> por um período de até 48 horas (MTE, 2014).

O processo de moagem por via úmida utiliza entre 1,1 e 2,0 kg de SO<sub>2</sub> por tonelada de milho. Mesmo sendo dissolvido na água de processo, o odor pungente deste gás ainda está presente no lodo ao longo do processo. Por isso, todo o processo deve ser fechado e possuir exaustão de ar em todos os equipamentos. O ar extraído deve ser enviado para uma coluna de lavagem alcalina de gases para, então, ser enviado para a atmosfera livre do contaminante. Apesar de diversos pontos de emissão deste gás já terem sido identificados nos processos de moagem, não existem dados disponíveis para quantificar as emissões individuais provenientes de cada um deles (EPA, 1995).

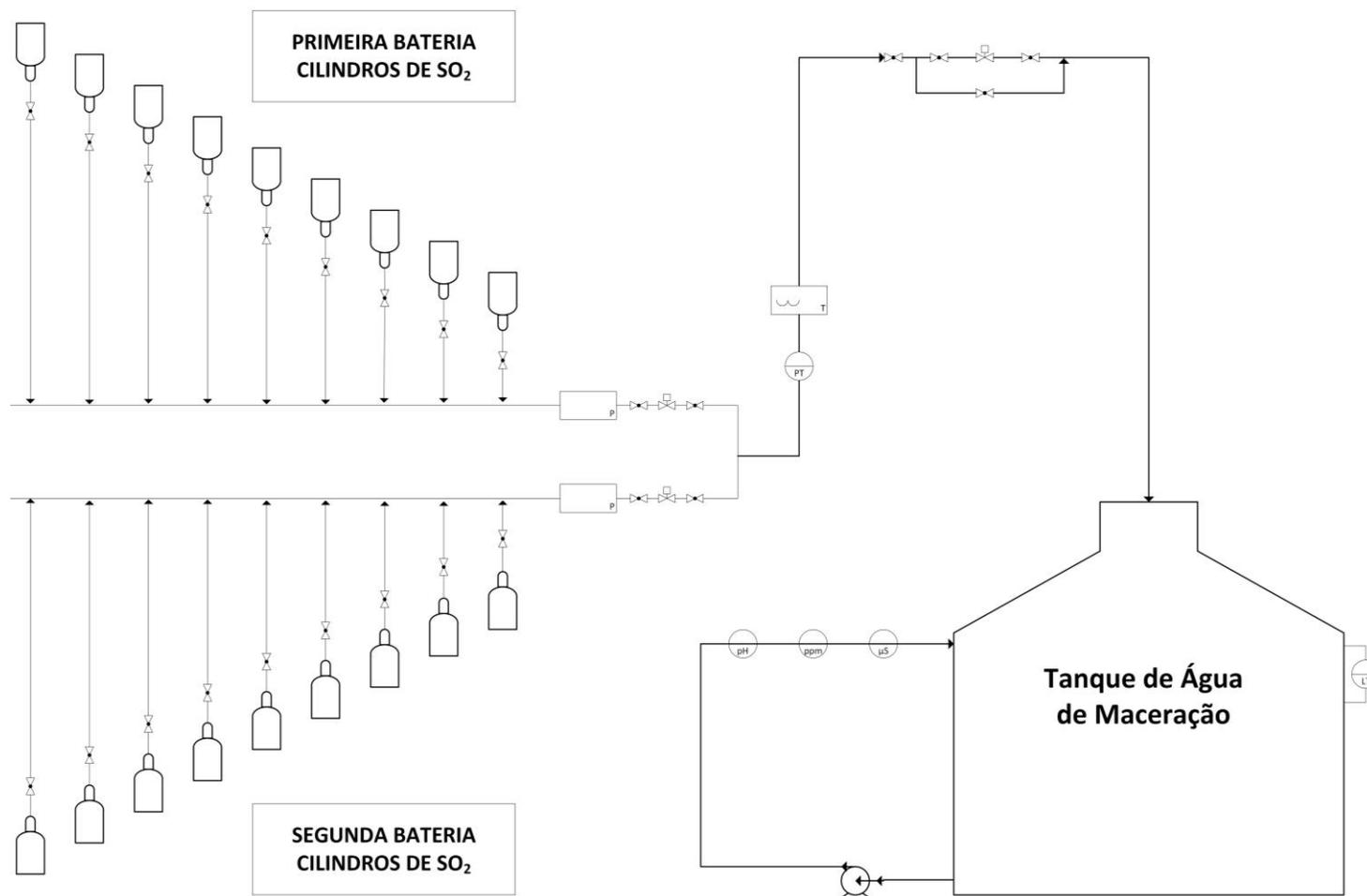
### **3.2 Utilização de SO<sub>2</sub> na Cargill**

O processo de moagem por via úmida utilizado pela Cargill não é diferente dos demais processos de moagem por via úmida utilizados em outras indústrias de processamento de milho encontrados na literatura, e segue as mesmas etapas iniciais descritas anteriormente. O sistema de alimentação de dióxido de enxofre, porém, possui algumas particularidades conforme apresentado na Figura 4.

Este sistema de alimentação é composto por duas baterias de nove cilindros, totalizando dezoito cilindros conectados ao processo. Cada cilindro possui 900 kg de produto (desconsiderando o peso do cilindro vazio), e todos os nove cilindros permanecem alinhados para o sistema simultaneamente através de válvulas manuais. A segunda bateria permanece conectada ao sistema de alimentação, porém com as válvulas manuais fechadas. Em momento nenhum as duas baterias alimentam o sistema simultaneamente (CARGILL, 2010).

Um indicador de pressão local está presente para cada bateria e indica a presença de SO<sub>2</sub> no sistema. À medida em que a pressão da bateria se aproxima de zero, é o indicativo de que o dióxido de enxofre naquela bateria está no final e a outra bateria deve ser utilizada. A única fonte de pressão no sistema é a pressão interna do produto nos cilindros de armazenamento. O alinhamento da bateria é feito por meio de uma válvula automática ativada pela sala de controle e de manobras de abertura e fechamento das respectivas válvulas manuais. Existem duas válvulas manuais, uma antes e uma após a válvula automática, que também são fechadas para garantir o isolamento adequado da bateria que não está alimentando o processo (CARGILL, 2010).

**Figura 4:** Alimentação de SO<sub>2</sub> ao sistema de maceração.



Fonte: (CARGILL, 2010).

Cada bateria alimenta a linha de processo que leva o dióxido de enxofre até o tanque de água de maceração. Este tanque contém água reaproveitada de outras etapas do processo de moagem, que recebe o SO<sub>2</sub> para alimentar os tanques de maceração. A linha de alimentação do tanque possui um transmissor de pressão e um transmissor de temperatura para verificação dos parâmetros do dióxido de enxofre que entra no tanque. Além disso, durante diversos trechos da tubulação estão presentes resistências elétricas para garantir que a vaporização do produto no interior da tubulação não cause seu congelamento. Todos os trechos com resistência elétrica possuem isolamento térmico na tubulação para melhorar a eficiência de troca térmica.

O dióxido de enxofre é alimentado ao tanque por meio de uma válvula de controle, que mantém uma vazão aproximada de 1800 kg/dia para o tanque de água de maceração. Essa válvula possui uma linha de *by-pass* e válvulas manuais na alimentação e na saída da válvula para retirada desta válvula para manutenção. Um medidor de pH, um condutivímetro e um medidor de concentração (expresso em ppm) presentes em uma linha de recirculação da água de maceração de volta para o tanque controlam a abertura da válvula de alimentação de SO<sub>2</sub> de forma a manter o pH e a concentração sempre constantes no interior do tanque (CARGILL, 2010).

Cada bateria é consumida, em média, a cada cinco dias, sendo substituída pela outra bateria no sexto dia. Toda a troca de alinhamento é feita de forma manual pelo operador no local de armazenamento dos cilindros. O armazenamento é segregado dos demais equipamentos de processo, em local aberto, ventilado e isolado, com restrição de acesso permitindo a entrada apenas de pessoas autorizadas. Há sistema de detecção de SO<sub>2</sub> na área indicando vazamento do produto na sala de controle do processo, porém sem intertravamento com as válvulas de alimentação. Para realização da atividade de substituição dos cilindros, é necessário que o operador esteja utilizando os EPI (Equipamentos de Proteção Individual) adequados que garantam sua proteção respiratória para fuga rápida caso ocorra um vazamento acidental (CARGILL, 2010).

Os cilindros são recebidos com a mesma frequência com a qual são consumidos. Uma bateria é recebida em caminhão a cada seis dias. A operação de descarregamento dos cilindros demanda que o operador suba na carroceria do caminhão para empurrar os cilindros até os garfos da empilhadeira. Esta atividade é feita com o auxílio de uma barra de ferro, e com a utilização de todos os EPI necessários. O cilindro, após ser posicionado sobre os garfos da empilhadeira, é levado até o ponto de

conexão à bateria, onde há um suporte individual para cada um dos cilindros. Os cilindros vazios são carregados de volta ao caminhão e encaminhados para serem reabastecidos pelo fornecedor (CARGILL, 2010).

A alimentação de dióxido de enxofre ao sistema é feita através de tubo pescador, que alimenta o produto diretamente no fundo do tanque, favorecendo sua solubilização em água e evitando sua dispersão para a atmosfera, independente do volume de água no tanque. Este tanque serve como pulmão para todos os tanques de maceração de milho presentes na fábrica. Este tanque ainda é interligado a um lavador alcalino de gases que tem por objetivo diminuir as emissões de dióxido de enxofre para a atmosfera e diminuir tanto o impacto ambiental como a exposição ocupacional dos funcionários no local (CARGILL, 2010).

Este sistema real foi utilizado, conforme este descritivo do processo, para o estudo de caso e elaboração dos cenários de desvio com consequente liberação de dióxido de enxofre. Ferramentas de simulação foram utilizadas para prever as quantidades liberadas de produto para cada um destes cenários.

## **4 MATERIAIS E MÉTODO**

As instalações industriais que processam, manipulam ou transportam substâncias perigosas estão sujeitas a diferentes acidentes e, apesar das técnicas empregadas e das medidas tomadas para evitar tais acidentes, não é possível reduzir completamente o risco. Sempre é observada alguma probabilidade finita de ocorrer uma falha com consequências potencialmente graves para as pessoas ou para o meio ambiente.

As Avaliações de Risco do Processo (PRA) são usadas para identificar, avaliar e desenvolver métodos para controlar riscos significativos associados a processos e operações perigosas. Estes riscos geralmente incluem o potencial de incêndios, de explosões, de reações químicas não intencionais ou descontroladas, outras liberações perigosas de energia e/ou a liberação de materiais tóxicos, riscos térmicos, riscos de asfixia ou menores riscos de exposição química.

Como forma de se estudar a aplicação das metodologias de análise de risco no âmbito da Segurança de Processos para processos químicos, foi utilizado um sistema existente e foram desenvolvidos os possíveis cenários de desvios da operação normal com potencial para acarretar em liberação de produto ou energia a partir dos parâmetros e modos de operação. O sistema escolhido foi o de armazenamento e alimentação de SO<sub>2</sub> à etapa de maceração no processo de moagem úmida de milho da fábrica da Cargill Agrícola em Uberlândia, Minas Gerais.

### **4.1 Avaliação de Risco do Processo**

Uma Avaliação de Risco do Processo (PRA) é uma ferramenta eficaz para identificar, avaliar e determinar quais controles estão em vigor e se forem necessários controles adicionais em vários momentos e estágios no ciclo de vida de um processo. As PRAs incluem as atividades de identificação de perigos, classificação de perigos, avaliação de consequências e elaboração de recomendações.

As PRAs normalmente são conduzidas por uma equipe multidisciplinar. Para este estudo todas as discussões foram conduzidas na empresa juntamente com representantes das equipes de Produção, Engenharia, Manutenção, Automação e Instrumentação, Elétrica, Meio Ambiente, Segurança e Segurança Alimentar ligadas ao processo.

A equipe de PRA realizou uma avaliação sistemática e abrangente do processo para: identificar as causas ou eventos iniciais e a sequência do evento para cada evento perigoso; identificar quais eventos perigosos podem ocorrer potencialmente; identificar as salvaguardas existentes contra esses eventos; e caracterizar a independência e confiabilidade de salvaguardas significativas. A **Figura 5** apresenta o fluxo de etapas que foi seguido na realização deste estudo de PRA e quais as metodologias e ferramentas auxiliares para cada uma das etapas.

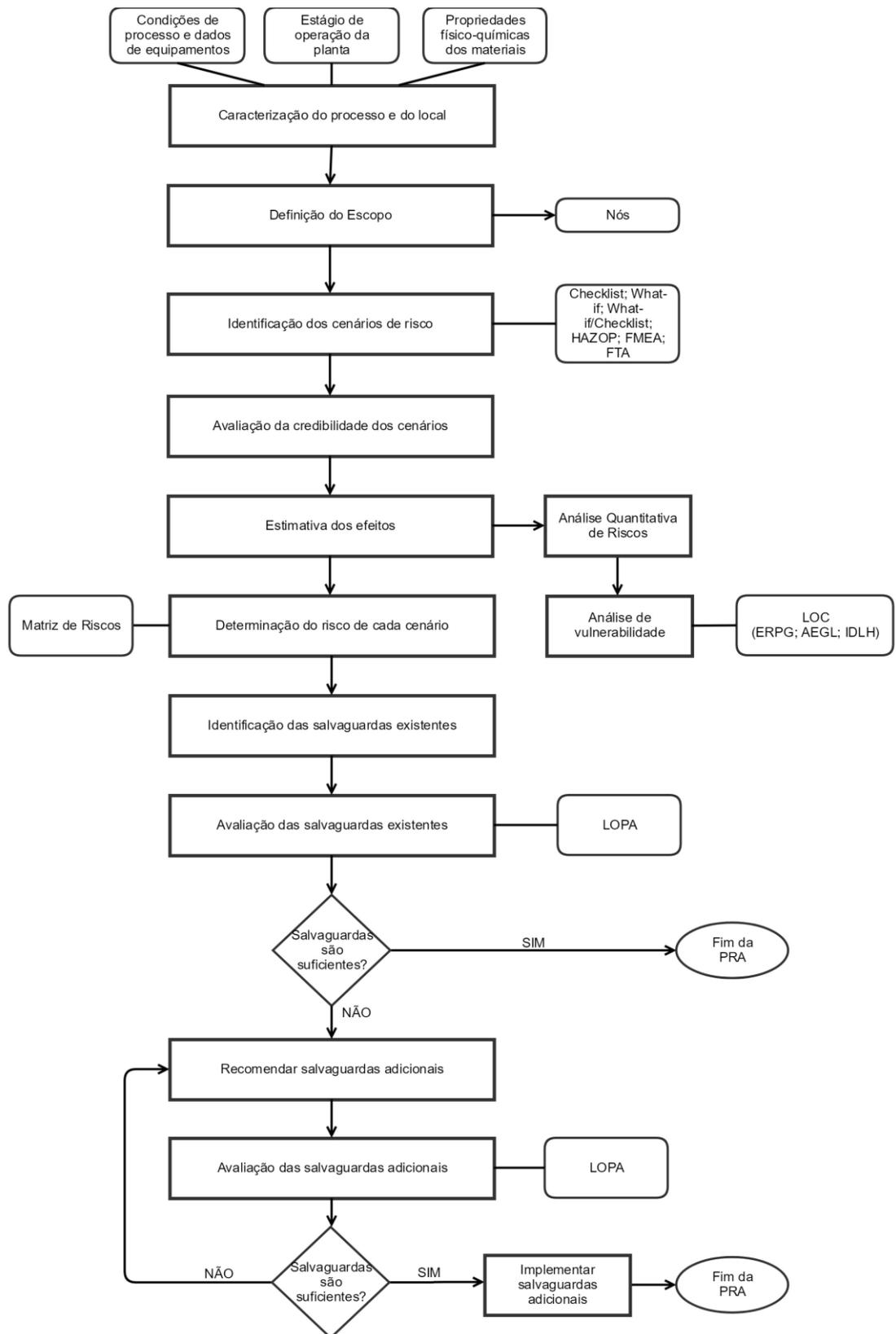
Para realização da PRA, deve-se selecionar e aplicar os métodos adequados de avaliação de perigo para o processo sob revisão. Para a Análise de Risco do Processo do sistema de dióxido de enxofre da Cargill foi escolhida a metodologia de *What-If / Checklist* devido à simplicidade do processo em análise. Metodologias mais complexas e estruturadas, como o HAZOP, poderiam ter sido selecionadas, porém, como parte da análise envolve o processo de descarregamento e substituição de cilindros vazios por novos cilindros cheios, as palavras-chave da metodologia de HAZOP poderiam não se aplicar completamente.

O objetivo da avaliação de risco é identificar cada cenário perigoso específico, as rotas específicas para cada cenário perigoso e as salvaguardas existentes que protegem contra cada cenário. O cenário de preocupação foi descrito na seguinte sequência:

1. Evento iniciador - uma descrição específica do desvio de processo que ocorre.
2. Progresso do evento – como os parâmetros do processo irão se comportar a partir da ocorrência do evento iniciador.
3. Consequência de interesse – a quantidade e o impacto da liberação.

As consequências do evento foram estimadas supondo que nenhuma das salvaguardas ou camadas de proteção existentes no processo funcionam adequadamente. Isso é feito para que se entenda qual a pior consequência possível para cada cenário de forma a garantir que as salvaguardas protejam contra a pior delas.

**Figura 5:** Fluxo de trabalho do estudo de PRA.



Para realização deste estudo de análise de risco do processo, foram consideradas as seguintes premissas:

- Apenas seriam propostas mudanças ao projeto, caso ele não atendesse às normas e requisitos aplicáveis;
- Para todos os nós identificados, as causas dentro do nó e suas consequências dentro e fora dos nós seriam analisadas;
- A eficácia dos procedimentos de operação e manutenção não foi analisada, considerando-se possibilidade de erro humano durante as atividades que necessitam de intervenção manual do operador;
- Eventos causados por sabotagem não foram considerados;
- As causas foram, em princípio, baseadas em falhas únicas; e
- As consequências financeiras e de planejamento não seriam avaliadas durante as sessões.

O primeiro passo para iniciar o estudo de PRA foi a determinação do escopo da análise e a obtenção de todas as informações relevantes sobre os produtos manipulados, equipamentos, controles e instrumentação e condições de processo. Para esta análise todos os dados foram apresentados no Capítulo 03 deste trabalho. Os nós relevantes para este estudo foram determinados a partir do descritivo de operação, conforme apresentado na **Tabela 4**.

**Tabela 4:** Nós definidos para estudo de PRA do sistema de SO<sub>2</sub>.

Número do nó	Processo	Descrição do nó
A	Recebimento de cilindros de SO <sub>2</sub>	Nove cilindros cheios de SO <sub>2</sub> são recebidos em um caminhão de carroceria aberta. Os cilindros vazios são desconectados do sistema e a bateria de cilindros cheia é conectada. Com o auxílio de uma empilhadeira os cilindros vazios são retirados do sistema e substituídos pelos cilindros cheios.
B	Armazenamento de SO <sub>2</sub>	Armazenamento da bateria de nove cilindros cheios enquanto aguarda o consumo da bateria em uso.
C	Alimentação de SO <sub>2</sub> para o processo	Alinhamento da bateria de nove cilindros para o processo e alimentação de dióxido de enxofre para o tanque de água de maceração. Parte da água de maceração passar por uma linha de recirculação, onde é feita amostragem, leitura de pH e de condutividade. O tanque possui um <i>vent</i> aberto para a atmosfera e uma conexão para um lavador alcalino de gases.

A partir dos nós definidos, é feita a identificação dos eventos iniciadores. Pela metodologia de *What-If / Checklist*, é necessário estabelecer quais são os desvios de processo que serão utilizados como guia para definição destes eventos iniciadores. Através do *brainstorming* com a equipe multidisciplinar, definiu-se um padrão de desvios que seriam analisados em cada nó. A **Tabela 5** apresenta os desvios escolhidos e a definição para cada um deles.

**Tabela 5:** Desvios definidos para metodologia de *What-If / Checklist*.

<b>Desvio padrão</b>	<b>Caracterização do desvio</b>
Problemas no material	Inclui desvios nas especificações ou nas características do produto (por exemplo, viscosidade, umidade, presença de objetos estranhos, reação ou etapa de purificação não completada como esperado ou incompatibilidade de materiais).
Efeitos ou influências externas	Inclui eventos causados por condições climáticas extremas (ventania, alagamento, calor ou frio excessivo, umidade) ou eventos externos (por exemplo, incêndio em unidades próximas).
Erros operacionais ou outros fatores humanos	Inclui desvios de procedimento operacional padrão, permissões de serviço, características das atividades, treinamento adequado e questões relacionadas à ergonomia e ao ambiente de trabalho (incluindo fatores que podem induzir ao erro ou causar sobrecarga e fadiga). Neste desvio são considerados erros para atividades operacionais bem como para atividades de manutenção.
Erro de medição ou de amostragem	Inclui erros provenientes de atividades de medição ou amostragem no processo.
Falha de equipamentos ou instrumentação	Inclui falhas que podem ocorrer nos equipamentos de controle e nos sistemas de automação do processo.
Desvio de parâmetros do processo	Inclui todos os eventos causados por desvios dos parâmetros determinados para o processo (variação de pH, viscosidade, temperatura, pressão, etc.).
Falha de utilidades	Inclui eventos causados por falha ou ausência de ar de instrumentação, ar comprimido, aquecimento, resfriamento, ventilação, exaustão, energia elétrica e vapor, dentre outros.
Falha na integridade ou perda de contenção	Inclui falhas relacionadas à integridade física dos materiais (corrosão, falhas catastróficas) e das estruturas que podem levar à uma liberação imediata de produto.
Operação em situações de emergência	Inclui as atividades que devem ser realizadas em situações de emergência e os riscos relacionados a estas atividades.

