

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Daniel Turco Teixeira



ESTUDO DE ANÁLISE DE RISCO DE UMA PLANTA DE SÍNTESE
DE AMÔNIA

RIO DE JANEIRO

2023

Daniel Turco Teixeira

ESTUDO DE ANÁLISE DE RISCO DE UMA PLANTA DE SÍNTESE DE AMÔNIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Orientador: Prof. Carlos André Vaz Júnior, D. Sc.

Rio de Janeiro

2023

CIP - Catalogação na Publicação

T184e Teixeira, Daniel Turco
 Estudo de análise de risco de uma planta de
 síntese de amônia / Daniel Turco Teixeira. -- Rio de
 Janeiro, 2023.
 139 f.

 Orientador: Carlos André Vaz Junior.
 Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
 Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de
 Química, Bacharel em Engenharia Química, 2023.

 1. Estudo de Análise de Risco. 2. Síntese de
 amônia. 3. Análise Preliminar de Risco. 4. Análise
 Quantitativa de Risco. I. Junior, Carlos André Vaz
 , orient. II. Título.

Daniel Turco Teixeira

ESTUDO DE ANÁLISE DE RISCO DE UMA PLANTA DE SÍNTESE DE AMÔNIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado em 20 de dezembro de 2023.

Carlos André Vaz Junior, D.Sc., UFRJ

Ingrid Azevedo de Oliveira Young, D.Sc., UFRJ

Andressa dos Santos Nicolau, D.Sc., UFRJ

Rio de Janeiro
2023

RESUMO

Turco Teixeira, Daniel. **Estudo de Análise de Risco de uma Planta de Síntese de Amônia**. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Neste trabalho foi desenvolvido um Estudo de Análise de Risco conforme estrutura da literatura, constituído de fases qualitativa e quantitativa, para avaliação de uma planta de síntese de amônia alocada em área atualmente desocupada de um distrito industrial. A fase qualitativa, com caráter de seleção de hipóteses acidentais (HA) para a fase quantitativa, foi feita através de uma Análise Preliminar de Riscos (APR). A Análise Quantitativa de Risco (AQR) foi feita por meio dos programas da Gexcon *Effects*, para avaliação de distâncias de danos consequentes das hipóteses selecionadas, e *Riskcurves*, para cálculo dos Riscos Individual e Social.

A planta analisada neste trabalho foi conceitualizada a partir dos equipamentos selecionados em um estudo de segurança da planta de síntese de amônia OCI Nitrogen, assim como suas dimensões e condições de processo. A planta foi alocada em um distrito industrial do Brasil, e as populações residenciais do entorno obtidas a partir de dados do IBGE do Censo 2010.

Na APR, as hipóteses acidentais foram classificadas de acordo com a severidade e frequência de ocorrência de suas consequências, a partir das quais receberam uma classificação de risco, levando à seleção de 70 HAs. Na fase quantitativa, foram identificados 11 equipamentos cujas HAs levavam a danos que superavam os limites da planta. A frequência de ocorrência das tipologias acidentais destes equipamentos foi calculada, e através dos danos e frequências calculados, obteve-se um Risco Individual na região de risco a ser reduzido e um Risco Social tolerável para a instalação analisada.

Com os resultados encontrados, discutiu-se quais foram as substâncias, tipologias acidentais e equipamentos com maiores alcances de danos, e como as condições de processo tiveram influência sobre isso. Ademais, foram discutidos os fatores que influenciaram os resultados de Risco Individual e Social, e quais medidas mitigadoras poderiam ser empregadas.

Palavras-chave: amônia; APR; AQR.

ABSTRACT

Turco Teixeira, Daniel. **Estudo de Análise de Risco de uma Planta de Síntese de Amônia.** Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

In this work, a Risk Analysis Study was developed, consisting of qualitative and quantitative phases, to assess an ammonia synthesis plant. The qualitative phase, involving the selection of accidental hypotheses (AH) for the quantitative phase, was conducted through a Preliminary Risk Analysis (PRA). The Quantitative Risk Analysis (QRA) was performed using Gexcon programs Effects, to evaluate damage distances resulting from selected hypotheses, and Riskcurves, for calculating Individual and Societal Risks.