#### 4.1.1 Identificação dos eventos iniciadores

Usando a metodologia de PRA escolhida, foi feita a identificação dos cenários de risco para cada segmento do processo. A identificação do perigo incluiu as condições que ocorrem durante as atividades de partida, desligamento, limpeza e manutenção, bem como durante o funcionamento normal. Além disso, todos os equipamentos que transportam o material perigoso (caminhão, vagão ferroviário), enquanto estiverem no local, também foram incluídos no escopo da avaliação.

A localização da instalação foi considerada para compreensão dos riscos aos quais os ocupantes dos edifícios em um sítio e meio ambiente estão expostos como resultado de eventos relacionados ao processo. Fatores humanos que incluem todos os aspectos significativos de como os seres humanos interagem com seu ambiente de trabalho, em situações de rotina e de emergência, também foram incluídos na análise.

Para cada perigo identificado foi feita uma avaliação da credibilidade dos seus cenários, ou seja, foram identificados todos os riscos que tivessem um potencial real para acontecer (variando do pior caso a níveis mais baixos de perigos). A frequência ou probabilidade percebida de ocorrência não foi utilizada como o único motivo para definir a credibilidade de um perigo, pois o fato de ele nunca tendo sido observado no histórico de acidentes de uma fábrica ou empresa não impede que ele venha a ocorrer.

Para cada evento iniciador foi desenvolvido um sentido qualitativo da probabilidade de ocorrência, aplicando a metodologia avaliação de perigos (*What-If / Checklist*) por meio dos estágios de identificação de perigos, definição de evento perigoso e análise de salvaguardas. Esta informação, em combinação com os resultados da análise de consequências, permitiram uma avaliação qualitativa dos riscos associados a cada evento. A **Tabela 6** apresenta alguns exemplos de frequências típicas para eventos iniciadores.

#### 4.1.2 Estimativa das consequências

Uma vez que os perigos foram identificados, é importante compreender as consequências de cada cenário. Para os casos onde há vários tipos de consequências para um perigo, eles foram separados para que o risco de cada consequência pudesse ser considerado individualmente. Também foi identificada a causa do perigo para efetivamente mitigá-lo com salvaguardas.

**Tabela 6:** Frequências típicas para eventos iniciadores.

<b>Evento iniciador</b>	<b>Frequência típica da literatura (eventos/ano)</b>	<b>Comentários sobre as frequências</b>
Ruptura de vaso de pressão	$10^{-5}$ a $10^{-7}$	Valor típico utilizado para a ruptura aleatória de um vaso de pressão
Ruptura de tubulação de 100 m – ruptura total	$10^{-5}$ a $10^{-6}$	Valor típico utilizado para a ruptura aleatória total de um tubo de 100 m
Falha de tanque atmosférico	$10^{-3}$ a $10^{-5}$	Valor típico utilizado para a falha aleatória de um tanque atmosférico
Falha na junta	$10^{-2}$ a $10^{-6}$	Valor típico utilizado para falha de juntas
Impacto externo	$10^{-2}$ a $10^{-4}$	Valor típico utilizado para impacto externo (por retroescavadeira, veículo ou outro)
Queda de carga de guindaste	$10^{-3}$ a $10^{-4}$ /elevação	Valor típico utilizado por elevação para uma queda de carga do guindaste. Esse valor é ajustado, multiplicando-o pelo número de elevações por ano
Relâmpago	$10^{-3}$ a $10^{-4}$	Valor típico utilizado para relâmpago
Abertura espúria de válvula de segurança	$10^{-2}$ a $10^{-4}$	Valor típico utilizado para abertura espúria de válvula de segurança
Falha na água de resfriamento	1 a $10^{-2}$	Valor típico utilizado para falha na água de resfriamento
Falha no selo de bomba	$10^{-1}$ a $10^{-2}$	Valor típico utilizado para falha aleatória em selo de bomba
Falha na mangueira de descarregamento/ carregamento	1 a $10^{-2}$	Valor típico utilizado para falha na mangueira de descarregamento/ carregamento
Falha no regulador	1 a $10^{-1}$	Valor típico utilizado para uma falha do regulador
Falha no loop de instrumentação BPCS	1 a $10^{-2}$	Valor típico utilizado para falha no loop de instrumentação BPCS
Perda de energia elétrica	$10^{-2}$	Sistemas de alimentação elétrica dupla
Perda de nitrogênio	$10^{-1}$	Fornecida através de tubulação
Falha do operador (para executar um procedimento de rotina completo, operador bem treinado, sem tensão, não cansado)	$10^{-1}$ a $10^{-3}$ /oportunidade	Valor típico utilizado por oportunidade para a falha do operador para executar um procedimento de rotina completo, assumindo que o operador está bem treinado, sem tensão e não está cansado. Este valor é ajustado, multiplicando-o pelo número de oportunidades por ano.

**Fonte:** (CCPS, 2014c - adaptado).

Todas as consequências e seus efeitos são determinadas, normalmente, de forma qualitativa. Em alguns casos, entretanto, é necessário utilizar ferramentas quantitativas para conseguir determinar com maior precisão a real consequência de um

evento. Por exemplo, para se compreender as consequências de uma liberação de substância perigosa a fim de se determinar a severidade potencial de um evento e desenvolver ações mitigadoras adequadas, fez-se necessária a realização de um estudo para estimativa das consequências. Este estudo foi obtido por meio da utilização das metodologias de Avaliação Quantitativa de Riscos (QRA) aplicadas aos cenários específicos de liberação desenvolvidos no PRA.

#### 4.1.3 Determinação do risco de cada cenário

Uma vez identificado o cenário e determinada a sua consequência, uma matriz de risco foi utilizada para avaliar o risco inicial ou absoluto. O risco absoluto foi determinado localizando a interseção da consequência e frequência do evento iniciador sem salvaguardas. Um exemplo de matriz de risco genérica é apresentado na **Figura 6**. O risco absoluto é determinado considerando que nenhuma salvaguarda está disponível para evitar que o evento ocorra ou para diminuir suas consequências.

**Figura 6:** Modelo genérico de matriz de risco para cenários de PRA.

		PROBABILIDADE DO EVENTO								
		A	B	C	D	E				
SEVERIDADE DO EVENTO		Pessoas	Ativos	Meio Ambiente	Público	Improvável	Remoto, mas não impossível	Provável de acontecer na vida útil da planta	Ocorre com pouca frequência	Ocorre frequentemente
	5. Catastrófico	Múltiplas fatalidades ou lesões permanentes	Falha catastrófica	Liberação em grande escala fora do site	Possibilidade de fatalidades ou lesões fora do site					
	4. Severo	Única fatalidade ou lesão permanente	Dano de grandes proporções	Liberação em pequena escala fora do site	Evacuação ou medidas protetivas da comunidade, sem lesões					
	3. Crítico	Danos ou exposição com afastamento	Dano de pequenas proporções	Liberação a níveis reportáveis	Sem efeitos					
	2. Menor	Danos ou exposição com atendimento médico	Danos leves	Liberação contida, sem contaminação de água, solo ou afetando a qualidade do ar	Sem efeitos					
1. Insignificante	Danos ou exposição com primeiro socorros ou sem efeitos	Sem danos	Sem efeitos	Sem efeitos						

**Fonte:** (KULKARNI, 2016 - adaptado).

#### 4.1.4 Identificação e avaliação das salvaguardas

A partir da avaliação inicial do risco (assumindo que não existem salvaguardas), foram identificadas as salvaguardas existentes no sistema para verificar se elas eram capazes de mitigar o risco identificado. Nas Tabela 7 e Tabela 8 são

apresentados exemplos de salvaguardas consideradas válidas e não válidas em uma análise de risco do processo. Para definir se as salvaguardas são suficientes, deve-se analisar as seguintes características:

- Detecção: a salvaguarda pode detectar a condição que exige que ela aja?
- Tempo de Resposta: a salvaguarda pode detectar a condição a tempo de tomar medidas corretivas que impeçam as consequências?
- Capacidade: a salvaguarda tem capacidade adequada para que tome as medidas necessárias no tempo disponível?
- Força: a força da salvaguarda é adequada? A força de uma salvaguarda pode consistir em força física (por exemplo, de uma parede de explosão), capacidade de uma válvula para atuar (força da mola da válvula) ou força humana (para fazer a tarefa necessária).

**Tabela 7:** Exemplos de salvaguardas válidas.

Salvaguarda	Comentários
Válvula de alívio	Previne que o sistema exceda a sobrepressão especificada. A eficácia deste dispositivo é sensível ao serviço.
Disco de ruptura	Previne que o sistema exceda a sobrepressão especificada. A eficácia deste dispositivo é sensível ao serviço.
Sistema de Controle Básico de Processo (BPCS)	Pode ser considerado uma salvaguarda se não estiver associado ao evento iniciador considerado.
Dique de contenção	Reduz a frequência de grandes consequências (grande derramamento) de um transbordo de tanque, ruptura, derramamento ou outro evento se a substância for um líquido.
Sistema de drenagem subterrânea	Reduz a frequência de grandes consequências (grande derramamento) de um transbordo de tanque, ruptura, derramamento ou outro evento.
Vent aberto (ou ausência de válvulas)	Previne pressão excessiva.
Material à prova de fogo	Reduz a taxa de entrada de calor e proporciona tempo adicional para despressurização, combate a incêndio ou outras atividades.
Proteção contra explosão	Reduz a frequência de grandes consequências de uma explosão por meio do seu confinamento e protege equipamentos, edifícios e outros materiais.
Corta-chamas	Se devidamente projetado, instalado e mantido, elimina o potencial de propagação de chama através de um sistema de tubulação ou dentro de um vaso ou tanque.

**Fonte:** (CARGILL, 2015a - adaptado).

**Tabela 8:** Exemplos de salvaguardas não consideradas válidas.

Salvaguarda não válidas	Comentários
Treinamento e certificação	Esses fatores podem ser considerados na avaliação da probabilidade de falha para a ação do operador, mas não são, por si só, uma salvaguarda.
Procedimentos	Esses fatores podem ser considerados na avaliação da probabilidade de falha para a ação do operador, mas não são, por si só, uma salvaguarda.
Rotina de testes e inspeções	Testes e inspeções não são salvaguardas. Espera-se que essas atividades estejam em vigor para todas as avaliações de perigo e constituem a base para julgamento para determinar as probabilidades de falha. Aumentar os intervalos de teste e inspeção pode aumentar a probabilidade de falha.
Manutenção	Espera-se que esta atividade esteja em vigor para todas as avaliações de perigo e constitui a base para o julgamento para determinar a probabilidade de falha de uma salvaguarda.
Comunicação	Espera-se que existam comunicações adequadas em uma instalação.
Sinalização	Os sinais por si só não são salvaguardas. Os sinais podem não estar claros, obscuros e/ou ignorados.
Proteção contra incêndio	A proteção ativa contra incêndio geralmente não é considerada uma salvaguarda, pois é ativada após o evento para a maioria dos cenários e sua disponibilidade e eficácia podem ser afetadas pelo fogo e / ou explosão que se pretende conter. Nota: A proteção contra incêndio pode ser uma salvaguarda de mitigação, pois ele tenta evitar uma consequência maior após um evento que já ocorreu.
Resposta de emergência da planta	Os bombeiros, os sistemas manuais de dilúvio, os procedimentos de evacuação etc. normalmente não são consideradas salvaguardas, uma vez que são ativados após a liberação inicial. Há também muitas variáveis, como o tempo de resposta e a adequação da resposta, afetando sua eficácia para mitigar um cenário.
Resposta de emergência da comunidade	A resposta comunitária, a evacuação e o abrigo no local não são normalmente consideradas salvaguardas, uma vez que são ativados após a liberação inicial e existem muitas variáveis que afetam sua eficácia. Eles também não oferecem proteção para o pessoal da planta.
Requisito de que a informação esteja disponível e entendida	Este é um requisito básico e não uma salvaguarda.
Projeto inerentemente mais seguro	Pode eliminar um cenário ou pode alterar a frequência do evento iniciador ou a taxa de falha, mas não é, por si só, uma salvaguarda.

**Fonte:** (CARGILL, 2015a - adaptado).

Além de avaliar essas características, para cenários de maior severidade é aconselhável a utilização de uma metodologia de LOPA para verificação da eficácia das salvaguardas. Essa metodologia fornece uma estimativa geral da frequência dos cenários específicos de eventos perigosos ao comparar a frequência de ocorrência do evento iniciador com a probabilidade de falhas da salvaguarda relevante. A utilização da

metodologia de LOPA garante que a avaliação da eficácia da salvaguarda não seja feita apenas de forma qualitativa, atribuindo um caráter semiquantitativo à análise.

Caso as salvaguardas existentes não sejam suficientes para impedir a ocorrência do evento iniciador ou para mitigar as consequências do cenário, devem ser feitas recomendações para a implementação de salvaguardas adicionais de forma a garantir a operação segura do processo em questão.

A fim de minimizar as consequências das liberações de substâncias perigosas, é necessário desenvolver planos de resposta de emergência que permitam proteger os afetados. No caso particular de substâncias tóxicas (sejam emissões ou vapores gasosos produzidos por derramamentos de líquidos voláteis) é importante estabelecer o contorno da nuvem formada, a fim de delimitar as áreas em que a concentração desta substância põe em perigo a integridade das pessoas.

#### **4.2 Avaliação Quantitativa de Riscos para estimativa das consequências**

A prevenção e a simulação de vazamentos químicos tornaram-se um dos tópicos mais importantes nos campos de proteção ambiental e de Segurança de Processos. Neste trabalho, o *software* ALOHA (*Areal Location Of Hazardous Atmospheres*) foi escolhido para simular a liberação de dióxido de enxofre proveniente do processo de moagem por via úmida da unidade produtiva da Cargill Agrícola localizada na cidade de Uberlândia, Minas Gerais. Foi utilizada a versão 5.4.7 do modelo ALOHA, que foi a última versão publicada pelos desenvolvedores em setembro de 2016, obtida gratuitamente no site da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América.

Diversos modelos e algoritmos computacionais podem ser utilizados para estudos de modelagem e análise de consequências. O Escritório de Meio Ambiente, Segurança e Saúde do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América indica seis diferentes ferramentas para realização destes estudos, entre elas o *software* ALOHA. Um estudo comparativo entre a funcionalidade destas ferramentas realizado por Thoman e colaboradores (2006) apontou que o ALOHA é baseado em modelos mais detalhados e complexos, enquanto as demais ferramentas obtêm melhores resultados quando utilizadas apenas para uma triagem mais simples dos problemas. Além disso, a habilidade e a experiência do usuário geralmente podem superar a maioria

das diferenças entre as funcionalidades destas ferramentas. Por este motivo, o ALOHA foi escolhido para utilização neste estudo.

O modelo de dispersão ALOHA foi desenvolvido em conjunto por diversas organizações dos Estados Unidos da América, incluindo a Agência de Proteção Ambiental (EPA), o Escritório de Resposta e Restauração da Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA) e o Gabinete de Prevenção e Preparo para Emergências Químicas (CEPPO). Por meio do ALOHA, é possível simular a dispersão tanto de gases neutros como de gases pesados (EPA & NOAA, 2007).

Este *software* usa o modelo gaussiano para prever a dispersão de gases neutros (densidade próxima à densidade do ar em temperatura ambiente) considerando uma distribuição de concentração como mostrado pela Equação 01 abaixo. Segundo este modelo, o vento e as turbulências atmosféricas são as forças que movem as moléculas do gás liberado durante o vazamento (EPA & NOAA, 2007).

$$\chi(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\}$$

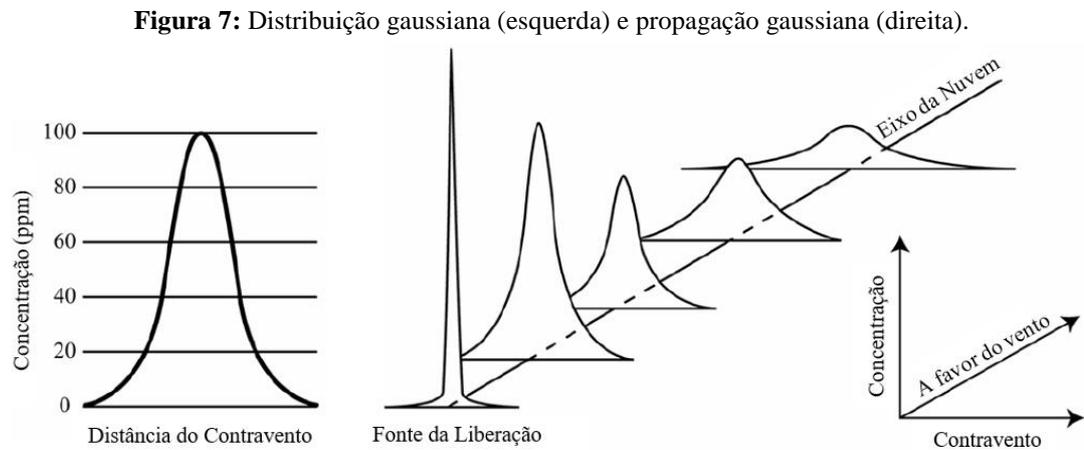
(Eq. 01)

Onde:

H	Altura de liberação efetiva (em relação à terra) em metros
Q	Taxa de liberação da fonte (mg/s) para liberações químicas
u	Velocidade média do vento (m/s)
x	Distância do vento (em relação à localização da fonte) em metros
y	Distância do contravento (em relação à linha central da pluma) em metros
z	Distância do eixo vertical (em relação à terra) em metros
$\pi$	Proporção numérica definida pela relação entre o perímetro de uma circunferência e seu diâmetro, onde $\text{Pi} = 3,14159265359$
$\sigma_y$	Coeficiente de dispersão horizontal (função de x), representando o desvio padrão da distribuição da concentração na direção do eixo do contravento, em metros
$\sigma_z$	Coeficiente de dispersão vertical (função de x), representando o desvio padrão da distribuição da concentração na direção do eixo vertical, em metros
$\chi$	Concentração atmosférica (mg/m <sup>3</sup> ) para lançamentos químicos

A pluma de propagação gaussiana clássica é um modelo de estado estável que requer uma liberação contínua do contaminante. A forma de pluma é obtida por meio da média probabilística do conjunto, aproximada por médias de tempo suficientes para

suavizar os efeitos sinuosos da pluma. A representação gráfica da pluma gaussiana é apresentada na **Figura 7**.



**Fonte:** (EPA; NOAA, 2007 - adaptado).

A equação para a pluma gaussiana é uma função apenas da velocidade média do vento (constante assumida) e dos desvios padrão do vento cruzado e vertical (MAZZOLDI, HILL e COLLS, 2008). Os coeficientes de dispersão horizontal e vertical ( $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ ) na equação são obtidos a partir de medidas meteorológicas específicas do local (por exemplo, desvios padrão dos ângulos do vento) ou por meio de curvas estabelecidas que se baseiam em experiências de campo e no conceito de classe de estabilidade atmosférica.

Uma vez que a velocidade do vento varia com a elevação, seu valor na equação de pluma gaussiana representa idealmente algum valor médio sobre a profundidade da pluma, como a velocidade do vento no centro de massa da pluma. Na prática, especificações mais simples são feitas, como a velocidade do vento na altura de liberação efetiva ou a velocidade do vento em alguma altura fixa tipicamente entre 2 e 10 m para uma liberação no nível do solo (THOMAN, O'KULA, *et al.*, 2006).

Os gases também podem ser classificados pelo sistema como sendo gases pesados, caso atendam uma das seguintes características: ter peso molecular maior do que o do ar, ser armazenado sob baixas temperaturas (criogenicamente), ou porque aerossóis são formados em quantidade suficiente durante a liberação para fazer com que a mistura se comporte como gás pesado (EPA & NOAA, 2007). A identificação de gases pesados pode ser feita tanto de forma automática pelo *software* ou manualmente por meio de seleção do usuário.

O modelo de dispersão para gases pesados utilizados pelo ALOHA é baseado no modelo DEGADIS criado por Spicer and Havens (1989). Este modelo foi elaborado com a capacidade de calcular apenas liberações em estado estacionário. Como as liberações calculadas pelo ALOHA são dependentes do tempo, uma adaptação do modelo de pluma de estado estacionário do DEGADIS foi feita para lidar com fontes variáveis no tempo. Sendo assim, o *software* ALOHA utiliza o sistema ALOHA-DEGASIS para modelagem de liberações de gases pesados (JONES, LEHR, *et al.*, 2013).

O modelo ALOHA-DEGADIS foi selecionado como base para os cálculos de gases pesado no *software* ALOHA devido à sua aceitação geral e aos extensos testes realizados por seus autores. A verificação de efetividade do modelo ALOHA-DEGADIS foi feita por meio de comparações com experimentos em campo, com o modelo original DEGADIS e com outros modelos de referência para modelagem de gases pesados (JONES, LEHR, *et al.*, 2013).