The plant analyzed in this study was conceptualized based on equipment selected in a safety study of the OCI Nitrogen ammonia synthesis plant, along with their dimensions and process conditions. The plant was put in an industrial district in Brazil, and the residential population in the surrounding area was obtained from IBGE data from the 2010 Census.

In the PRA, accidental hypotheses were classified based on the severity and frequency of their consequences, leading to a risk classification for each. This process resulted in the selection of 70 AHs. In the quantitative phase, it was identified that 11 different equipment had associated AHs which led to damages exceeding plant limits. The frequency of occurrence of accidental typologies for these equipment was calculated, and using the calculated damages and frequencies, it was obtained an Individual Risk in the As Low As Reasonably Practicable region and a tolerable Societal Risk for the analyzed installation.

With the results found, it was discussed which were the substances, accidental typologies, and equipment with the greatest damage reach, as well as the influence of process conditions over those. Additionally, factors influencing Individual and Societal Risk results were discussed, along with potential mitigating measures.

Keywords: ammonia; PRA; QRA.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 2.1 – Processo de identificação de perigos e avaliação de risco.
- Figura 2.2 – Matriz de risco.
- Figura 2.3 – Processo de análise de consequências.
- Figura 2.4 – Chaves lógicas em árvore de falhas.
- Figura 2.5 – Estrutura de árvore de falhas.
- Figura 2.6 – Árvore de eventos para vazamento instantâneo de gás pressurizado.
- Figura 2.7 – Árvore de eventos para vazamento contínuo de gás pressurizado.
- Figura 2.8 – Exemplo de representação do risco individual por isoriscos.
- Figura 2.9 – Critério de tolerabilidade do risco individual.
- Figura 2.10 – Exemplo de curva FN.
- Figura 2.11 – Critério de tolerabilidade do risco social.
- Figura 3.1 – Interface do Effects 12.
- Figura 3.2 – Interface do Riskcurves 12.
- Figura 3.3 – Coeficientes de dispersão para áreas rurais.
- Figura 3.4 – Coeficientes de dispersão para áreas urbanas.
- Figura 3.5 – Relação entre L, estabilidade e z_0 .
- Figura 3.6 – Etapas de cálculo do modelo de Chamberlain.
- Figura 3.7 – Ondas de choque típicas de um VCE.
- Figura 3.8 – Sobrepressão máxima frontal – Multi-Energia.
- Figura 3.9 – Sobrepressão máxima dinâmica – Multi-Energia.
- Figura 3.10 – Duração da fase positiva e formato da onda de choque – Multi-Energia.
- Figura 3.11 – Distribuição normal de resposta típica.
- Figura 3.12 – Curva log(dose)-resposta típica
- Figura 4.1 – Fluxograma simplificado do processo.
- Figura 4.2 – Materiais disponíveis no *Effects* 12 para caracterização do solo.
- Figura 4.3 – Perímetro da OCI Nitrogen.
- Figura 4.4 – Área da planta estudada.
- Figura 4.5 – Setores censitários próximos à planta de síntese de amônia.
- Figura 4.6 – Estabelecimentos próximos à planta de síntese de amônia.
- Figura 5.1 – Matriz de risco da planta de síntese de amônia.
- Figura 5.2 – Risco Individual da planta de síntese de amônia.
- Figura 5.3 – Contribuições ao Risco Social da planta de síntese de amônia.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 2.1 – Modelo de planilha para APR.
- Tabela 2.2 – Categorias de frequência.
- Tabela 2.3 – Categorias de severidade.
- Tabela 2.4 – Categorias de risco.
- Tabela 2.5 – Frequências de cenários de tanque pressurizado acima do chão.
- Tabela 2.6 – Frequências de cenários de tubulações acima do chão.
- Tabela 2.7 – Frequências de cenários de vaso de reação/processo.
- Tabela 2.8 – Frequências de cenários de bombas/compressores recíprocos.
- Tabela 2.9 – Frequências de cenários de trocadores de calor/condensadores.
- Tabela 2.10 – Cálculo das probabilidades das tipologias.
- Tabela 2.11 – Probabilidade de ignição imediata p_{ii} .
- Tabela 2.12 – Categorias de substâncias inflamáveis.
- Tabela 2.13 – Probabilidade de ignição retardada p_{ir} .
- Tabela 2.14 – Fração da população abrigada.
- Tabela 2.15 – Exemplo de cenários acidentais para construção da curva FN.
- Tabela 2.16 – Cenários acidentais ordenados para construção da curva FN.
- Tabela 3.1 – Massa na nuvem de vapor após liberação instantânea de gás liquefeito.
- Tabela 3.2 – Classes de estabilidade Pasquill-Gifford.
- Tabela 3.3 – Condições meteorológicas assumidas.
- Tabela 3.4 – Altura de mistura h_i .
- Tabela 3.5 – Comprimentos de rugosidade de superfície z_0 .
- Tabela 3.6 – Conversão de probit para probabilidade.
- Tabela 4.1 – Equipamentos avaliados na APR.
- Tabela 4.2 – Altura dos equipamentos da planta.
- Tabela 4.3 – Inventários a serem vazados dos equipamentos da planta.
- Tabela 4.4 – Setores censitários próximos à planta de síntese de amônia.
- Tabela 4.5 – Estabelecimentos próximo à planta de síntese de amônia.
- Tabela 5.1 – Hipóteses Acidentais avaliadas quantitativamente.
- Tabela 5.2 – Resultados das simulações de efeitos físicos do reator de dessulfurização.
- Tabela 5.3 – Resultados das simulações de efeitos físicos do absorvedor de CO₂.

Tabela 5.4 – Resultados das simulações de efeitos físicos do separador de efluente de absorção de CO₂.

Tabela 5.5 – Resultados das simulações de efeitos físicos do reator de metanação.

Tabela 5.6 – Resultados das simulações de efeitos físicos do resfriador de gás de síntese (SS).

Tabela 5.7 – Resultados das simulações de efeitos físicos do compressor de gás de síntese.

Tabela 5.8 – Resultados das simulações de efeitos físicos da peneira molecular.

Tabela 5.9 – Resultados das simulações de efeitos físicos do trocador de calor de gás de síntese (TS).

Tabela 5.10 – Resultados das simulações de efeitos físicos do reator de síntese.

Tabela 5.11 – Resultados das simulações de efeitos físicos da caldeira de calor residual do loop de síntese (TS).

Tabela 5.12 – Resultados das simulações de efeitos físicos do trocador de calor de gás de síntese (SS).

Tabela 5.13 – Resultados das simulações de efeitos físicos do resfriador do efluente de síntese de NH₃ (TS).

Tabela 5.14 – Resultados das simulações de efeitos físicos do separador de amônia.

Tabela 5.15 – Resultados das simulações de efeitos físicos do vaso de expansão de amônia.

Tabela 5.16 – Resultados das simulações de efeitos físicos do resfriador de efluente de síntese A (SS).

Tabela 5.17 – Resultados das simulações de efeitos físicos do resfriador de efluente de síntese B (SS)

Tabela 5.18 – Resultados das simulações de efeitos físicos do resfriador de efluente de síntese C (SS)

Tabela 5.19 – Resultados das simulações de efeitos físicos do resfriador de efluente de síntese D (SS)

Tabela 5.20 – Resultados das simulações de efeitos físicos do compressor de amônia.

Tabela 5.21 – Resultados das simulações de efeitos físicos do condensador de amônia.

Tabela 5.22 – Resultados das simulações de efeitos físicos da bomba de produto de amônia.

Tabela 5.23 – Resultados das simulações de efeitos físicos do vaso coletor de amônia.