O *software* ALOHA foi construído especialmente para simular acidentes químicos e auxiliar no planejamento de emergência. Este *software* usa propriedades toxicológicas e físicas de produtos químicos liberados, bem como condições climáticas para prever distâncias de impacto de liberações tóxicas tóxicas. Após a determinação da área potencialmente afetada, mede-se a vulnerabilidade às liberações químicas tóxicas com base em variáveis socioeconômicas e características demográficas (CHEN e ZHAN, 2006). Ele permite ao usuário uma escolha de vários cenários de acidentes e, então, usa um algoritmo de origem apropriado para injetar material no ar durante um período de tempo limitado. O tempo de emissão da fonte pode variar entre os limites de um minuto a uma hora. É assumida uma terra plana e homogênea. Para fins de radiação solar e decisões diurnas/noturnas, o tempo é fixado no momento em que o vazamento começa (BHATTACHARYA e KUMAR, 2015).

A análise considerou a liberação não planejada de dióxido de enxofre a partir dos cilindros de armazenamento e de pontos frágeis ao longo do processo para analisar as consequências destes cenários. Os resultados foram apresentados de acordo com as diretrizes de planejamento de resposta de emergência (ERPG) e os valores correspondentes imediatamente perigosos para vida ou saúde (IDLH) e serão utilizados para futuras avaliações e comparações adicionais. O ERPG e o IDLH foram escolhidos como LOCs para esta análise por orientação da Cargill como forma de padronização dos

resultados, visto que todas as análises deste tipo realizadas na empresa são feitas utilizando estes dois LOCs.

A modelagem de fenômenos de dispersão envolve a resolução de balanços de massa, impulso e energia, gerando sistemas de equações diferenciais parciais cuja complexidade está associada à duração e ao tipo de emissão (contínua ou descontínua, gasosa ou em duas fases), tipo de substância (densidade maior ou menor do que o ar), condições atmosféricas, etc. Estes modelos permitem a previsão, em qualquer ponto de coordenadas  $(x, y)$  a uma certa distância da fonte, das concentrações da substância emitida.

No entanto, quando se deseja saber a dose, é necessário que o modelo estime uma nova função diferencial  $D(x, y)$  da concentração e o tempo de exposição ao mesmo. Em geral, os modelos de simulação de dispersão tóxica implementados nos programas mais difundidos não incluem o cálculo de doses ou o fazem usando metodologias simplificadas (CARRARI, APARICIO, *et al.*, 2004).

A área onde existe a possibilidade de exposição a vapores tóxicos, uma atmosfera inflamável, sobrepressão de uma explosão de nuvem de vapor ou radiação térmica de um incêndio são representadas graficamente como zonas de ameaça. As zonas de ameaças representam a área dentro da qual a exposição ao nível do solo excede o nível de preocupação especificado pelo usuário em algum momento após o início de uma liberação (JONES, LEHR, *et al.*, 2013).

Todos os pontos dentro da zona de ameaça apresentam uma exposição transitória que excede o nível de preocupação em algum momento após o lançamento. A avaliação das zonas de ameaça e seus impactos foram feitas por meio da projeção destas zonas de ameaça sobre a imagem de satélite da fábrica. Para este fim, foi utilizado o software *Google Earth Pro* na sua versão 7.1.5.1557, desenvolvido pela *Google Inc.* (GOOGLE, 2015). A partir da imagem de satélite foi possível visualizar quais as áreas afetadas dentro e fora da fábrica para cada uma das zonas de ameaça estabelecidas pela modelagem.

Como qualquer modelo, ALOHA não pode ser mais preciso do que a informação inserida pelo usuário. Caso não seja possível obter o valor mais preciso de um parâmetro, opta-se por trabalhar sempre com os valores que resultariam no pior cenário possível, ou então executar vários cenários e comparar os resultados (EPA & NOAA, 2007).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados das discussões realizadas com a equipe multidisciplinar durante as reuniões de Avaliação de Risco do Processo. Os resultados foram divididos de acordo com as seguintes etapas do PRA: determinação dos eventos iniciadores; estimativa das consequências; determinação dos riscos não mitigados; avaliação das salvaguardas existentes; e recomendações adicionais.

### 5.1 Determinação dos eventos iniciadores

Para cada desvio definido, aplicou-se a metodologia de *brainstorming* para definição dos possíveis eventos iniciadores. O Apêndice 1 apresenta a **Tabela 14** do PRA com todos os eventos iniciadores identificados nesta análise. Foram considerados apenas os cenários que podem ter impacto para pessoas ou para o meio ambiente; os cenários com impactos apenas de perda de produção ou danos aos equipamentos não foram analisados completamente. Todos os eventos iniciadores foram elaborados a partir das condições de operação do processo descritas no Capítulo 03. Os eventos iniciadores adicionais não relacionados com a operação são discutidos abaixo:

- **Erro humano:** todas as atividades que, se realizadas de forma incorreta, podem causar um cenário de risco foram consideradas neste estudo. Mesmo sendo uma atividade rotineira, efeitos adversos podem levar ao erro humano e, portanto, mesmo com treinamento adequado estes eventos iniciadores não podem ser desconsiderados.
- **Produto incorreto no cilindro:** a empresa que fornece o dióxido de enxofre para a Cargill também fornece outros gases para outros clientes. O gás mais perigoso fornecido em cilindros do mesmo modelo é o cloro.
- **Utilização do EPI incorreto para combate a emergência:** para operação de troca e conexão dos cilindros, o operador deve utilizar máscara semifacial com cartucho próprio para SO<sub>2</sub>. Porém, estas máscaras não são aconselháveis para contato com altas concentrações de SO<sub>2</sub> pois o tempo de saturação do elemento filtrante é rápido. Em casos de emergência, quando ocorre a liberação não esperada do produto, a concentração no local pode passar dos 100 ppm, o que causaria a saturação rápida do elemento filtrante. Essa máscara só deve ser utilizada, então, para fuga do local do vazamento para que seja possível retornar com o EPI adequado (sistema de respiração autônoma, por exemplo).

- **Fogo externo:** a área onde os cilindros de SO<sub>2</sub> são armazenados é toda circundada por processos que manipulam materiais combustíveis. Existem desvios nestes processos que podem gerar incêndios que, se não forem controlados, podem afetar os cilindros por meio da radiação térmica.
- **Falha de instrumentação e automação:** foram consideradas todas as possibilidades de falha (falha de leitura ou abertura) nos sistemas de instrumentação e automação que afetam os parâmetros de processo. As falhas foram generalizadas em falha da malha de controle, não sendo consideradas as falhas de cada um dos elementos da malha individualmente. Foi adotada uma frequência de falha padrão para malha de controle em todos os cenários.
- **Corrosão:** estudos feitos por Ruhl e Kranzmann (2013) mostram que, na presença de umidade, o SO<sub>2</sub> pode gerar ácidos condensados com consequente perdas de material e características de corrosão de metais. Por este motivo, foram considerados os cenários de vazamento através do flange e de corrosão no tubo pescador. Como as únicas conexões com flange se localizavam próximas à entrada da tubulação no tanque, foi considerado possível que, durante alguma parada da linha, umidade ambiente se acumule no interior da tubulação. Em contato com o dióxido de enxofre na retomada da alimentação pode causar corrosão pontual gradativa. O mesmo se aplica para o tubo pescador, que se encontra em contato direto tanto com a umidade como com o produto no interior do tanque. No caso da corrosão sob o isolamento térmico, foram considerados os efeitos de água de chuva acumulando no interior do isolamento e causando oxidação progressiva do material da tubulação.

Todas as frequências atribuídas aos eventos iniciadores definidos para este PRA foram feitas com base na experiência da operação do processo ou com base nas frequências referência estabelecidas pelo CCPS (2014) no livro *Guidelines for Initiating Events and Independent Protection Layers in Layer of Protection Analysis*, como exemplificado na **Tabela 6**.

## 5.2 Estimativa das consequências

A partir da definição dos eventos iniciadores e de suas progressões a consequências de interesse, determinou-se o nível de severidade de cada uma destas consequências. A seguir são discutidos cada um dos cenários e determinadas suas

severidades de acordo com os níveis estabelecidos na matriz de risco apresentada na **Figura 6** (página 48):

- **Incompatibilidade química:** o dióxido de enxofre é incompatível com a umidade (no cilindro ele se encontra na forma anidra) e com cloro (cenário de carregamento de produto errado no cilindro pelo fornecedor). Os efeitos da mistura de SO<sub>2</sub> com água já foram discutidos como causa de corrosão. Quando em contato com o cloro gasoso, a mistura é violenta e pode causar a pressurização do sistema, gerando produtos corrosivos, inflamáveis e tóxicos (AICHE, 2018).
- **Pequenos vazamentos:** cenários onde é possível ocorrer pequenos vazamentos possuem como consequência mais grave “Danos com exposição ou afastamento”. Devido ao seu cheiro pungente, é esperado que a pessoa detecte o cheiro e se afaste do local do vazamento. Por ser de fácil identificação, é esperado que o vazamento seja sanado antes de progredir para um evento de consequências maiores.
- **Grandes vazamentos:** não é possível determinar as consequências deste cenário apenas qualitativamente. Foram utilizadas ferramentas de modelagem para determinar a real consequência para cada cenário.
- **Lesões físicas:** devido ao grande peso dos cilindros, foram considerados os cenários com risco de lesão a pessoas pelo rolamento indevido dos cilindros. A consequência é mais grave quando isto ocorre no topo do caminhão, pois o operador corre risco de ser esmagado entre dois cilindros cheios.
- **Ruptura de tubulações e mangotes:** são considerados dois cenários de ruptura – as causadas por corrosão e a ruptura catastrófica. A ruptura por corrosão abre apenas um furo na tubulação, tendo sido considerados para efeito de simulação um furo do tamanho máximo de 20% do diâmetro da tubulação. No caso de ruptura catastrófica, é considerado um furo do tamanho do diâmetro da tubulação.

Por se tratar de uma metodologia totalmente qualitativa, não é possível determinar somente por meio da análise de *What-If / Checklist* qual o real impacto de alguns cenários. Para os eventos que podem levar a uma liberação de grandes quantidades de dióxido de enxofre seria necessária uma avaliação adicional para determinação das severidades.

O *software* ALOHA foi utilizado para determinar a severidade dos cenários que envolveram grandes liberações de dióxido de enxofre do PRA por meio da modelagem da nuvem de vapor liberada, conforme as características de cada cenário. A **Tabela 9** apresenta um resumo das hipóteses que foram consideradas para efeitos de modelagem, elaboradas a partir dos cenários identificados nas etapas anteriores do PRA.

**Tabela 9:** Descrição das hipóteses de modelagem de dispersão de nuvem de vapor.

Hipótese de Modelagem	Descrição	Cenários do PRA aplicáveis
Hipótese 1	Furo do cilindro pelo garfo da empilhadeira a uma altura de 10 cm da base do cilindro causando vazamento de SO <sub>2</sub> liquefeito pelo furo. Dimensões do furo: 50 x 20 mm.	A.2.1.1 / A.2.1.2
Hipótese 2	Furo parcial (20%) no mangote flexível de ½”, causando vazamento de SO <sub>2</sub> liquefeito pelo furo OU vazamento pela vedação da válvula do cilindro. Dimensão do furo: 0,1 polegadas.	C.5.1.1 / C.5.1.2 / C.8.1.1 / C.8.1.2
Hipótese 3	Rompimento do mangote flexível, causando vazamento de SO <sub>2</sub> liquefeito pelo furo OU vazamento por falha catastrófica da válvula do cilindro. Dimensão do furo: ½”.	A.3.1.1 / A.3.1.2 / B.3.1.1 / B.3.1.2 / C.8.2.1 / C.8.2.2
Hipótese 4	Furo parcial (20%) na tubulação de 1”, causando vazamento de SO <sub>2</sub> gasoso pelo furo. Dimensão do furo: 0,2 polegadas.	C.8.3.1 / C.8.3.2
Hipótese 5	Rompimento da tubulação, causando vazamento de SO <sub>2</sub> gasoso pelo furo. Dimensão do furo: 1”.	C.2.1.1 / C.2.1.2

A dispersão de uma nuvem de vapor poluente no ar depende fortemente das condições atmosféricas e de sua interação com o vapor formado. Fatores como a direção do vento, umidade relativa e temperatura irão determinar a direção, duração e tamanho da nuvem de vapor. A **Tabela 10** apresenta os dados meteorológicos para a cidade de Uberlândia, obtidos no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa do Instituto Nacional de Meteorologia do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

**Tabela 10:** Dados meteorológicos utilizados para configuração do *software* ALOHA.

Parâmetro	Valor considerado
Temperatura	Verão: 30 °C (dia) / 20 °C (noite) Inverno: 20 °C (dia) / 15 °C (noite)
Umidade Relativa	65%
Elevação do ponto de medida de velocidade do vento	10 m
Modelo de liberação	Liberação direta
Elevação da fonte de liberação	1,0 metro
Nebulosidade	Dia: parcialmente nublado (5) Noite: poucas nuvens (3)
Duração da liberação	60 minutos
Modelo de liberação	Dispersão de gás pesado
Rugosidade do terreno	Terreno urbano
Nível de estabilidade atmosférica	Dia: D Noite: F
Direção predominante do vento	Sudoeste
Velocidade do vento	Dia: 5 m/s Noite: 1 m/s

**Fonte:** (MAPA, 2018 - adaptado).

Além dos valores obtidos no Banco de Dados Meteorológicos, outras considerações foram necessárias para estabelecimento de alguns dos parâmetros. A elevação da fonte de liberação foi considerada como sendo de um metro devido à altura média de armazenamento dos cilindros de dióxido de enxofre no processo. A duração da liberação foi estabelecida como sendo de 60 minutos, valor padrão de simulação do *software* ALOHA e valor adotado para determinação dos diferentes níveis de ERPG. O gás foi considerado como sendo um gás pesado devido ao seu valor de densidade relativa de vapor (ver **Tabela 2**). Por último, os níveis de estabilidade atmosférica foram estabelecidos de acordo com a classificação de Pasquill (1961) a partir das condições climáticas da cidade de Uberlândia.

Além das condições climáticas no instante do vazamento, a dispersão da nuvem de vapor também depende das dimensões, da localização da ruptura no tanque por onde ocorre o vazamento e da quantidade liberada. A **Tabela 11** apresenta um resumo das características dos cilindros de armazenamento de dióxido de enxofre.

**Tabela 11:** Propriedades do sistema de SO<sub>2</sub> para modelagem no *software* ALOHA.

<b>Cilindros de SO<sub>2</sub></b>	
Peso do cilindro vazio	540 kg
Peso de produto	900 kg
Pressão de armazenamento de SO <sub>2</sub>	3,0 kgf/cm <sup>2</sup>
Pressão máxima de trabalho admitida para o cilindro de SO <sub>2</sub>	7,0 kgf/cm <sup>2</sup>
Dimensões do cilindro	770 x 2000 mm
Capacidade volumétrica do cilindro de SO <sub>2</sub>	0,720 m <sup>3</sup>
<b>Sistema de SO<sub>2</sub></b>	
Pressão média na linha de alimentação para o tanque	2,9 kgf/cm <sup>2</sup>
Temperatura média na linha de alimentação para o tanque	Temperatura ambiente
Concentração média de SO <sub>2</sub> na linha de alimentação para o tanque	2700 ppm

**Fonte:** (CARGILL, 2010).

A taxa de descarga depende de uma série de parâmetros, incluindo a área do orifício por onde ocorre o vazamento, a pressão fora e dentro do tanque, as propriedades físicas do gás, a temperatura do gás, a vazão com a qual ele é liberado e a presença ou não de evaporação súbita (“flasheamento”). Em um processo real, é esperado que a maior taxa de liberação ocorra no início do vazamento, diminuindo em função do tempo à medida em que a pressão no interior do cilindro de armazenamento diminui. A solução dinâmica em função do tempo exige um modelo de descarga mássica associado a um balanço de massa sobre o conteúdo do tanque, utilizando equações de estado para determinar a pressão no interior do tanque, dada a massa total. Efeitos complexos da temperatura também podem ser possíveis e demandam a associação de balanços de energia aos cálculos (CCPS, 1999). Para fins de estimativa das consequências de liberação, um esforço como esse pode não ser necessário para se obter um valor aproximado da realidade.

Um procedimento mais simples que foi considerado para esta modelagem foi calcular a taxa de descarga mássica no instante em que o vazamento ocorre e assumir que esta taxa é constante ao longo do período de liberação considerado. Para este cálculo são assumidos valores fixos de pressão e temperatura dentro do tanque iguais às pressão e temperatura iniciais. A taxa de descarga efetiva em momentos posteriores sempre será menor do que a inicial. Desse modo, assegura-se um resultado conservador

para a modelagem de dispersão das nuvens de dióxido de enxofre. A partir das condições de processo e de liberação, o *software* ALOHA é capaz de calcular com certa precisão a taxa de liberação.

Para a área do orifício, por outro lado, uma decisão possível é considerar a área da tubulação de maior diâmetro conectada ao tanque como área de liberação do produto, visto que as atividades de desconexão de mangotes flexíveis e tubulações do processo são fontes frequentes de vazamentos no processo. Para cenários de vazamentos provenientes de flanges, conexões, pontos de soldagem e pontos de desgaste na tubulação, o Grupo Banco Mundial (WORLD BANK, 1988) recomenda utilizar 20% do diâmetro da tubulação como área do orifício de vazamento.

Todos os modelos de liberação possuem incertezas em seus valores. Isto ocorre, muitas vezes, por causa da compreensão incompleta da geometria relacionada à liberação, por causa da má compreensão dos processos químicos ou até mesmo por desconhecimento de todas as propriedades físicas e químicas de um composto. Para minimizar os efeitos dessas incertezas, são utilizados valores conservadores para os elementos desconhecidos. Esta estimativa conservadora pode resultar em uma consequência, por muitas vezes, maior do que a real, levando a um potencial exagero no projeto de medidas de proteção e sistemas de segurança.

Os dados de cada cenário foram inseridos no *software* ALOHA para obtenção das modelagens gráficas das nuvens de dispersão atmosférica de dióxido de enxofre. Os resultados da modelagem apresentam as concentrações de dióxido de enxofre em ppm de acordo com os valores de IDLH, ERPG-3 e ERPG-2 (conforme **Tabela 3**). A concentração de ERPG-1 não foi considerada pois não apresenta um risco imediato de exposição. As linhas referenciais apresentadas no Apêndice 2 ilustram a distância e a largura das nuvens referentes a cada evento. A **Tabela 12** apresenta um resumo das distâncias alcançadas pela nuvem de dióxido de enxofre de acordo com cada nível de exposição e concentração em cada uma das hipóteses consideradas.

**Tabela 12:** Distâncias alcançadas pela nuvem de dióxido de enxofre e quantidades liberadas.

<b>Condição meteorológica</b>	<b>Hipótese 1</b>	<b>Hipótese 2</b>	<b>Hipótese 3</b>	<b>Hipótese 4</b>	<b>Hipótese 5</b>
Dia e verão	IDLH: 1000 m	IDLH: 61 m	IDLH: 322 m	IDLH: 43 m	IDLH: 142 m
	ERPG-3: 1900 m	ERPG-3: 129 m	ERPG-3: 695 m	ERPG-3: 88 m	ERPG-3: 299 m
	ERPG-2: 4400 m	ERPG-2: 401 m	ERPG-2: 2200 m	ERPG-2: 264 m	ERPG-2: 921 m
	Duração: 2 min	Duração: 60 min	Duração: 60 min	Duração: 60 min	Duração: 60 min
	Quantidade: 894 kg	Quantidade: 122 kg	Quantidade: 882 kg	Quantidade: 54,9 kg	Quantidade: 599 kg
Dia e inverno	IDLH: 1000 m	IDLH: 49 m	IDLH: 269 m	IDLH: 43 m	IDLH: 141 m
	ERPG-3: 1900 m	ERPG-3: 109 m	ERPG-3: 586 m	ERPG-3: 87 m	ERPG-3: 297 m
	ERPG-2: 4300 m	ERPG-2: 340 m	ERPG-2: 1800 m	ERPG-2: 262 m	ERPG-2: 913 m
	Duração: 3 min	Duração: 60 min	Duração: 60 min	Duração: 60 min	Duração: 60 min
	Quantidade: 894 kg	Quantidade: 93,4 kg	Quantidade: 882 kg	Quantidade: 54,9 kg	Quantidade: 599 kg
Noite e verão	IDLH: 932 m	IDLH: 101 m	IDLH: 557 m	IDLH: 87 m	IDLH: 293 m
	ERPG-3: 1500 m	ERPG-3: 242 m	ERPG-3: 1200 m	ERPG-3: 210 m	ERPG-3: 679 m
	ERPG-2: 3200 m	ERPG-2: 983 m	ERPG-2: 3900 m	ERPG-2: 863 m	ERPG-2: 2700 m
	Duração: 3 min	Duração: 60 min	Duração: 60 min	Duração: 60 min	Duração: 60 min
	Quantidade: 894 kg	Quantidade: 93,4 kg	Quantidade: 882 kg	Quantidade: 54,9 kg	Quantidade: 599 kg
Noite e inverno	IDLH: 907 m	IDLH: 92 m	IDLH: 510 m	IDLH: 86 m	IDLH: 290 m
	ERPG-3: 1500 m	ERPG-3: 223 m	ERPG-3: 1100 m	ERPG-3: 209 m	ERPG-3: 673 m
	ERPG-2: 3100 m	ERPG-2: 908 m	ERPG-2: 3800 m	ERPG-2: 857 m	ERPG-2: 2600 m
	Duração: 3 min	Duração: 60 min	Duração: 60 min	Duração: 60 min	Duração: 60 min
	Quantidade: 894 kg	Quantidade: 80,8 kg	Quantidade: 876 kg	Quantidade: 54,9 kg	Quantidade: 599 kg

Os resultados da modelagem mostram que as linhas referentes às concentrações de ERPG-2 possuem maior impacto a partir do ponto de liberação para as pessoas fora dos limites da unidade industrial. Apenas na hipótese quatro não é esperado que o dióxido de enxofre atinja áreas fora da fábrica em concentrações iguais ou superiores a de ERPG-2. De qualquer forma, é esperado para todas as hipóteses que, caso ocorra a liberação da quantidade modelada, o dióxido de enxofre seja percebido fora dos limites da unidade industrial (concentrações de ERPG-1).