Tabela 5.24 – Resultados das simulações de efeitos físicos do tanque pulmão de amônia.

Tabela 5.25 – Cálculo das frequências das tipologias.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALARP	<i>As Low as Reasonably Practicable</i>
APP	Análise Preliminar de Perigos
AQR	Análise Quantitativa de Risco
BLEVE	<i>Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion</i>
DIPPR	<i>Design Institute for Physical Properties</i>
EPI	Equipamentos de Proteção Individual
HA	Hipótese Acidental
HAZOP	<i>Hazard and Operability Studies</i>
HCp	Hidrocarbonetos pesados
HTS	<i>High Temperature Shift</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naaturais Renováveis
LTS	<i>Low Temperture Shift</i>
NT	Norma Técnica
Probit	<i>Probability unit</i>
RI	Risco Individual
RS	Risco Social
SEP	<i>Surface Emissive Power</i>
SS	<i>Shell Side</i>
TS	<i>Tube Side</i>
VCE	<i>Vapour Cloud Explosion</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

μ_i	Massa molar da substância i ($\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$)
a_a	Velocidade do som em ar ambiente ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
A_e	Área transversal de saída (m^2)
A_f	Seção transversal do jato após <i>flash</i> (m^2)
A_h	Área da seção transversal do orifício (m^2)
A_p	Área transversal de tubulação (m^2)
$c(x,y,z,t)$	Concentração no ponto x,y,z no momento t (mg/m^3)
C_c	Coefficiente de contração (-)
C_d	Coefficiente de descarga (-)
C_f	Coefficiente de fricção (-)
C_p	Calor específico a pressão constante ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
C_v	Calor específico a volume constante ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
d_p	Diâmetro interno de tubulação (m)
E	Energia disponível (J)
F	Parâmetro de Coriolis (s^{-1})
f_D	Fator de atrito (-)
F_D	Fração de mortes (-)
f_S	Frequência de falha S (-)
F_x	Dispersão longitudinal (m^{-1})
F_y	Dispersão lateral (m^{-1})
F_z	Dispersão vertical (m^{-1})
H_e	Entalpia de fluido nas condições de saída (J)
H_f	Entalpia de fluido após o <i>flash</i> (J)
h_i	Altura de mistura (m)
i_S	Impulso positivo ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
L	Comprimento de Monin-Obukhov (m)
l_p	Comprimento de tubulação (m)
N_{ponto}	População no ponto (pessoas)
P_0	Pressão inicial do gás (Pa)
p_a	Pressão ambiente/atmosférica (Pa)
P_a	Pressão atmosférica (Pa)

P_d	Letalidade (-)
p_{dyn}	Pressão dinâmica máxima (Pa)
p_{dyn}'	Pressão dinâmica máxima adimensional (-)
P_e	Pressão de saída (Pa)
P_e	Pressão na tubulação (Pa)
P_i	Probabilidade de tipologia i (-)
P_M	Probabilidade de classe de estabilidade M (-)
P_s	Sobrepresão máxima frontal (Pa)
P_s'	Sobrepresão máxima frontal adimensional (-)
P_V	Pressão de vapor (Pa)
P_φ	Probabilidade de direção do vento φ (-)
Q	Radiação térmica ($W.m^{-2}$)
q_s	Vazão mássica ($kg.s^{-1}$)
r	Distância do centro da explosão (m)
r'	Distância do centro da explosão escalonada (-)
r_{fb}	Raio da bola de fogo (m)
t	Tempo (s)
T_B	Temperatura de ebulição (K)
t_p	Duração da fase positiva (s)
t_p'	Duração da fase positiva adimensional (-)
u^*	Velocidade de fricção ($m.s^{-1}$)
u_a	Velocidade do vento ($m.s^{-1}$)
u_e	Velocidade de fluido nas condições de saída ($m.s^{-1}$)
u_f	Velocidade de fluido após o <i>flash</i> ($m.s^{-1}$)
u_L	Velocidade média de escoamento ($m.s^{-1}$)
Y	Variável probit (-)
z_0	Comprimento de rugosidade de superfície (m)
α_c	Absorção do gás carbônico (-)
α_w	Absorção do vapor d'água (-)
γ	Coefficiente de Poisson (-)
$\Delta N_{S,M,\varphi,i}$	Número de mortes esperadas da hipótese acidental S, com classe de estabilidade
M	direção do vento φ e tipologia i (ano^{-1})
ΔP	Queda de pressão (Pa)