É possível perceber que existe uma diferença considerável entre as distâncias de liberação que ocorrem durante o dia e durante a noite. É esperado que a distância alcançada pela nuvem seja maior durante a noite devido à maior estabilidade atmosférica, que faz com que a dispersão do composto tóxico no ar seja mais pobre, mesmo com a menor velocidade do vento observada nos períodos noturnos. Isso permite que a nuvem alcance maiores distâncias do que de dia, quando o movimento natural das correntes de ar por si só promove a dispersão do composto e a sua diluição na atmosfera.

A primeira hipótese, entretanto, não apresenta as variações dos resultados observadas com relação às condições de dia e noite. Nesta hipótese, as liberações ocorridas durante o dia podem alcançar áreas um quilômetro mais distante do que alcançaria caso ocorresse durante a noite. Isto ocorre porque, diferente das demais hipóteses, a liberação ocorre de forma instantânea, e não de forma contínua. Como durante o dia é esperado uma maior velocidade do vento, esta nuvem com alta concentração tem potencial para alcançar áreas mais distantes antes de se dispersar até concentrações onde não ofereça risco. Durante a noite este mesmo efeito ocorre, porém, a velocidade do vento menor não consegue atingir áreas tão distantes. Esta hipótese apresenta a pior consequência para as pessoas, para o público e para o meio ambiente de todas as cinco hipóteses. Caso esta hipótese ocorra, quase a totalidade do conteúdo do cilindro seria liberada em, no máximo, três minutos, podendo causar impactos em áreas com mais de quatro quilômetros de distância da planta. O odor do dióxido de enxofre poderia, ainda, ser percebido em distâncias ainda maiores. Neste cenário, todos os funcionários da planta estariam em risco imediato de vida caso sejam expostos por mais de trinta minutos, pois estariam dentro do raio de IDLH.

Comparando as hipóteses onde ocorre vazamento pelo mangote flexível de ½” de diâmetro (Hipóteses 2 e 3) com as hipóteses onde ocorre o vazamento pela tubulação de 1” de diâmetro (Hipóteses 4 e 5), seria de se esperar que o vazamento pela tubulação

causasse maior impacto em termos de quantidade e área atingida devido ao maior diâmetro de abertura; porém o contrário é observado.

Isto ocorre porque, na liberação por mangote, devido à proximidade com o cilindro, o dióxido de enxofre ainda se encontra liquefeito em uma temperatura acima da sua temperatura normal de ebulição. Dessa forma, durante a liberação, ocorre vaporização instantânea (“flasheamento”) do produto. O líquido se transforma parcialmente ou totalmente em vapor, podendo ocorrer algumas vezes de maneira explosiva. Essa transformação ocorre de maneira tão rápida que este processo é considerado adiabático.

O dióxido de enxofre liberado através da tubulação, por outro lado, já passou pelo processo de transformação de fase ao longo do transporte e se encontra na fase de vapor. Ocorre, neste caso, apenas a liberação do gás pelo furo. Por estar na fase líquida (maior densidade) durante a liberação através do mangote flexível, a quantidade em massa de dióxido de enxofre liberada é maior do que na fase gasosa, se compararmos o mesmo volume. Além disso, o efeito de vaporização instantânea faz com que as moléculas possuam mais energia na liberação através do mangote flexível, alcançando áreas maiores do que na liberação através do furo na tubulação.

Por último, não foi observado uma diferença substancial quando comparados os efeitos de uma liberação que ocorre em condições de verão (maior temperatura atmosférica) e inverno (menor temperatura atmosférica) dentro de cada hipótese. Para estas hipóteses, portanto, a temperatura não é um fator determinante para a dispersão da nuvem de material tóxico.

De acordo com as possíveis consequências para pessoas, para o meio ambiente e para o público fora da planta industrial discutidas nesta seção foram estabelecidos níveis de severidade que variam de 1 a 5, conforme a matriz de risco apresentada na **Figura 6**. Para definição da severidade do cenário, foi escolhida a pior consequência para aquele cenário. Por exemplo, se um evento iniciador causou consequências com severidade 2 para meio ambiente (liberação contida, sem contaminação) mas causou uma consequência com severidade 3 para pessoas (danos ou exposição com afastamento), este cenário será considerado como tendo severidade 3. Em alguns casos foi necessário separar em duas consequências diferentes para pessoas e para o meio ambiente para se obter uma avaliação mais precisa das medidas de segurança. Salvaguardas como, por exemplo, um dique de contenção, diminuem a consequência de um cenário ambiental, porém não diminuem a possibilidade de exposição de pessoas a

produtos tóxicos, por exemplo. O Apêndice 1 apresenta a **Tabela 14** do PRA com todas as severidades atribuídas a cada cenário.

É importante ressaltar que a simulação de dispersão de gases densos considera que a dispersão ocorre em um terreno plano, incapaz de considerar suas características de relevo e o efeito da presença de obstáculos no caminho da nuvem dispersa. O uso de metodologias mais complexas, como a Fluidodinâmica Computacional (CFD), pode auxiliar na obtenção de resultados mais precisos.

### 5.3 Determinação dos riscos não mitigados

O risco é composto por uma combinação da probabilidade de um evento iniciador ocorrer com a severidade da consequência de interesse, considerando que nenhuma camada de proteção está presente no sistema. A partir das definições de probabilidade e severidade feitas nas seções anteriores foi possível determinar o risco não mitigado de cada cenário, conforme a matriz de risco apresentada na **Figura 6**, apresentada na página 48. A **Tabela 14** do PRA no Apêndice 1 apresenta os cenários de PRA com os riscos não mitigados.

Foram encontrados 22 cenários que possuem um alto risco, 18 cenários que possuem um risco médio, e nenhum cenário que possui risco baixo. Todos os cenários de alto risco estão relacionados à possibilidade de liberação não planejada de grandes quantidades de dióxido de enxofre, com potencial de impactar áreas e pessoas dentro e fora da planta industrial, conforme os resultados apresentados no estudo de modelagem de consequências.

### 5.4 Avaliação das salvaguardas existentes

Após determinar o risco de cada cenário, foi necessário identificar todas as salvaguardas já existentes no sistema para evitar a ocorrência do evento iniciador ou para mitigar as consequências. A **Tabela 14** do PRA no Apêndice 1 apresenta todas as salvaguardas identificadas, considerando que:

- Os cilindros utilizados pela Cargill são de uso exclusivo da empresa, diminuindo riscos de abastecimento do produto errado e possibilidade de desgaste devido à manipulação indevida por outros clientes.
- Apesar de aparecerem listados, os treinamentos não são considerados como salvaguardas efetivas pois eles não impedem que o erro humano ocorra, apenas

podem diminuir sua frequência, caso sua eficácia seja comprovada. Os treinamentos são listados apenas para conhecimento.

- Mesmo não sendo classificados como vasos de pressão, os cilindros de dióxido de enxofre são submetidos a uma rotina de manutenção e inspeção conforme requisitos da NR-13 (MTE, 2017b).
- A utilização de EPI só é considerada uma salvaguarda quando o impacto é para pessoas (e não para o meio ambiente) e quando todas as pessoas com possibilidade de serem afetadas fazem a utilização do EPI. Para vazamentos em larga escala, o EPI não é considerado uma salvaguarda efetiva.
- O sistema lavador de gases é considerado uma salvaguarda para cenários onde a quantidade emanada é pequena, visto que o sistema foi projetado para vazões de gases decorrentes da operação normal do processo.
- Os alarmes de processo são considerados salvaguardas administrativas pois não causam nenhuma ação no processo e são dependentes da ação humana para correção da situação identificada.

## 5.5 Recomendações adicionais

O último passo da análise de risco do processo foi a recomendação de melhorias e salvaguardas necessárias para garantir a proteção do processo frente aos riscos identificados. Mesmo tendo sido identificadas salvaguardas para alguns cenários, recomendações adicionais se fizeram necessárias pois estas camadas de proteção não ofereciam confiabilidade suficiente para reduzir os riscos a um nível aceitável. Em outros casos, recomendações de melhoria de projeto ou de condições operacionais foram feitas apesar das salvaguardas existentes já serem suficientes para mitigação dos riscos identificados.

A lista de recomendações adicionais para garantir a proteção do processo frente aos riscos identificados é apresentada na **Tabela 13** e na **Tabela 14** do PRA no Apêndice 1 deste documento. Além das recomendações específicas de cada cenário, também foram feitas recomendações globais referentes ao processo e/ou ao atendimento de requisitos legais e requisitos internos da empresa.

**Tabela 13:** Recomendações geradas por meio da análise de risco do processo.

<b>Número da recomendação</b>	<b>Descrição</b>	<b>Tipo de recomendação</b>
RG-1	Considerar a substituição do sistema de dióxido de enxofre liquefeito a partir de cilindros por outro produto que seja uma fonte similar de SO <sub>2</sub> , porém apresente menos riscos de segurança – por exemplo, utilização de sais de enxofre, que em solução liberam SO <sub>2</sub> .	Engenharia
RG-2	Atualizar toda a documentação (fluxogramas, planta baixa, diagrama de funções de automação) para refletir a situação atual da planta, considerando as modificações propostas neste estudo de PRA.	Administrativa
RG-3	Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação com os órgãos e entidades necessários.	Administrativa
R-1	Implementar auditoria do fornecedor para garantir boas práticas de produção e programa de inspeção dos cilindros.	Administrativa
R-2	Prever solução de engenharia (p. ex.: talha ou monovia) para descarregamento dos cilindros, eliminando a necessidade de utilizar a empilhadeira.	Engenharia
R-3	Prever solução de engenharia para evitar a necessidade de rolar o cilindro em cima do caminhão (p.ex.: cesto envolvendo o cilindro para içamento).	Engenharia
R-4	Incluir no procedimento operacional de descarregamento a etapa de verificação de vazamento (realização de teste de solução ou utilizar detector de gases portátil) no ato do recebimento do caminhão com os cilindros.	Administrativa
R-5	Solicitar ao fornecedor a emissão de laudo que confirme a estanqueidade das válvulas antes de receberem o lacre.	Administrativa
R-6	Prever ensaio não destrutivo dos cilindros para medição da espessura de chapa. Deverá ser feita para todos os cilindros dedicados para uso da Cargill.	Administrativa
R-7	Prever solução de engenharia para enclausuramento dos cilindros com sistema de abatimento de gases (cortina d'água ou sistema de dilúvio).	Engenharia
R-8	Prever dimensionamento de paredes resistentes ao fogo para o enclausuramento dos cilindros de SO <sub>2</sub> .	Engenharia
R-9	Prever instalação de parede separando fisicamente as duas baterias de cilindros.	Engenharia
R-10	Prever a aquisição e disponibilização de kit de emergência para vazamentos em cilindros.	Administrativa
R-11	Prever instalação de um sistema de suporte e vedação dos flexíveis no sistema de SO <sub>2</sub> de forma a evitar a emissão de produto residual durante a substituição dos cilindros.	Engenharia

Número da recomendação	Descrição	Tipo de recomendação
R-12	Prever instalação de proteção contra queda de materiais onde a tubulação de SO <sub>2</sub> esteja vulnerável.	Engenharia
R-13	Prever instalação de sensor de pressão próximo à entrada de produto no tanque e intertravamento com o diferencial de pressão. Caso o diferencial de pressão esteja alto, as válvulas automáticas na saída de cada bateria devem ser fechadas.	Automação e Instrumentação
R-14	Prever intertravamento fechando as válvulas automáticas nas linhas de cada bateria caso seja identificada temperatura baixa na linha de alimentação de SO <sub>2</sub> para o tanque.	Automação e Instrumentação
R-15	Prever instalação de chave de nível alto no tanque, parando a alimentação de água e de SO <sub>2</sub> para o tanque se nível alto for identificado.	Automação e Instrumentação
R-16	Prever instalação de chave de nível baixo no tanque, parando a alimentação de SO <sub>2</sub> para o tanque se nível baixo for identificado.	Automação e Instrumentação
R-17	Instalar sistema de renovação da água de lavagem com temporizador para renovação constante da água do sistema de lavagem de gases.	Automação e Instrumentação
R-18	Incluir no procedimento operacional uma verificação frequente da integridade dos cilindros, flexíveis, válvulas, detectores de gases e demais acessórios.	Administrativa
R-19	Prever no plano de manutenção a substituição periódica dos flexíveis de acordo com as orientações do fornecedor.	Administrativa
R-20	Prever plano de manutenção das tubulações de SO <sub>2</sub> , incluindo a verificação de flanges e a verificação das condições da tubulação sob o isolamento térmico.	Administrativa

De forma geral, as recomendações foram divididas em três categorias: engenharia, automação e instrumentação, e administrativas. Preferencialmente, deve-se optar pelas recomendações de engenharia pois elas normalmente garantem a eliminação do risco ou uma proteção com maior confiabilidade. As recomendações administrativas são as menos recomendadas pois elas dependem majoritariamente da ação humana, aumentando a probabilidade de falharem. As recomendações principais são discutidas a seguir:

- **Substituição do SO<sub>2</sub> (RG-1):** na etapa de caracterização do sistema foi identificado que o dióxido de enxofre é um produto altamente perigoso devido à sua toxicidade. Na etapa de estimativa das consequências foi identificado um grande potencial de o produto atingir áreas fora da fábrica durante eventos de vazamento a partir dos cilindros. Portanto, a primeira consideração a ser feita é

acerca da substituição deste produto por outros que apresentem um risco menor mas que sejam capazes de exercer a mesma função no sistema. Yang e colaboradores (2005) apresentam os sais de enxofre, tais como sulfito de potássio ( $K_2SO_3$ ), sulfito de sódio ( $Na_2SO_3$ ), sulfito de amônio ( $(NH_4)_2SO_3 \cdot H_2O$ ) e metabissulfito de sódio ( $Na_2S_2O_5$ ), como possíveis substitutos para o dióxido de enxofre gasoso. A substituição dos cilindros pelos sais faria com que praticamente todos os cenários dessa análise de risco fossem desconsiderados. Seria necessário, então, uma nova avaliação completa no sistema de alimentação dos sais ao tanque de água de maceração.

- **Documentação (RG-2):** a compreensão do risco depende do conhecimento exato do processo. Esta recomendação dá suporte a todos os outros tópicos relacionados a Segurança de Processos, tais como: procedimentos, treinamentos, integridade de ativos, gestão de mudança, investigação de acidentes, dentre outros.
- **Plano de Resposta a Emergências (RG-3):** o desenvolvimento da gestão de emergência e da capacidade de resposta apropriadas é crucial para proteção das pessoas (no local e fora do local da emergência, além daquelas envolvidas nos serviços de emergência), para garantir uma resposta adequada aos eventos e para desenvolver um plano de comunicação para as partes interessadas (incluindo os vizinhos, os órgãos públicos e a mídia). É preciso estabelecer o que pode dar de errado, o quão ruim pode ser e com que frequência pode acontecer para desenvolver um plano de resposta eficaz. Este plano de resposta deve incluir, minimamente: o planejamento completo; treinamento eficiente; exercícios realistas; comunicação eficaz com as partes interessadas (incluindo órgãos governamentais); e estabelecimento de cultura e disciplina operacional necessárias para garantir a adesão de todos os necessários. A falha de um plano de emergência, ou a falha em executar um plano de emergência quando necessário, pode transformar um acidente em um desastre (CCPS, 2014b).
- **Integridade e confiabilidade dos ativos / plano de manutenção:** ajudam a garantir que o equipamento está projetado de maneira adequada, instalado de acordo com as especificações e que permanece ajustado para uso até necessitar de substituição. É necessário implementar um programa sistemático de inspeções e testes necessários para garantir que os equipamentos importantes estejam adequados ao uso para o qual são destinados ao longo de sua vida útil.

Isso irá auxiliar na prevenção de liberações catastróficas de material perigoso ou liberação repentina de energia e irá garantir a alta disponibilidade dos sistemas de segurança críticos.

- **Procedimentos operacionais:** a existência de procedimentos operacionais bem elaborados, com treinamento e instrução adequados e verificação de eficácia irá auxiliar na garantia de um alto desempenho humano. Sem procedimentos por escrito, não há garantia de que os procedimentos e métodos desejados serão colocados em prática por cada operador, ou ainda, que um único operador realizará uma determinada tarefa sistematicamente da maneira esperada.
- **Posição de falha segura / gerador de emergência:** por padrão, todo o sistema de dióxido de enxofre é colocado em posição de falha segura (com todas as válvulas automáticas fechadas) caso haja falha de utilidades (energia elétrica ou ar de instrumentação). Além disso, o exaustor responsável pelo diferencial de pressão no lavador de gases e o sistema de alimentação são mantidos conectados a um gerador. Em caso de falha de energia elétrica, o sistema de lavagem de gases é mantido em funcionamento.

Por se tratar de uma metodologia qualitativa, por meio da metodologia de *What-If / Checklist* não é possível determinar até que ponto as recomendações são confiáveis o suficiente para garantir a mitigação dos riscos identificados. Dessa forma, é recomendado que, para todos os cenários com consequência muito alta seja realizado um estudo de LOPA para verificação da efetividade das salvaguardas. Porém, a metodologia de LOPA não funciona muito bem para todos os cenários por causa de suas regras conservativas e estimativa para as ordens de magnitude. Logo, ela pode não ser a metodologia mais apropriada caso não haja independência entre os eventos iniciadores e as camadas de proteção independentes.

Por este motivo, pode ser desafiador aplicar a metodologia de LOPA para cenários nos quais o evento iniciador é decorrente do erro humano e as medidas para redução de risco são dependentes, principalmente, de atividades administrativas ou procedimentos. Por consequência, a LOPA não é muito útil para cenários relacionados aos modos transientes de operação de um processo, tais como partida, parada, manutenção ou substituição, que possuem grande dependência no design dos equipamentos, na disciplina operacional e nos controles administrativos (CCPS, 2014c). Por isso, para este estudo, a metodologia de LOPA não foi utilizada para verificação da efetividade das salvaguardas.

## 6 CONCLUSÕES

As metodologias de análise de risco do processo são ferramentas muito importantes para a prevenção de perdas na indústria, incluindo perdas econômicas, danos às pessoas e ao meio ambiente. Com PRA é possível compreender quais são os pontos com maior risco de gerar um evento de consequências catastróficas no processo e implementar medidas de controle adequadas.

Esta pesquisa trouxe ferramentas que são amplamente utilizadas e discutidas no âmbito industrial para o ambiente acadêmico, abrindo espaço para discussão sobre a importância da Segurança de Processos em projetos e processos da Indústria Química. O Engenheiro Químico, como profissional que possui conhecimento amplo nos processos de manufatura, possui um papel primordial na aplicação das metodologias exploradas neste trabalho. O fluxo de trabalho que foi seguido nesta pesquisa pode servir como referência futura para acadêmicos e profissionais técnicos da área para a execução de estudos similares para outros processos.

A análise de risco identificou 22 cenários que possuem um alto risco, 18 cenários que possuem um risco médio, e nenhum cenário que possui risco baixo. A partir da avaliação das salvaguardas existentes, foram apresentadas 23 recomendações de novas medidas de segurança para garantir a redução e o controle dos riscos. A caracterização do risco individual para cada cenário irá auxiliar na priorização de investimentos e esforços de acordo com o nível do risco identificado, facilitando a elaboração de um plano de ação efetivo para cada sistema.

A modelagem de consequências realizada no *software* ALOHA mostrou que todas as liberações de grande escala possuem potencial de atingir áreas dentro e fora do parque industrial, causando efeitos sobre as pessoas e sobre o meio ambiente. De posse desses dados, é possível determinar corretamente as zonas de risco e desenvolver planos de resposta à emergência adequados para cada uma delas.

Para a Cargill as informações resultantes deste trabalho são de suma importância para o conhecimento dos riscos existentes. O potencial de causar uma catástrofe encontrado na operação com dióxido de enxofre liquefeito pode levar a empresa a considerar soluções e produtos alternativos a este para eliminação deste risco latente. Além disso, essa análise de risco irá compor o portfólio de estudos de riscos que são apresentados aos órgãos regulamentadores para obtenção das licenças de operação.

Apesar de trazer uma quantidade relevante de informações, esta pesquisa é apenas o ponto de partida para trabalhos posteriores que irão auxiliar na compreensão dos riscos associados a este processo e ao dióxido de enxofre. Desta forma, são feitas as seguintes sugestões de trabalhos futuros a partir desta pesquisa:

- Estudar a viabilidade de substituição do sistema de adição de dióxido de enxofre gasoso por um sistema que utilize sais de enxofre nos resultados da etapa de maceração do processo de moagem úmida de milho.
- Realizar levantamento de engenharia e estudo econômico acerca das recomendações deste estudo de Análise de Risco. Recomenda-se fazer a estimativa de custos de potenciais acidentes e comparar com o custo da implementação e gerenciamento das barreiras sugeridas.
- Avaliar a eficácia dos procedimentos e treinamentos oferecidos pela empresa em garantir a excelência operacional e minimização de erros humanos. Recomenda-se a utilização de metodologias de Análise de Confiabilidade Humana (*Human Reliability Analysis*) para esta verificação.
- Fazer a modelagem de vazamentos utilizando métodos mais avançados, como a fluidodinâmica computacional, e comparar com os resultados obtidos neste trabalho. O objetivo deste estudo será verificar com qual precisão softwares mais simples, como o ALOHA, são capazes de prever a dispersão de gases e suas concentrações.

Os custos para prevenção de acidentes impactam diversas áreas. É necessário garantir o investimento correto para obter o empenho da gerência, o investimento em pesquisa e design, mudanças no processo, limitações operacionais, adequação da localização da planta e dos equipamentos, investimento em equipamentos de segurança, instrumentação de processo, sistemas de proteção e combate a incêndio e garantir que tudo funcione de acordo com as especificações através de um programa robusto de inspeções.

Mesmo assim, os custos da prevenção são menores do que os custos decorrentes de um acidente. Não implementar as medidas adequadas poderá gerar custos referentes aos danos e reparos a equipamentos, atrasos na entrega de projetos, tempo de inatividade da planta, perda de mercado, recuperação da imagem pública da empresa e pagamento de prêmio para seguradoras; além de todo prejuízo humano e financeiro inerente a qualquer acidente de grande porte, incapaz de ser mensurado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIQUIM. Pensamentos e Atitudes Responsáveis. **Atuação Responsável**, 2017. Disponível em: <<https://abiquim.org.br/includes/pdf/programas/manuais/livreto-inst-AR.pdf>>. Acesso em: 20 Março 2018.
- ACC. Responsible Care. **American Chemistry Council**, 2018. Disponível em: <<https://responsiblecare.americanchemistry.com/Guiding-Principles/>>. Acesso em: 20 Março 2018.
- AICHE. Loss of Primary Containment (LOPC). **American Institute of Chemical Engineers**, 2017. Disponível em: <<https://www.aiche.org/ccps/resources/glossary/process-safety-glossary/loss-primary-containment-lopc>>. Acesso em: 02 Julho 2017.
- \_\_\_\_\_. Chemical Reactivity Worksheet 4.0. **Center for Chemical and Process Safety**, 2018. Disponível em: <<https://www.aiche.org/ccps/resources/chemical-reactivity-worksheet-40>>. Acesso em: 03 Março 2018.
- ATSDR. Toxic Substances Portal - Sulfur Dioxide. **Agency for Toxic Substances and Disease Registry**, 1998. Disponível em: <<https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp116-c1-b.pdf>>. Acesso em: 07 Março 2018.
- BAYBUTT, P. Major Hazards Analysis is: An Improved Method for Process Hazard Analysis. **Process Safety Progress**, v. 22, n. 1, p. 21-26, March 2003a.
- \_\_\_\_\_. On the Ability of Process Hazard Analysis to Identify Accidents. **Process Safety Progress**, v. 22, n. 3, p. 191-194, September 2003b.
- \_\_\_\_\_. Design Intent for Hazard and Operability Studies. **Process Safety Progress**, v. 00, n. 00, p. 1-5, 2014.
- BESSERMAN, J.; MENTZER, R. A. Review of global process safety regulations: United States, European Union, United Kingdom, China, India. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, n. 50, p. 165-183, 2017.

- BHATTACHARYA, R.; KUMAR, V. G. Consequence analysis for simulation of hazardous chemicals release using ALOHA software. **International Journal of ChemTech Research**, v. 8, n. 4, p. 2038-2046, 2015. ISSN 0974-4290.
- BISS, R.; COGAN, U. Sulfur Dioxide in Acid Environment Facilitates Corn Steeping. **Cereal Chemistry**, v. 73, n. 1, p. 40-44, 1996.
- BUREAU OF LABOR STATISTICS. **2015 Census of Fatal Occupational Injuries**. United States Department of Labor. Washington. 2016.
- CARDOSO, W. S.; PINHEIRO, F. DE A.; MACHADO, F. DE P.; BORGES, J. T. DA S.; RIOS, S. DE A. Indústria do Milho. In: BORÉM, A.; RIOS, S. D. A. **Milho Biofortificado**. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2011. Cap. 8, p. 173-195. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/889387/1/MilhoBiofortificado003.pdf>>.
- CARGILL. **Manual de Operação da Moagem**. Cargill Agrícola. Uberlândia, p. 93. 2010.
- \_\_\_\_\_. **Process Safety Risk Management Guidelines**. CSST. Minneapolis, p. 78. 2015a.
- \_\_\_\_\_. Uma visão geral da Cargill, 2015b. Disponível em: <<http://www.cargill.com.br/wcm/groups/public/@ccom/documents/document/br-at-a-glance-brazil-port.pdf>>. Acesso em: 27 Junho 2017a.
- \_\_\_\_\_. Cargill Agrícola S.A., 2016a. Disponível em: <<http://www.cargill.com.br/wcm/groups/public/@csf/@brazil/documents/document/na32026263.pdf>>. Acesso em: 27 Junho 2017b.
- \_\_\_\_\_. Starches & Derivatives, 2016b. Disponível em: <<https://www.cargill.com/food-beverage/na/starches-derivatives>>. Acesso em: 23 Maio 2017c.
- CARRARI, C. L.; APARICIO, L. V.; BANDONI, J. A.; TONELLI, S. M. Utilización de Modelos de Dispersión Atmosfericas para la Estimación de Dosis de Exposición. **Mecánica Computacional**, Bariloche, v. XXIII, p. 1743-1759, Novembro 2004.

- CCPS. **Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models**. 2a. ed. Nova York: American Institute of Chemical Engineers, 1996.
- \_\_\_\_\_. **Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases**. 1a. ed. Nova York: American Institute of Chemical Engineers, 1999.
- \_\_\_\_\_. **Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis**. 2a. ed. Nova York: American Institute of Chemical Engineers, 2000.
- \_\_\_\_\_. **The Business Case for Process Safety**. American Institute of Chemical Engineers. New York, p. 16. 2006.
- \_\_\_\_\_. What is "Process Safety"? **Process Safety Beacon**, Julho 2008.
- \_\_\_\_\_. **Guidelines for Developing Quantitative Safety Risk Criteria**. 1a. ed. Nova York: John Wiley & Sons Inc., 2009.
- \_\_\_\_\_. **Guidelines for Evaluating Process Plant Buildings for External Explosions, Fires, and Toxic Releases**. 2a. ed. Nova York: John Wiley & Sons Inc., 2012.
- \_\_\_\_\_. Bhopal: The Worst Industrial Disaster in History. **Process Safety Beacon**, Dezembro 2014a.
- \_\_\_\_\_. **Diretrizes para Segurança de Processos Baseada em Risco**. 1a. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2014b.
- \_\_\_\_\_. **Guidelines for Initiating Events and Independent Protection Layers in Layer of Protection Analysis**. 1a. ed. Nova York: Wiley-AIChE, 2014c.
- CHASTAIN, J. W.; DELANOY, P.; DEVLIN, C.; MUELLER, T.; STUDY, K. Beyond HAZOP and LOPA: Four Different Company Approaches. **Process Safety Progress**, v. 00, n. 00, p. 1-16, 2016.
- CHEN, X.; ZHAN, F. B. Mapping the Vulnerability to Potential Toxic Substance Releases from Industrial Facilities under Emergency Situations: A Case Study of Galveston, Texas. **Geographic Information Sciences**, Texas, v. 12, n. 1, p. 27-33, June 2006.

CONAMA. Resolução nº 1, de 23 de janeiro de 1986. do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA, "Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental"; publicada no Diário Oficial da União em 17/02/1986; Brasília, DF.

CROW, D. A.; LOUVAR, J. L. **Segurança de Processos Químicos: Fundamentos e Aplicações**. 3a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

DEVALIA, J. L.; RUSZNAK, C.; HERDMAN, M. J.; TRIGG, C. J.; TARRAF, H.; DAVIES, R. J. Effect of nitrogen dioxide and sulphur dioxide on airway response of mild asthmatic patients to allergen inhalation. **Lancet**, v. 344, p. 1668-1671, Dezembro 1994.

DNV GL. Conceitos Fundamentais, Formas de Expressão e Critérios de Aceitabilidade de Riscos. In: \_\_\_\_\_ **Curso sobre Estudo de Análise de Riscos e Programa de Gerenciamento de Riscos**. 1a. ed. Rio de Janeiro: DNV GL, 2015a. p. 20.

\_\_\_\_\_. Modelos de Avaliação de Consequência de Acidentes (vazamentos, incêndios, explosões, contaminação ambiental). In: \_\_\_\_\_ **Curso sobre Estudo de Análise de Riscos e Programa de Gerenciamento de Riscos**. 1a. ed. Rio de Janeiro: DNV GL, 2015b. p. 62.

DUNJÓA, J.; FTHENAKIS, V.; VÍLCHEZ, J. A.; ARNALDOS, J. Hazard and operability (HAZOP) analysis: A literature review. **Journal of Hazardous Materials**, n. 173, p. 19-32, 2010. ISSN 0304-3894.

EPA & NOAA. **ALOHA User's Manual**. U.S. Government. Washington, p. 195. 2007.

EPA. Food and Agricultural Industries. In: EPA **AP-42**: Compilation of Air Emission Factors. 5a. ed. Washington: United States Government, 1995. Cap. 9.

\_\_\_\_\_. Process Hazard Analysis (PHA). **Chemical Engineering Prevention & Planning**, Seattle, p. 10, July-August 2008. Disponível em: <[https://www3.epa.gov/region10/pdf/rmp/cepp\\_newsletter\\_0708.pdf](https://www3.epa.gov/region10/pdf/rmp/cepp_newsletter_0708.pdf)>.

GOOGLE. Google Earth Pro, versão 7.1.5.1557. [s.l.]: Google Inc., 2015.

- HENDERSHOT, D. C. A History of Process Safety and Loss Prevention in the American Institute of Chemical Engineers. **Process Safety Progress**, v. 28, n. 2, p. 105-113, 2009.
- JONES, R.; LEHR, W.; SIMECEK-BEATTY, D.; REYNOLDS, R. M. **ALOHA® (Areal Locations Of Hazardous Atmospheres) 5.4.4: Technical Documentation**. Seattle: WA: Emergency Response Division, NOAA, 2013. 96 p.
- KATSOUYANNI, K; TOULOUMI, G; SPIX, C; SCHWARTZ, J; BALDUCCI, F; MEDINA, S; ROSSI, G; WOJTYNIAK, B; SUNYER, J; BACHAROVA, L; SCHOUTEN, J P; PONKA, A; ANDERSON, H R. Short term effects of ambient sulphur dioxide and particulate matter on mortality in 12 European cities: results from time series data from the APHEA project. **BMJ**, v. 314, n. 1658, 1997.
- KHAN, F. I.; ABBASI, S. A. Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, n. 11, p. 261-277, 1998.
- KLETZ, T. **O Que Houve de Errado?: Casos de Desastres em Plantas de Processos e Como Eles Poderiam Ter Sido Evitados**. 5a. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2013.
- KULKARNI, A. **Case Study: Asset Integrity Approach to Achieve excellence in Process Safety**. Bell Energy Petrochemical. Abu Dhabi, p. 22. 2016.
- LEES, F. P. **Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control**. 2a. ed. Oxford: Reed Educational and Professional Publishing Ltd, v. 1, 1996a.
- \_\_\_\_\_. **Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control**. 2a. ed. Oxford: Reed Educational and Professional Publishing Ltd, v. 2, 1996b.
- \_\_\_\_\_. **Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control**. 2a. ed. Oxford: Reed Educational and Professional Publishing Ltd, v. 3, 1996c.

- LI, R.; KOU, X.; TIAN, J.; MENG, Z.; CAI, Z.; CHENG, F.; DONG, C. Effect of sulfur dioxide on inflammatory and immune regulation in asthmatic rats. **Chemosphere**, v. 112, p. 296-304, 2014.
- MAPA. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. **Instituto Nacional de Meteorologia**, 2018. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 21 fev. 2018.
- MARSH & MCLENNAN. The 100 Largest Losses 1974-2013. **Loss Prevention**, n. 23, p. 1-42, February 2014.
- MATAQI, I. Y.; ADIVI, B. S. S. **Process Safety vs. Personal Safety: Can't We Get Along with One?** Las Vegas: American Society of Safety Engineers, 2013.
- MAZZOLDI, A.; HILL, T.; COLLS, J. J. CFD and Gaussian atmospheric dispersion models: A comparison for leak from carbon dioxide transportation and storage facilities. **Atmospheric Environment**, n. 42, p. 8046-8054, June 2008. ISSN 1352-2310.
- MORRISON, D. T.; AIKEN, C.; LAKHIANI, S. D.; GRAAF, P. V. D. **A Case Study in Human Reliability: Analysis to Support LOPA in Unloading Hazardous Liquids**. 13th Global Congress on Process Safety. San Antonio: American Institute of Chemical Engineers. 2017.
- MOSEMAN, J. Process Safety: A Wicked Problem? **Process Safety Progress**, v. 36, n. 01, p. 14-17, 2016.
- MTE. Portaria Nº 3.237: Serviço Especializado em Segurança, Higiene e Medicina do Trabalho. **Departamento Nacional de Segurança e Higiene do Trabalho**, Rio de Janeiro, 27 de Julho de 1972. 38 pags.
- \_\_\_\_\_. Anexo Nº 11: Agentes Químicos cuja Insalubridade é Caracterizada por Limite de Tolerância e Inspeção no Local de Trabalho. In: MTE. **Norma Regulamentadora Nº 15: Atividades e Operações Insalubres**. **Ministério do Trabalho e Emprego**, Brasília: Governo Federal, 2014. p. 5.

- MTE. Norma Regulamentadora N° 9: Programa de Prevenção de Riscos Ambientais. **Ministério do Trabalho e Emprego**, Brasília, 07 de julho de 2017a. p. 13.
- \_\_\_\_\_. Norma Regulamentadora N° 13: Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações. **Ministério do Trabalho e Emprego**, Brasília, 29 Setembro 2017b. p. 23.
- NIOSH. Sulphur Dioxide. **Center for Disease Control and Prevention**, 2015. Disponível em: <<https://www.cdc.gov/niosh/ipcsneng/neng0074.html>>. Acesso em: 08 Março 2018.
- NOAA. Sulfur Dioxide. **CAMEO Chemicals**, 2016. Disponível em: <<https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/1554>>. Acesso em: 08 Março 2018.
- \_\_\_\_\_. Public Exposure Guidelines. **Office of Response and Restoration**, 2017. Disponível em: <<https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/chemical-spills/resources/public-exposure-guidelines.html>>. Acesso em: 18 Setembro 2017.
- NORIYATI, R. D.; ROZAAQ, W.; MUSYAFI, A.; SOEPRIYANTO, A. Hazard & operability study and determining safety integrity level on sulfur furnace unit: A case study in fertilizer industry. **Procedia Manufacturing**, n. 4, p. 231-236, 2015.
- PASQUILL, F. The Estimation of the Dispersion of Windborne Material. **Meteorology Magazine**, n. 90, p. 33-49, 1961.
- RAY, S.; KIM, K.-H. The pollution status of sulfur dioxide in major urban areas of Korea between 1989 and 2010. **Atmospheric Research**, n. 147-148, p. 101-110, 2014.
- RUHL, A. S.; KRANZMANN, A. Investigation of corrosive effects of sulphur dioxide, oxygen and water vapour on pipeline steels. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, n. 13, p. 9-16, 2013.
- SANDERS, R. E. **Chemical Process Safety: Learning from Case Histories**. 3a. ed. Oxford: Elsevier, 2005. ISBN 0-7506-7749-X.

- SENAI. **Fundamentos de Saúde e Segurança do Trabalho**. 1a. ed. Brasília: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, v. 1, 2012.
- SPICER, T.; HAVENS, J. **User's Guide for the Degadis 2.1 Dense Gas Dispersion Model**. Cincinnati: United States Environmental Protection Agency, 1989.
- SPIX, C.; ANDERSON, H. R.; SCHWARTZ, J.; VIGOTTI, M. A.; LETERTRE, A.; VONK, J. M.; TOULOUMI, G.; BALDUCCI, F.; PIEKARSKI, T.; BACHAROVA, L.; TOBIAS, A.; PONKÄ, A.; KATSOUYANNI, K. Short-Term Effects of Air Pollution on Hospital Admissions of Respiratory Diseases in Europe: A Quantitative Summary of APHEA Study Results. **Archives of Environmental Health**, v. 53, n. 1, p. 54-64, 1998.
- STRAZZI, S. Derivados do milho são usados em mais de 150 diferentes produtos industriais. **Visão Agrícola**, n. 13, p. 146-150, 2015. Disponível em: <[http://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/VA\\_13\\_Industrializacao-artigo4.pdf](http://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/VA_13_Industrializacao-artigo4.pdf)>.
- SUMMERS, A. E. Introduction to Layer of Protection Analysis. **Journal of Hazardous Materials**, Houston, n. 104, p. 6, June 2007.
- SUNYER, J; ATKINSON, R; BALLESTER, F; TERTRE, A. LE; AYRES, J. G.; FORASTIERE, F; FORSBERG, B.; VONK, J. M.; BISANTI, L.; ANDERSON, R. H.; SCHWARTZ, J.; KATSOUYANNI, K. Respiratory effects of sulphur dioxide: a hierarchical multicity analysis in the APHEA 2 study. **Occupational and Environmental Medicine**, v. 60, 2003.
- TAUSEEF, S. M.; RASHTCHIAN, D.; ABBASI, S. A. CFD-based simulation of dense gas dispersion in presence of obstacles. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, n. 24, p. 371-376, 2011.
- TAYLOR, J. R. **Hazardous Materials Release and Accident Frequencies for Process Plant**. 1a. ed. Allerød: Taylor Associates ApS, v. II, 2006.
- THOMAN, D. C.; O'KULA, K. R.; LAUL, J. C.; DAVIS, M. W.; KNECHT, K. D. Comparison of ALOHA and EPIcode for Safety Analysis Applications.

**Journal of Chemical Health & Safety**, p. 20-33, November/December 2006.  
ISSN 1871-5532.

TSENG, J. M.; SU, T. S.; KUO, C. Y. Consequence evaluation of toxic chemical releases by ALOHA. **Procedia Engineering**, n. 45, p. 384-389, 2012.

UIJT DE HAAG, P. A. M.; ALE, B. J. M. Guidelines for quantitative risk assessment.  
In: \_\_\_\_\_ **Series on Dangerous Substances (Purple Book)**. Amsterdam: Ministerie van Verkeer en Waterstaat, v. 3, 2005. p. 234.

VALE, A. Sulphur dioxide. **Medicine**, v. 40, n. 3, p. 158, Março 2012.

VAN DEN BOSCH, C. J. H.; WETERINGS, R. A. P. M. Methods for the Calculation of Physical Effects due to releases of hazardous materials (Liquids and Gases).  
In: \_\_\_\_\_ **Series on Dangerous Substances (Yellow Book)**. 3a. ed. Amsterdam: Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2005. p. 127.

WORLD BANK. **World Bank Technical Paper Number 55: Techniques for Assessing Industrial Hazards**. 1a. ed. Washington: Technica Ltd., 1988. ISBN 0-8213-0779-7.

WSH COUNCIL. **Workplace Safety and Health Guidelines: Process Hazard Analysis**. Singapore: Workplace Safety and Health Council, 2017. Disponivel em:  
<[https://www.wshc.sg/files/wshc/upload/infostop/attachments/2017/IS201704030000000416/Workplace\\_Safety\\_Health\\_Guidelines\\_Process\\_Hazard\\_Analysis.pdf](https://www.wshc.sg/files/wshc/upload/infostop/attachments/2017/IS201704030000000416/Workplace_Safety_Health_Guidelines_Process_Hazard_Analysis.pdf)>.

YANG, P.; HAKEN, A. E.; NIU, Y.; CHANEY, S. R.; HICKS, K. B.; ECKHOFF, S. R.; TUMBLESON, M. E.; SINGH, V. Effect of Steeping with Sulfite Salts and Adjunct Acids on Corn Wet-Milling Yields and Starch Properties. **Cereal Chemistry**, v. 82, n. 4, p. 420-424, 2005.

# APÊNDICES

## **APÊNDICE 1 - TABELA DE ANÁLISE DE RISCO DO PROCESSO (PRA)**

A **Tabela 14** apresenta todas as informações analisadas durante o estudo de Análise de Risco do Processo realizado para o sistema de dióxido de enxofre utilizado na unidade da Cargill na cidade de Uberlândia, MG. Com relação à categoria do risco, a sigla PP representa riscos para pessoas e para o público, enquanto a sigla MA representa riscos para o meio ambiente.

**Tabela 14:** Análise de risco do processo de dióxido de enxofre.

Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais	
<b>Nó A: Recebimento de cilindros de SO<sub>2</sub></b>									
1. Problemas no material	1. Cilindro vindo do fornecedor com material errado (com, por exemplo, cloro).	1. Reação química descontrolada com pressurização do sistema e geração de produtos perigosos.	PP	B	4		1. Os cilindros de SO <sub>2</sub> utilizados pela Cargill são dedicados para uso da empresa, diminuindo consideravelmente a possibilidade de erro.	R-1. Implementar auditoria do fornecedor para garantir boas práticas de produção e programa de inspeção dos cilindros.	
2. Efeitos ou influências externas	1. Furo do cilindro pela empilhadeira durante a atividade de substituição da bateria.	1. Liberação em grande escala de material tóxico, causando lesão em pessoas com possibilidade de múltiplas fatalidades.	PP	B	5			1. Treinamento de operação em empilhadeira é um requisito legal. 2. Cilindros passam por inspeções de NR-13 para garantia da confiabilidade de sua estrutura física.	RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação com os órgãos e entidades necessários. R-2. Prever solução de engenharia (p. ex.: talha ou monovia) para descarregamento dos cilindros, eliminando a necessidade de utilizar a empilhadeira.
		2. Liberação em grande escala de material tóxico para fora dos limites da fábrica, alcançando áreas	MA	B	5			1. Treinamento de operação em empilhadeira é um requisito legal.	RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada

Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais
		residenciais da cidade.					2. Cilindros passam por inspeções de NR-13 para garantia da confiabilidade de sua estrutura física.	para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação com os órgãos e entidades necessários.  R-2. Prever solução de engenharia (p. ex.: talha ou monovia) para descarregamento dos cilindros, eliminando a necessidade de utilizar a empilhadeira.
	1. Colisão da empilhadeira com tubulação próxima aos cilindros.	1. Rompimento da tubulação com vazamento de SO <sub>2</sub> residual na linha.	PP	C	2		1. Treinamento de operação em empilhadeira é um requisito legal.  2. Operador utiliza EPI de proteção respiratória durante toda a atividade de descarregamento e substituição dos cilindros.	
3. Erros operacionais ou outros fatores humanos	1. Queda do cilindro do caminhão.	1. Quebra da válvula, com liberação em grande escala de material tóxico, causando lesão em pessoas com possibilidade de múltiplas fatalidades.	PP	C	5		1. Os cilindros são recebidos com uma proteção metálica nas válvulas. Mesmo em caso de queda, não é esperado a quebra das válvulas.	RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação

Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais
		2. Quebra da válvula, com liberação em grande escala de material tóxico para fora dos limites da fábrica, alcançando áreas residenciais da cidade.	MA	C	5		1. Os cilindros são recebidos com uma proteção metálica nas válvulas. Mesmo em caso de queda, não é esperado a quebra das válvulas.	com os órgãos e entidades necessários. R-2. Prever solução de engenharia (p. ex.: talha ou monovia) para descarregamento dos cilindros, eliminando a necessidade de utilizar a empilhadeira. RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação com os órgãos e entidades necessários. R-2. Prever solução de engenharia (p. ex.: talha ou monovia) para descarregamento dos cilindros, eliminando a necessidade de utilizar a empilhadeira.
	2. Rolamento dos cilindros cheios em cima do caminhão.	1. Lesão ao operador que faz o rolamento dos cilindros.	PP	D	3		1. Nenhuma salvaguarda foi identificada.	R-2. Prever solução de engenharia (p. ex.: talha ou monovia) para descarregamento dos

Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais
								cilindros, eliminando a necessidade de utilizar a empilhadeira.
	3. Rolamento dos cilindros vazios no chão.	1. Lesão em pessoas na área de descarregamento.	PP	D	2		1. É feito o isolamento da área ao redor da atividade de descarregamento durante a duração da atividade.	R-3. Prever solução de engenharia para evitar a necessidade de rolar o cilindro em cima do caminhão (p.ex.: cesto envolvendo o cilindro para içamento). R-2. Prever solução de engenharia (p. ex.: talha ou monovia) para descarregamento dos cilindros, eliminando a necessidade de utilizar a empilhadeira.
4. Erro de medição ou de amostragem	1. Não aplicável.							
5. Falha de equipamentos ou instrumentação	1. Cilindro recebido com falha na vedação da válvula.	1. Emissão de SO <sub>2</sub> através de falha na vedação com possibilidade de intoxicação de pessoas.	PP	C	2		1. Nenhuma salvaguarda foi identificada.	R-4. Incluir no procedimento operacional de descarregamento a etapa de verificação de vazamento (realização de teste de solução ou utilizar detector de gases portátil) no ato do recebimento do caminhão com os cilindros. R-5. Solicitar ao

Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais
6. Desvio de parâmetros do processo	1. Não aplicável.							fornecedor a emissão de laudo que confirme a estanqueidade das válvulas antes de receberem o lacre.
7. Falha de utilidades	1. Não aplicável							
8. Falha na integridade ou perda de contenção	1. Ruptura do cilindro por desgaste do material causado por corrosão.	Liberação em grande escala de material tóxico, causando lesão em pessoas com possibilidade de múltiplas fatalidades.	PP	B	5		1. Os cilindros são submetidos a testes pelo fornecedor conforme recomendações da NR-13.	RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação com os órgãos e entidades necessários.  R-1. Implementar auditoria do fornecedor para garantir boas práticas de produção e programa de inspeção dos cilindros.  R-6. Prever ensaio não destrutivo dos cilindros para medição da espessura de chapa. Deverá ser feita para todos os cilindros dedicados para uso da Cargill.

Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais
		2. Liberação em grande escala de material tóxico para fora dos limites da fábrica, alcançando áreas residenciais da cidade.	MA	B	5		1. Os cilindros são submetidos a testes pelo fornecedor conforme recomendações da NR-13.	RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação com os órgãos e entidades necessários.  R-1. Implementar auditoria do fornecedor para garantir boas práticas de produção e programa de inspeção dos cilindros.  R-6. Prever ensaio não destrutivo dos cilindros para medição da espessura de chapa. Deverá ser feita para todos os cilindros dedicados para uso da Cargill.
9. Operação em situações de emergência	1. Utilização de EPI incorreto para combate a vazamentos não esperados (utilização de máscara para gases ao invés de equipamento de respiração autônoma).	1. Exposição a grandes quantidades de SO <sub>2</sub> durante liberação em grande escala, podendo causar danos severos à saúde do(s) combatente(s).	PP	C	4		1. Nenhuma salvaguarda foi identificada.	RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação

Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais
								com os órgãos e entidades necessários.
<b>Nó B: Armazenamento de SO<sub>2</sub></b>								
1. Problemas no material	1. Não aplicável.							
2. Efeitos ou influências externas	1. Fogo externo causado por incêndio nos processos ao redor.	1. Aumento da pressão interna dos cilindros devido a radiação térmica, com possibilidade de ruptura catastrófica do cilindro e liberação em grande escala de material tóxico, causando lesão em pessoas com possibilidade de múltiplas fatalidades.	PP	B	5		1. Nenhuma salvaguarda foi identificada.	RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação com os órgãos e entidades necessários.  R-7. Prever solução de engenharia para enclausuramento dos cilindros com sistema de abatimento de gases (cortina d'água ou sistema de dilúvio).  R-8. Prever dimensionamento de paredes resistentes ao fogo para o enclausuramento dos cilindros de SO <sub>2</sub> .
		2. Aumento da pressão interna dos cilindros devido a radiação térmica, com possibilidade de ruptura	MA	B	5		1. Nenhuma salvaguarda foi identificada.	RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste

Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais
		catastrófica do cilindro e liberação em grande escala de material tóxico para fora dos limites da fábrica, alcançando áreas residenciais da cidade.						<p>PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação com os órgãos e entidades necessários.</p> <p>R-7. Prever solução de engenharia para enclausuramento dos cilindros com sistema de abatimento de gases (cortina d'água ou sistema de dilúvio).</p> <p>R-8. Prever dimensionamento de paredes resistentes ao fogo para o enclausuramento dos cilindros de SO<sub>2</sub>.</p>
3. Erros operacionais ou outros fatores humanos	1. Queda do cilindro vazio da bateria vazia em cima do cilindro cheio da bateria em operação durante a troca da bateria vazia.	1. Possibilidade de ruptura dos mangotes flexíveis conectados ao processo, com liberação de SO <sub>2</sub> em grande escala, causando lesão em pessoas com possibilidade de múltiplas fatalidades.	PP	B	5		1. Nenhuma salvaguarda foi identificada.	<p>RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação com os órgãos e entidades necessários.</p> <p>R-2. Prever solução de engenharia (p. ex.: talha ou</p>

Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais
		2. Possibilidade de ruptura dos mangotes flexíveis conectados ao processo, com liberação de SO2 em grande escala tóxico para fora dos limites da fábrica, alcançando áreas residenciais da cidade.	MA	B	5		1. Nenhuma salvaguarda foi identificada.	<p>monovia) para descarregamento dos cilindros, eliminando a necessidade de utilizar a empilhadeira.</p> <p>R-9. Prever instalação de parede separando fisicamente as duas baterias de cilindros.</p> <p>R-10. Prever a aquisição e disponibilização de kit de emergência para vazamentos em cilindros.</p> <p>RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação com os órgãos e entidades necessários.</p> <p>R-2. Prever solução de engenharia (p. ex.: talha ou monovia) para descarregamento dos cilindros, eliminando a necessidade de utilizar a empilhadeira.</p>

Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais
								R-9. Prever instalação de parede separando fisicamente as duas baterias de cilindros. R-10. Prever a aquisição e disponibilização de kit de emergência para vazamentos em cilindros.
4. Erro de medição ou de amostragem	1. Não aplicável							
5. Falha de equipamentos ou instrumentação	1. Rompimento do anel de vedação do mangote durante a conexão do mangote com o cilindro.	1. Emissão de material tóxico pela vedação, com possibilidade de contaminação do operador.	PP	D	2		1. Procedimento de substituição do anel de vedação em toda troca de cilindro. 2. Operador utiliza EPI de proteção respiratória durante toda a atividade de descarregamento e substituição dos cilindros.	
6. Desvio de parâmetros do processo	1. Desconexão do mangote flexível com o cilindro, causando despressurização da bateria (etapa inerente à atividade).	1. Emissão de material tóxico, com possibilidade de contaminação do operador.	PP	E	2		1. Utilização de um balde com água durante a despressurização para captura do SO <sub>2</sub> remanescente na tubulação. 2. Operador utiliza EPI de proteção respiratória durante toda a atividade	R-11. Prever instalação de um sistema de suporte e vedação dos flexíveis no sistema de SO <sub>2</sub> de forma a evitar a emissão de produto residual durante a substituição dos cilindros.

Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais
7. Falha de utilidades	1. Não aplicável.						de descarregamento e substituição dos cilindros.	
8. Falha na integridade ou perda de contenção	1. Não aplicável.							
9. Operação em situações de emergência	1. Nenhum cenário adicional.							

**Nó C: Alimentação de SO<sub>2</sub> para o processo**

1. Problemas no material	1. Não aplicável.							
2. Efeitos ou influências externas	1. Ruptura catastrófica da tubulação entre as baterias e o tanque por choque mecânico (p.ex.: içamento de materiais).	1. Liberação em grande escala de material tóxico, causando lesão em pessoas com possibilidade de múltiplas fatalidades.	PP	D	5		1. Procedimento de içamento de partes críticas juntamente ao plano de “rigging”.	RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação com os órgãos e entidades necessários.  R-12. Prever instalação de proteção contra queda de materiais onde a tubulação de SO <sub>2</sub> esteja vulnerável.  R-13. Prever instalação de sensor de pressão próximo à entrada de produto no tanque e intertravamento com o diferencial de

Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais
		2. Liberação em grande escala de material tóxico para fora dos limites da fábrica, alcançando áreas residenciais da cidade.	MA	D	5		1. Procedimento de içamento de partes críticas juntamente ao plano de “rigging”.	<p>pressão. Caso o diferencial de pressão esteja alto, as válvulas automáticas na saída de cada bateria devem ser fechadas.</p> <p>RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação com os órgãos e entidades necessários.</p> <p>R-12. Prever instalação de proteção contra queda de materiais onde a tubulação de SO<sub>2</sub> esteja vulnerável.</p> <p>R-13. Prever instalação de sensor de pressão próximo à entrada de produto no tanque e intertravamento com o diferencial de pressão. Caso o diferencial de pressão esteja alto, as válvulas automáticas na saída de cada bateria devem ser fechadas.</p>
3. Erros operacionais ou	1. Abertura indevida da	1. Emissão de SO <sub>2</sub> pelo	PP	D	2		1. Sistema de lavador de	

Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais
outros fatores humanos	linha de <i>by-pass</i> da válvula automática de alimentação de SO <sub>2</sub> para o tanque.	<i>vent</i> do tanque para o ambiente.					gases que causa uma pressão negativa no interior do tanque, direcionando os gases para o sistema de lavagem.  2. Procedimento de manutenção com verificação de fechamento adequado das válvulas e <i>by-pass</i> após atividade de manutenção.	
4. Erro de medição ou de amostragem	1. Não aplicável.							
5. Falha de equipamentos ou instrumentação	1. Quebra da válvula durante alinhamento da bateria (partida do processo).	1. Perda da vedação na válvula, causando vazamento de SO <sub>2</sub> em larga escala pelo anel de vedação com lesão em pessoas e possibilidade de múltiplas fatalidades.	PP	C	4			RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação com os órgãos e entidades necessários.  R-7. Prever solução de engenharia para enclausuramento dos cilindros com sistema de abatimento de gases

Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais
		2. Perda da vedação na válvula, causando vazamento de SO <sub>2</sub> em larga escala pelo anel de vedação para fora dos limites da fábrica, alcançando áreas residenciais da cidade.	MA	C	4			(cortina d'água ou sistema de dilúvio). R-10. Prever a aquisição e disponibilização de kit de emergência para vazamentos em cilindros. RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação com os órgãos e entidades necessários. R-7. Prever solução de engenharia para enclausuramento dos cilindros com sistema de abatimento de gases (cortina d'água ou sistema de dilúvio). R-10. Prever a aquisição e disponibilização de kit de emergência para vazamentos em cilindros.
	2. Falha aberta da válvula automática da	1. Emissão de SO <sub>2</sub> pelo vent do tanque para o	PP	D	2		1. Sistema de lavador de gases que causa uma pressão negativa no	

Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais
	bateria.	ambiente.					interior do tanque, direcionando os gases para o sistema de lavagem.  1. Quando uma bateria acaba, o operador fecha as válvulas manuais antes e depois da válvula automática daquela bateria.	
	3. Falha fechada da válvula automática da bateria.	1. Parada da dosagem de SO <sub>2</sub> para o sistema, sem riscos para a segurança ou para o meio ambiente.						
	4. Falha no traço elétrico de aquecimento na linha de alimentação de SO <sub>2</sub> para o tanque.	1. Obstrução nas linhas de alimentação de SO <sub>2</sub> por congelamento do produto, com possíveis danos na tubulação e liberação de pequenas quantidades de produto tóxico.	PP	D	2		1. Alarme de temperatura baixa na linha de alimentação de SO <sub>2</sub> .	R-14. Prever intertravamento fechando as válvulas automáticas nas linhas de cada bateria caso seja identificada temperatura baixa na linha de alimentação de SO <sub>2</sub> para o tanque.
	5. Falha no pressostato na linha de alimentação de SO <sub>2</sub> para o tanque.	1. Transtornos operacionais, sem problemas para a segurança ou para o meio ambiente.						
	6. Falha aberta da válvula automática de alimentação de SO <sub>2</sub> para	1. Emissão de SO <sub>2</sub> pelo <i>vent</i> do tanque para o ambiente.	PP	D	2		1. Sistema de lavador de gases que causa uma pressão negativa no interior do tanque,	

Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais
		o tanque.						
	7. Falha fechada da válvula automática de alimentação de SO <sub>2</sub> para o tanque.	1. Parada da dosagem de SO <sub>2</sub> para o sistema, sem riscos para a segurança ou para o meio ambiente.						
	8. Falha na malha de controle de pH (leitura menor).	1. Parada da dosagem de SO <sub>2</sub> para o sistema, sem riscos para a segurança ou para o meio ambiente.						
	9. Falha na malha de controle de pH (leitura maior) da água de maceração.	1. Emissão de SO <sub>2</sub> pelo <i>vent</i> do tanque para o ambiente.	PP	D	2		1. Sistema de lavador de gases que causa uma pressão negativa no interior do tanque, direcionando os gases para o sistema de lavagem.	
	10. Falha na malha de controle de nível (leitura menor) do tanque de água de maceração.	1. Transbordo do tanque de água ácida, causando contaminação ambiental.	MA	D	3		1. Área do tanque possui contenção para evitar contaminação do solo ou de corpos hídricos. O conteúdo da contenção é direcionado para um tanque de resíduos.	R-15. Prever instalação de chave de nível alto no tanque, parando a alimentação de água e de SO <sub>2</sub> para o tanque se nível alto for identificado.
	11. Falha na malha de controle de nível (leitura maior) do tanque de	1. Emissão de SO <sub>2</sub> pelo <i>vent</i> do tanque para o ambiente.	PP	D	2		1. Nenhuma salvaguarda foi identificada.	R-16. Prever instalação de chave de nível baixo no tanque, parando a alimentação de SO <sub>2</sub> para o

Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais
	água de maceração.							
6. Desvio de parâmetros do processo	1. Saturação da água no sistema de lavagem de gases.	1. Emissão de SO <sub>2</sub> pelo <i>vent</i> do tanque para o ambiente.	PP	E	2		1. Nenhuma salvaguarda foi identificada.	tanque se nível baixo for identificado. R-17. Instalar sistema de renovação da água de lavagem com temporizador para renovação constante da água do sistema de lavagem de gases.
7. Falha de utilidades	1. Falta de energia elétrica.	1. Ausência do sistema lavador de gases e emissão de SO <sub>2</sub> pelo <i>vent</i> do tanque para o ambiente.	PP	E	2		1. O sistema lavador de gases é conectado a um gerador de emergência, mantendo seu funcionamento mesmo em caso de ausência de energia elétrica.	
8. Falha na integridade ou perda de contenção	1. Ruptura do mangote flexível por desgaste do material (corrosão).	1. Liberação em grande escala de material tóxico, causando lesão em pessoas com possibilidade de múltiplas fatalidades.	PP	D	5		1. Sensores de SO <sub>2</sub> na área de armazenamento de cilindros, com alarme na sala de controle e alarme visual e sonoro local.	RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação com os órgãos e entidades necessários.  R-7. Prever solução de engenharia para enclausuramento dos cilindros com sistema de

Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais
		2. Liberação em grande escala de material tóxico para fora dos limites da fábrica, alcançando áreas residenciais da cidade.	MA	D	5		1. Sensores de SO <sub>2</sub> na área de armazenamento de cilindros, com alarme na sala de controle e alarme visual e sonoro local.	<p>abatimento de gases (cortina d'água ou sistema de dilúvio).</p> <p>R-18. Incluir no procedimento operacional uma verificação frequente da integridade dos cilindros, flexíveis, válvulas, detectores de gases e demais acessórios.</p> <p>R-19. Prever no plano de manutenção a substituição periódica dos flexíveis de acordo com as orientações do fornecedor.</p> <p>RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação com os órgãos e entidades necessários.</p> <p>R-7. Prever solução de engenharia para enclausuramento dos cilindros com sistema de abatimento de gases</p>

Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais
								(cortina d'água ou sistema de dilúvio).
								R-18. Incluir no procedimento operacional uma verificação frequente da integridade dos cilindros, flexíveis, válvulas, detectores de gases e demais acessórios.
								R-19. Prever no plano de manutenção a substituição periódica dos flexíveis de acordo com as orientações do fornecedor.
	2. Ruptura catastrófica do mangote flexível por desgaste do material.	1. Liberação em grande escala de material tóxico, causando lesão em pessoas com possibilidade de múltiplas fatalidades.	PP	D	5		1. Sensores de SO <sub>2</sub> na área de armazenamento de cilindros, com alarme na sala de controle e alarme visual e sonoro local.	RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação com os órgãos e entidades necessários.
								R-7. Prever solução de engenharia para enclausuramento dos cilindros com sistema de abatimento de gases (cortina d'água ou sistema

Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais
		2. Liberação em grande escala de material tóxico para fora dos limites da fábrica, alcançando áreas residenciais da cidade.	MA	D	5		1. Sensores de SO <sub>2</sub> na área de armazenamento de cilindros, com alarme na sala de controle e alarme visual e sonoro local.	<p>de dilúvio).</p> <p>R-18. Incluir no procedimento operacional uma verificação frequente da integridade dos cilindros, flexíveis, válvulas, detectores de gases e demais acessórios.</p> <p>R-19. Prever no plano de manutenção a substituição periódica dos flexíveis de acordo com as orientações do fornecedor.</p> <p>RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação com os órgãos e entidades necessários.</p> <p>R-7. Prever solução de engenharia para enclausuramento dos cilindros com sistema de abatimento de gases (cortina d'água ou sistema de dilúvio).</p>

Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais
	3. Ruptura da tubulação entre as baterias e o tanque (corrosão).	1. Liberação em grande escala de material tóxico, causando lesão em pessoas com possibilidade de múltiplas fatalidades.	PP	D	5		1. Nenhuma salvaguarda foi identificada.	<p>R-18. Incluir no procedimento operacional uma verificação frequente da integridade dos cilindros, flexíveis, válvulas, detectores de gases e demais acessórios.</p> <p>R-19. Prever no plano de manutenção a substituição periódica dos flexíveis de acordo com as orientações do fornecedor.</p> <p>RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação com os órgãos e entidades necessários.</p> <p>R-13. Prever instalação de sensor de pressão próximo à entrada de produto no tanque e intertravamento com o diferencial de pressão. Caso o diferencial de pressão esteja alto, as válvulas automáticas na</p>

Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais
		2. Liberação em grande escala de material tóxico para fora dos limites da fábrica, alcançando áreas residenciais da cidade.	MA	D	5		1. Nenhuma salvaguarda foi identificada.	<p>saída de cada bateria devem ser fechadas.</p> <p>R-20. Prever plano de manutenção das tubulações de SO<sub>2</sub>, incluindo a verificação de flanges e a verificação das condições da tubulação sob o isolamento térmico.</p> <p>RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação com os órgãos e entidades necessários.</p> <p>R-13. Prever instalação de sensor de pressão próximo à entrada de produto no tanque e intertravamento com o diferencial de pressão. Caso o diferencial de pressão esteja alto, as válvulas automáticas na saída de cada bateria devem ser fechadas.</p> <p>R-20. Prever plano de</p>

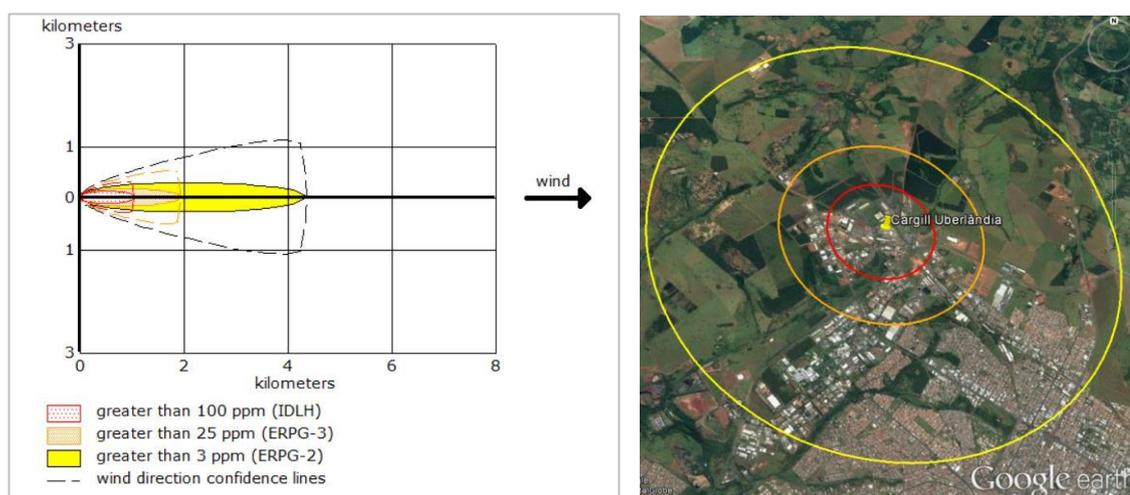
Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais
								manutenção das tubulações de SO <sub>2</sub> , incluindo a verificação de flanges e a verificação das condições da tubulação sob o isolamento térmico.
	4. Furo na linha de alimentação de SO <sub>2</sub> para o tanque por corrosão sob os isolamentos térmicos.	1. Liberação em grande escala de material tóxico, causando lesão em pessoas com possibilidade de múltiplas fatalidades.	PP	D	5		1. Nenhuma salvaguarda foi identificada.	RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação com os órgãos e entidades necessários.  R-20. Prever plano de manutenção das tubulações de SO <sub>2</sub> , incluindo a verificação de flanges e a verificação das condições da tubulação sob o isolamento térmico.
	5. Furo no tubo pescador do tanque de água de maceração causado por corrosão.	1. Emissão de SO <sub>2</sub> pelo <i>vent</i> do tanque para o ambiente.	PP	D	2		1. Sistema de lavador de gases que causa uma pressão negativa no interior do tanque, direcionando os gases para o sistema de lavagem.	RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e

Desvio	Causa	Consequência	Categoria do risco	Frequência	Severidade	Risco	Salvaguardas existentes	Recomendações adicionais
								<p>controle e a comunicação com os órgãos e entidades necessários.</p> <p>R-20. Prever plano de manutenção das tubulações de SO<sub>2</sub>, incluindo a verificação de flanges e a verificação das condições da tubulação sob o isolamento térmico.</p>
	6. Corrosão nas conexões de flange.	1. Emissão de SO <sub>2</sub> pelo <i>vent</i> do tanque para o ambiente.	MA	D	2		1. Nenhuma salvaguarda foi identificada.	<p>RG-3. Atualizar o Plano de Resposta a Emergências incluindo todos os cenários de risco identificados neste PRA, a resposta adequada para cada um deles, os EPI necessários para combate e controle e a comunicação com os órgãos e entidades necessários.</p> <p>R-20. Prever plano de manutenção das tubulações de SO<sub>2</sub>, incluindo a verificação de flanges e a verificação das condições da tubulação sob o isolamento térmico.</p>
9. Operação em situações de emergência	em	1. Nenhum cenário adicional.						

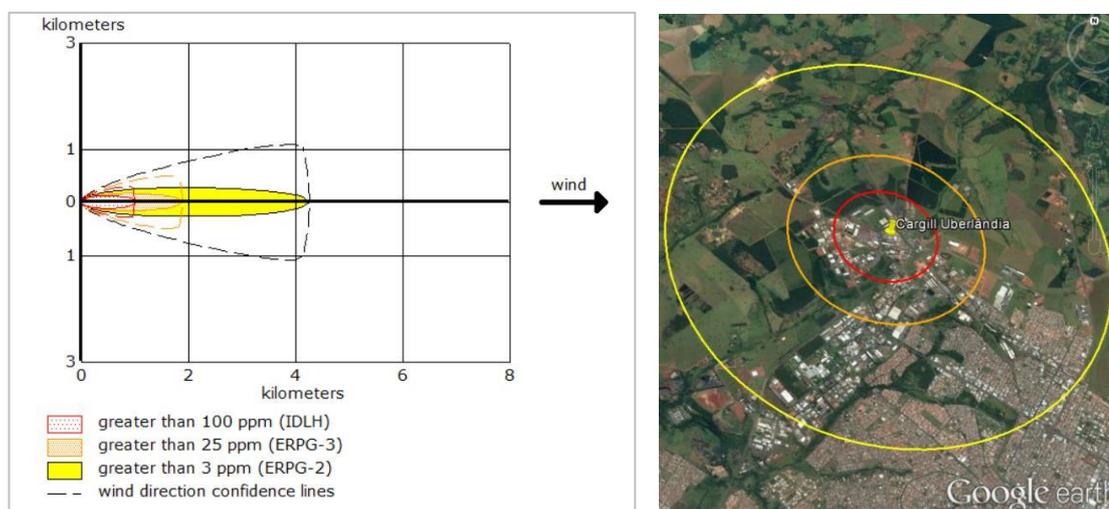
## APÊNDICE 2 - RESULTADOS DE MODELAGEM NO SOFTWARE ALOHA

As Figuras 8 a 27 ilustram a distância e a largura das nuvens referentes a cada hipótese de modelagem de consequências para os cenários de liberação de SO<sub>2</sub> provenientes da Análise de Risco do Processo. Os raios foram obtidos a partir da modelagem feita com o auxílio do *software* ALOHA e impressos na imagem de satélite da unidade da Cargill em Uberlândia, MG, obtidas através do *software* Google Earth. As linhas em vermelho representam a concentração referente ao IDLH; as linhas em laranja representam a concentração referente ao ERPG-3; e as linhas em amarelo representam a concentração referente ao ERPG-2. A concentração de ERPG-1 não foi considerada pois não apresenta um risco imediato de exposição.

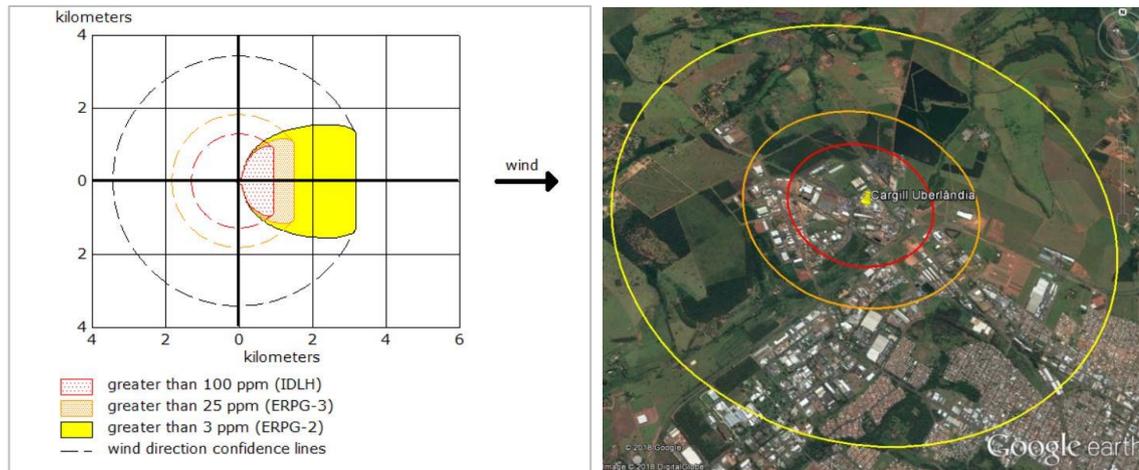
**Figura 8:** Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo do cilindro pelo garfo da empilhadeira em condições de dia e verão.



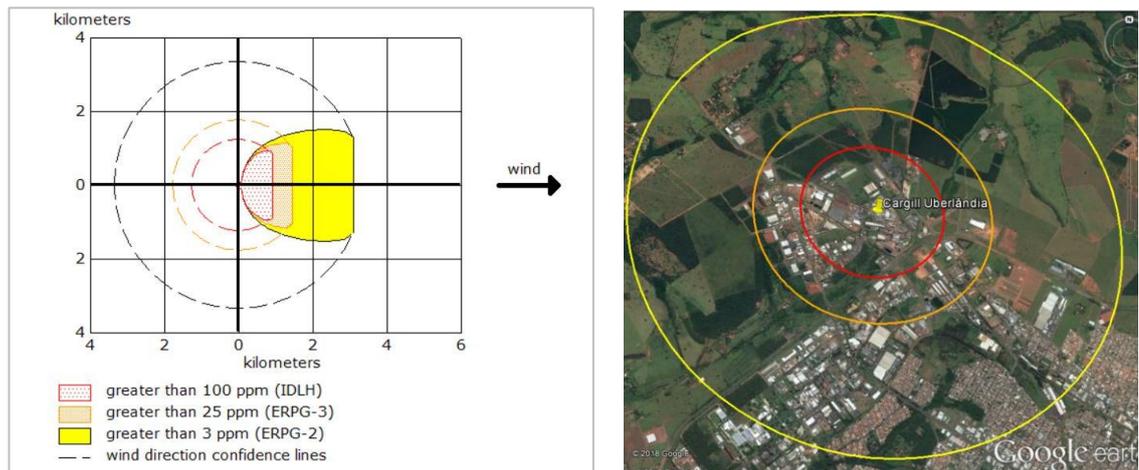
**Figura 9:** Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo do cilindro pelo garfo da empilhadeira em condições de dia e inverno.



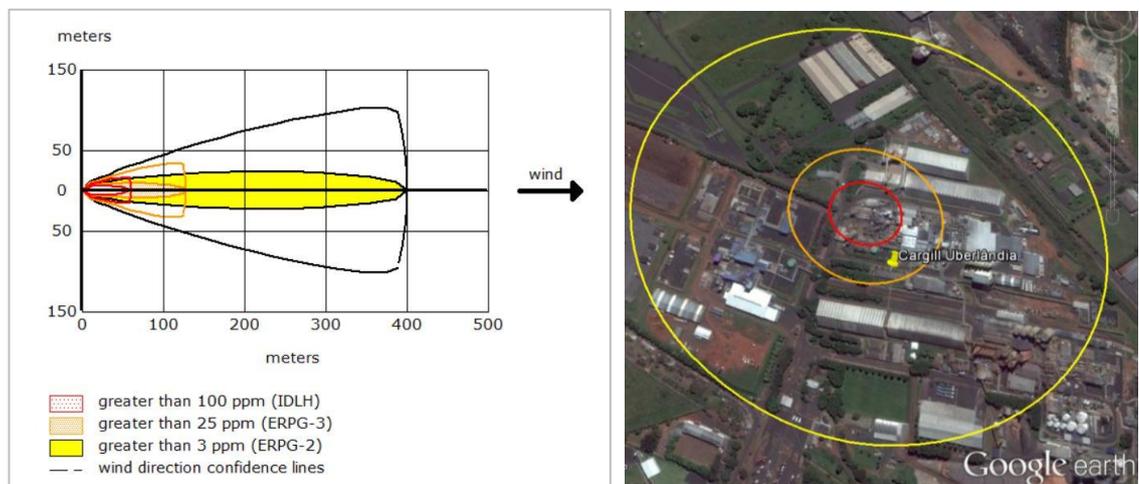
**Figura 10:** Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo do cilindro pelo garfo da empilhadeira em condições de noite e verão.



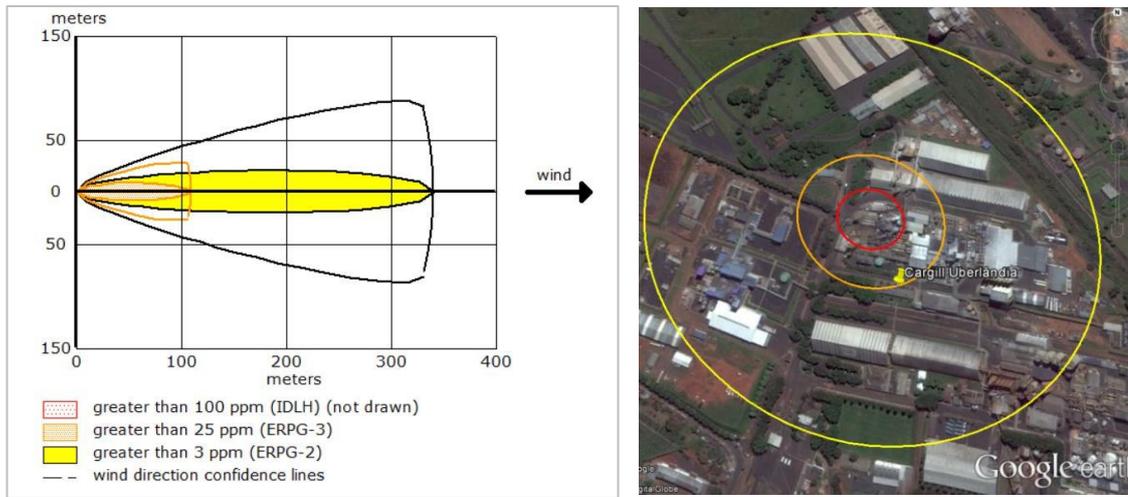
**Figura 11:** Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo do cilindro pelo garfo da empilhadeira em condições de noite e inverno.



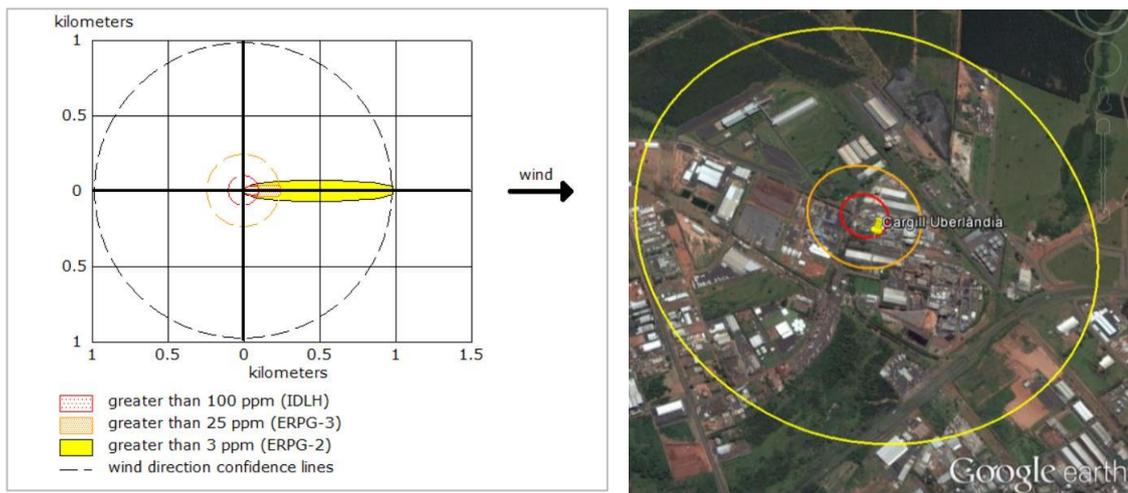
**Figura 12:** Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo parcial (20%) no mangote flexível de 1/2" em condições de dia e verão.



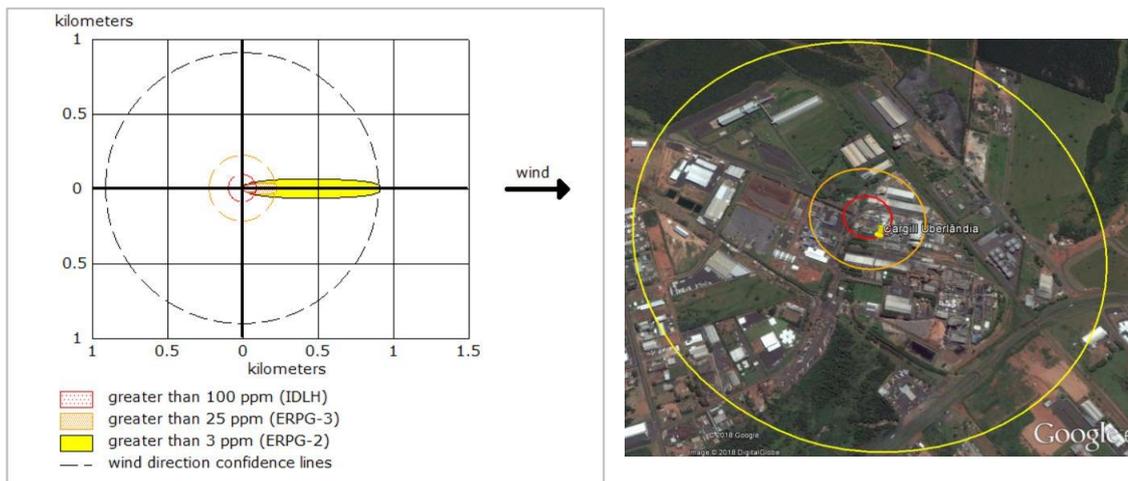
**Figura 13:** Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo parcial (20%) no mangote flexível de ½” em condições de dia e inverno.



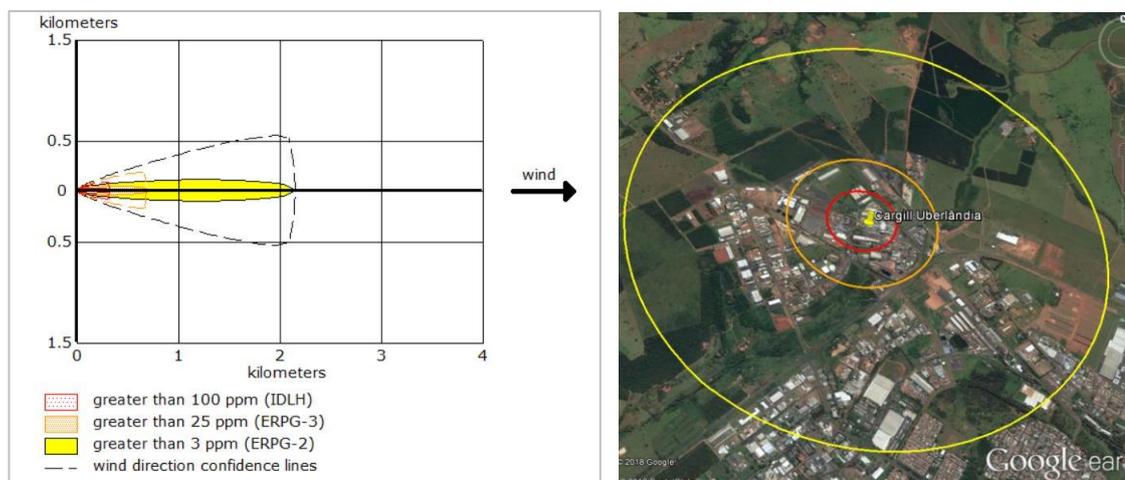
**Figura 14:** Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo parcial (20%) no mangote flexível de ½” em condições de noite e verão.



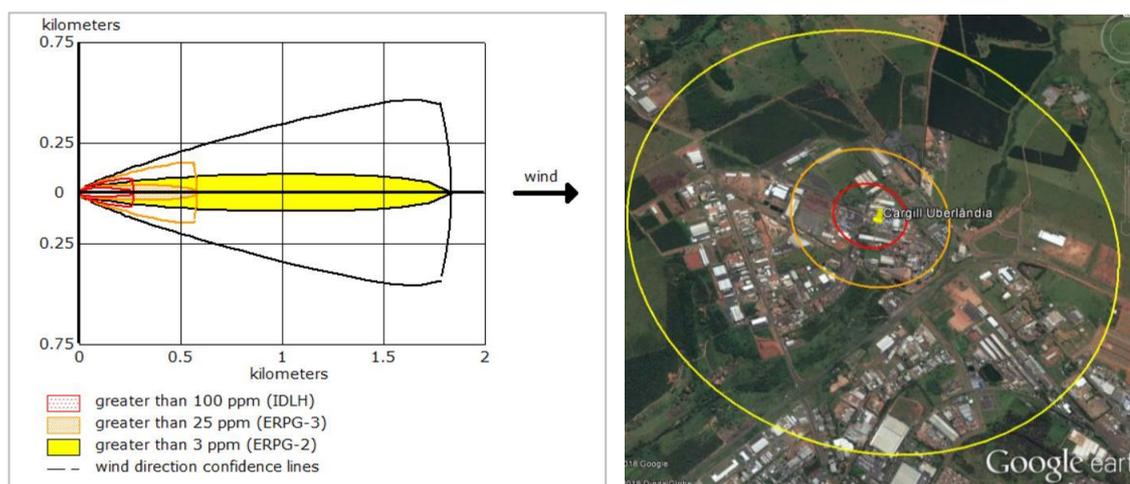
**Figura 15:** Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo parcial (20%) no mangote flexível de ½” em condições de noite e inverno.



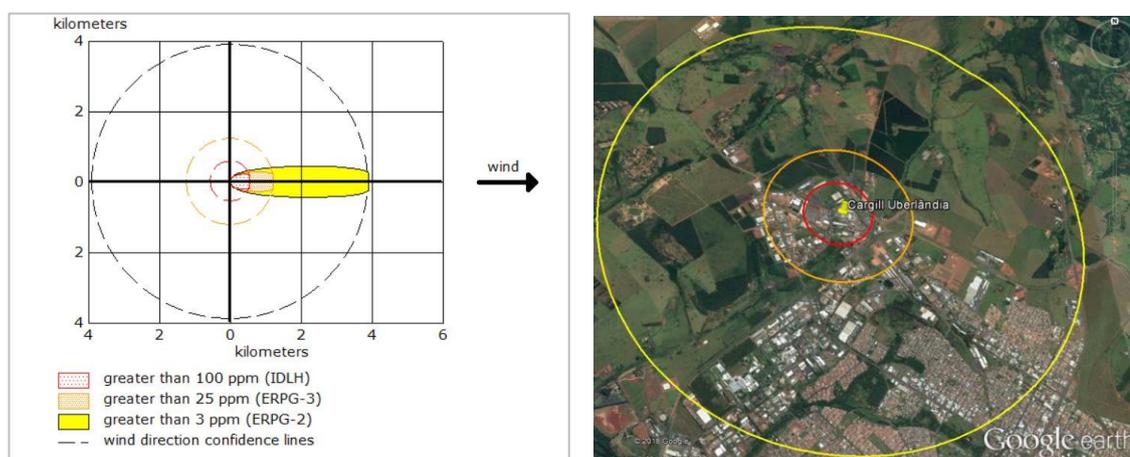
**Figura 16:** Distância e a largura das nuvens para a hipótese de rompimento do mangote flexível em condições de dia e verão.



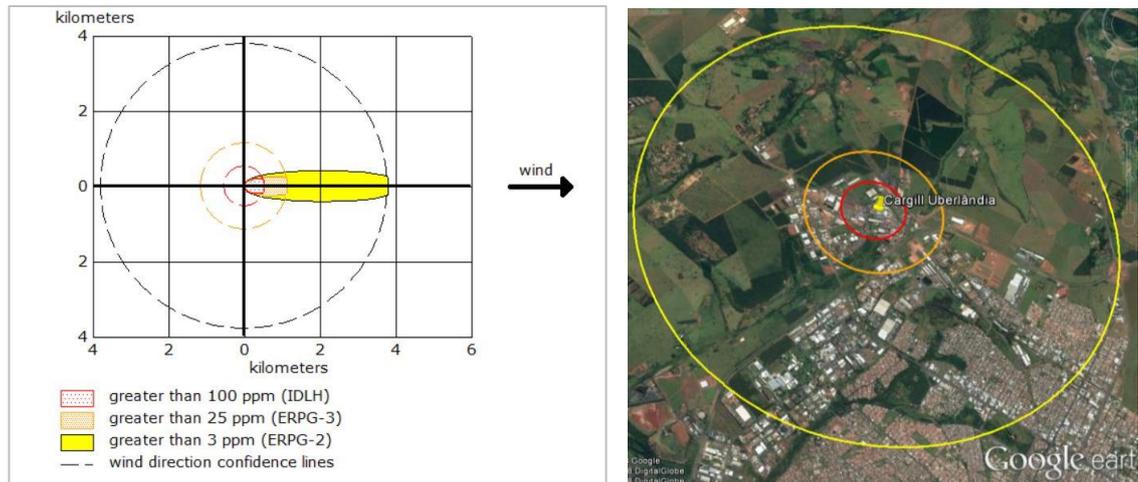
**Figura 17:** Distância e a largura das nuvens para a hipótese de rompimento do mangote flexível em condições de dia e inverno.



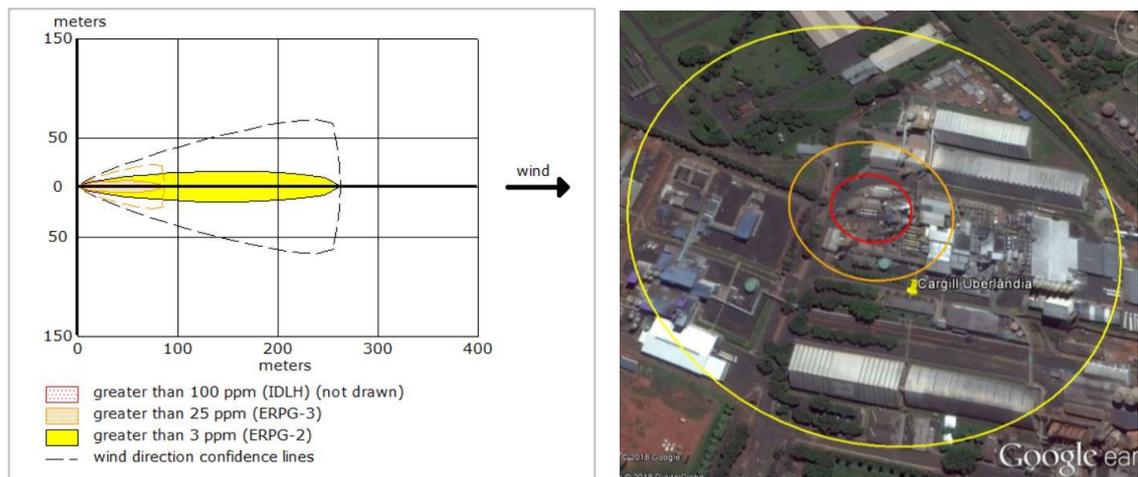
**Figura 18:** Distância e a largura das nuvens para a hipótese de rompimento do mangote flexível em condições de noite e verão.



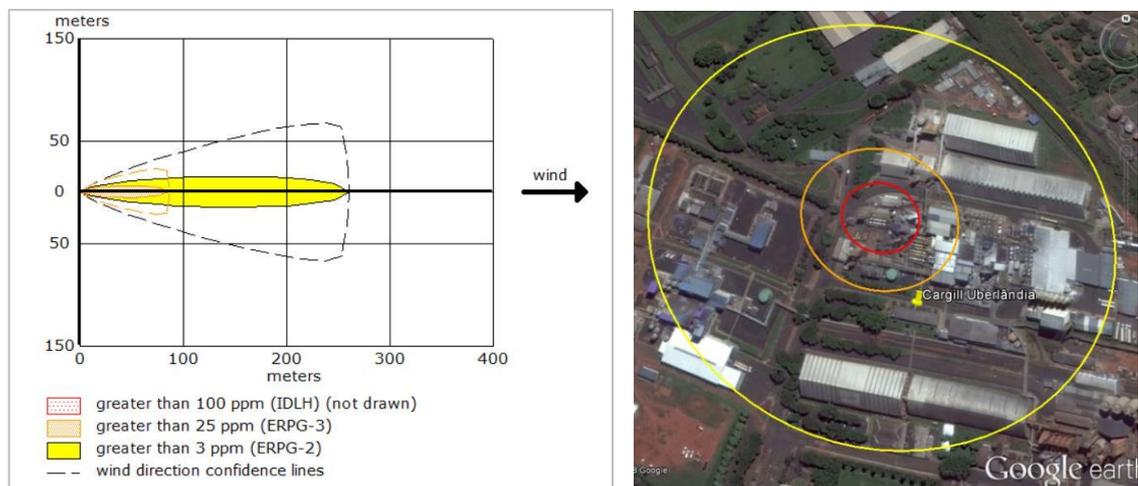
**Figura 19:** Distância e a largura das nuvens para a hipótese de rompimento do mangote flexível em condições de noite e inverno.



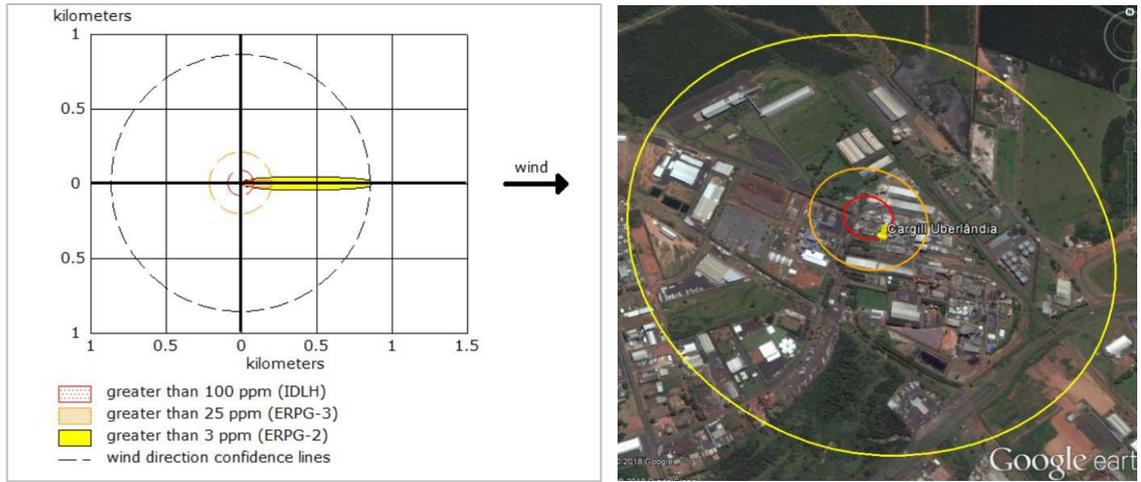
**Figura 20:** Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo parcial (20%) na tubulação de 1" em condições de dia e verão.



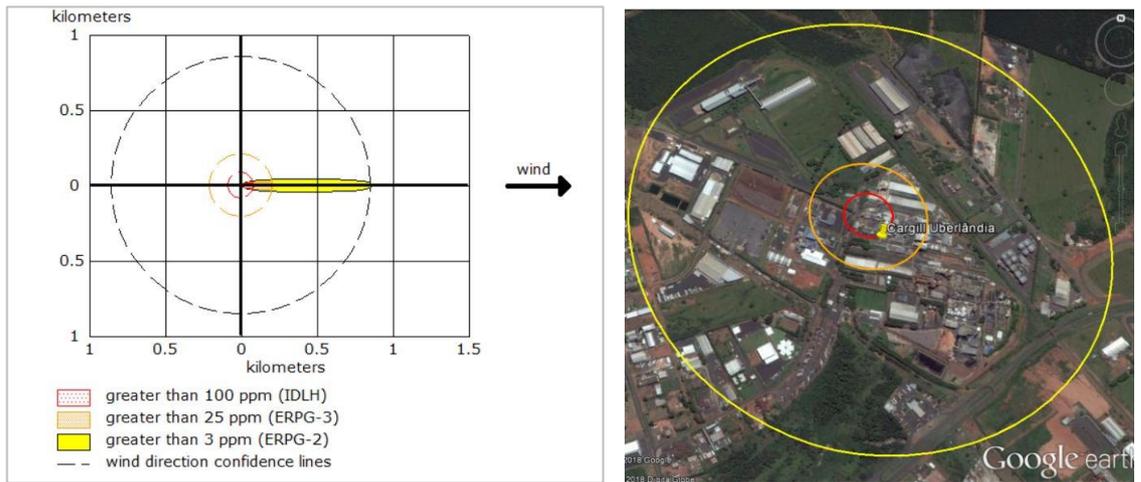
**Figura 21:** Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo parcial (20%) na tubulação de 1" em condições de dia e inverno.



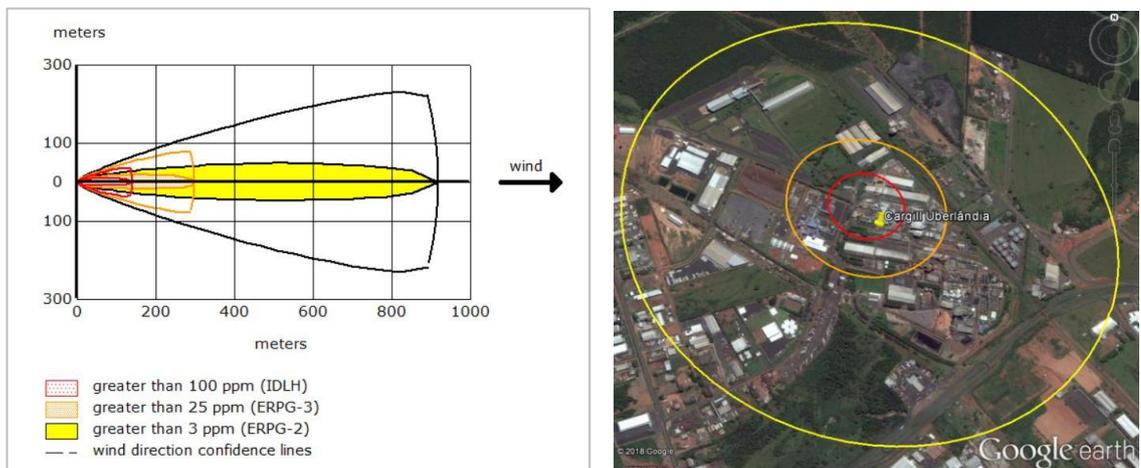
**Figura 22:** Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo parcial (20%) na tubulação de 1" em condições de noite e verão.



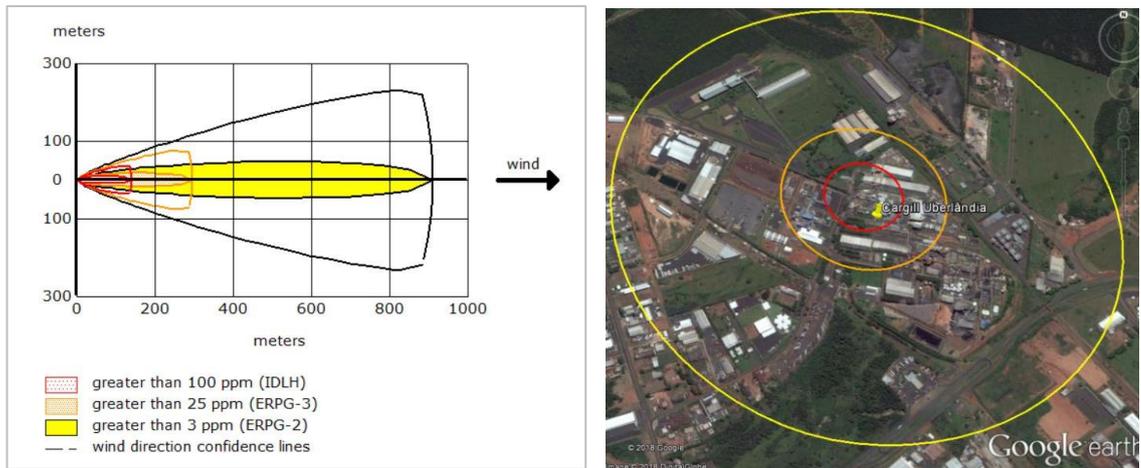
**Figura 23:** Distância e a largura das nuvens para a hipótese de furo parcial (20%) na tubulação de 1" em condições de noite e inverno.



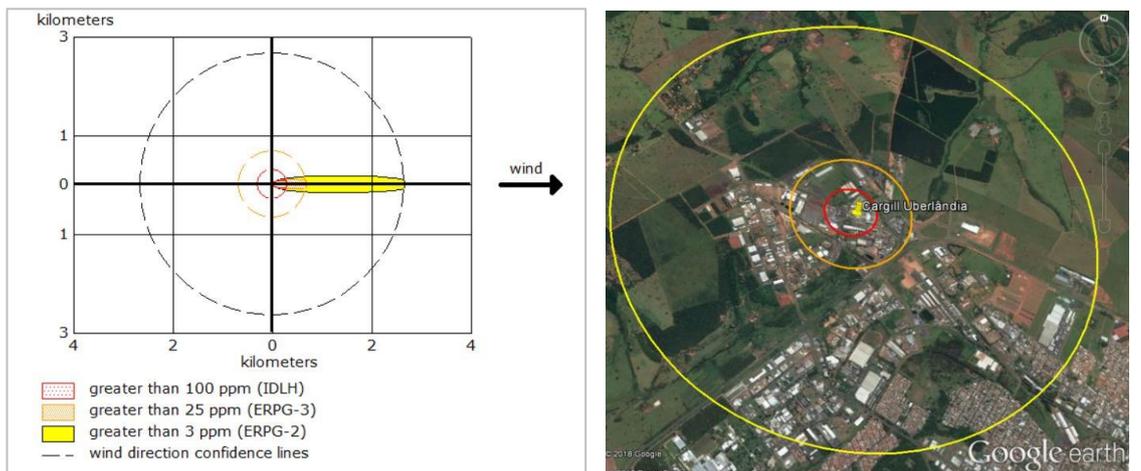
**Figura 24:** Distância e a largura das nuvens para a hipótese de rompimento da tubulação em condições de dia e verão.



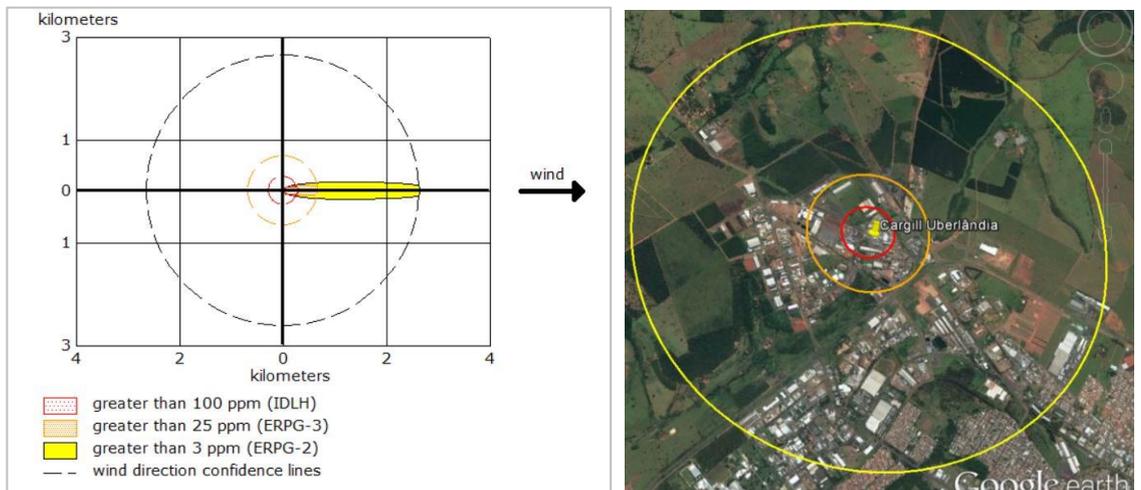
**Figura 25:** Distância e a largura das nuvens para a hipótese de rompimento da tubulação em condições de dia e inverno.



**Figura 26:** Distância e a largura das nuvens para a hipótese de rompimento da tubulação em condições de noite e verão.



**Figura 27:** Distância e a largura das nuvens para a hipótese de rompimento da tubulação em condições de noite e inverno.



# **ANEXOS**

## **ANEXO 1 - AUTORIZAÇÃO PARA USO DE INFORMAÇÃO**

Este anexo apresenta a Autorização para Uso de Informação emitida pela Cargill para utilização das informações referentes ao processo industrial da empresa. A autorização foi emitida por Eduardo Monteiro Guerra, Gerente América Latina de Saúde e Segurança para a unidade de Amidos e Adoçantes América Latina.



Uberlândia, 26 de Outubro de 2017.

## AUTORIZAÇÃO PARA USO DE INFORMAÇÃO

Como representante da empresa Cargill Agrícola, autorizo a utilização das informações abaixo para fins acadêmicos na Dissertação de Mestrado de título "Metodologias de Análise de Risco do Processo Aplicadas a um Caso Real da Indústria Agro-Alimentícia", de autoria do aluno de pós-graduação Gustavo Peron Mendes e Silva, apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Química da Universidade Federal de Viçosa.

As informações que podem ser utilizadas são as seguintes:

- Inventário de SO<sub>2</sub> do processo;
- Processo de recebimento de SO<sub>2</sub> na planta;
- Processo de conexão dos cilindros e alimentação de SO<sub>2</sub> a partir dos cilindros até o tanque de água de maceração (tanque de *mill water*);

Essas informações não devem ser utilizadas para outros fins que não o determinado nesta autorização.

  
**Eduardo Monteiro Guerra**  
 Health & Safety/Regional Leader  
 Cargill Starches & Sweeteners Latin America

**Contato:** Eduardo Guerra  
 +55 34 3218-5292  
[Eduardo\\_Guerra@cargill.com](mailto:Eduardo_Guerra@cargill.com)

Cargill  
 Food Ingredients & Bio-Industrial  
 Starches, Sweeteners & Texturizers  
 Latin America

Rua Will Cargill, 880  
 Distrito Industrial  
 Uberlândia, MG, Brasil  
 CEP: 38402-350

+55 34 3218-4900  
[www.cargill.com.br](http://www.cargill.com.br)