$\Delta RI_{S,M,\varphi,i}$	Contribuição da hipótese acidental S, com classe de estabilidade M, direção do vento φ e tipologia i (ano ⁻¹)
ρ	Densidade (kg.m ⁻³)
ρ_0	Densidade inicial do gás (kg.m ⁻³)
ρ_L	Densidade de líquido (kg.m ⁻³)
σ_x	Coefficiente de difusividade na direção do vento (m)
σ_y	Coefficiente de difusividade perpendicular ao vento (m)
σ_z	Coefficiente de difusividade vertical (m)
τ_a	Transmissividade atmosférica (-)
Φ	Latitude (-)
χ	Fração flasheada (-)
ψ	Coefficiente de escoamento (-)
Ω	Rotação da terra (s ⁻¹)
P	Probabilidade (-)
R	Constante universal dos gases perfeitos (J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
T	Temperatura (K)
v	Inverso da densidade (m ³ .kg ⁻¹)
z	Fator de compressibilidade (-)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 INTRODUÇÃO À SEGURANÇA DE PROCESSOS	16
2.1 CONCEITOS BÁSICOS	16
2.2 ANÁLISE QUALITATIVA DE RISCO	17
2.2.1 ANÁLISE PRELIMINAR DE RISCO	20
2.3 ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCO	25
2.3.1 Cálculo dos Efeitos Físicos e da Vulnerabilidade	26
2.3.2 Estimativa de Frequências Acidentais	28
2.3.2.1 Árvore de Falhas	28
2.3.2.2 Frequências de Falha Padrão	30
2.3.2.3 Árvores de Evento	33
2.3.2.4 Estabilidade Atmosférica e Direções do Vento	36
2.3.3 Estimativa Populacional	36
2.3.4 Cálculo do Risco	38
2.3.4.1 Cálculo do Risco Individual	38
2.3.4.2 Cálculo do Risco Social	41
3 ESCOLHA DE SOFTWARE E MODELOS UTILIZADOS	45
3.1 MODELOS DE FONTE	47
3.2 MODELOS DE DISPERSÃO	52
3.2.1 Classes de Estabilidade Pasquill-Gifford	52
3.2.2 Modelagem de Dispersões	54
3.3 MODELOS DE RADIAÇÃO TÉRMICA E SOBREPRESSÃO	57
3.4 MODELOS DE VULNERABILIDADE	64
3.4.1 Dose-Resposta	64
3.4.2 Função probit	66
4 PROCESSO HABER-BOSCH E PLANTA DE SÍNTESE DE AMÔNIA ESTUDADA	68
4.1 OS PERIGOS ASSOCIADOS A SÍNTESE DE AMÔNIA	71
4.2 PLANTA ESTUDADA	72
4.2.1 Principais equipamentos, suas dimensões e suas condições de operação	75
4.2.2 Localização e População Extramuros	80
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	84

5.1 ANÁLISE PRELIMINAR DE RISCOS	84
5.2 ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCOS	87
6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	101
7 REFERÊNCIAS	102
APÊNDICE A – ANÁLISE PRELIMINAR DE RISCO	105

1 INTRODUÇÃO

A amônia é uma substância amplamente usada na indústria química, e é a base de quase todos os produtos nitrogenados sintetizados no mundo, principalmente fertilizantes nitrogenados, sendo ela o sexto produto químico de maior produção no planeta (MODAK, 2002). Industrialmente, sua síntese ocorre através do processo Haber-Bosch (HABER e ROSSIGNOL, 1909). Existem diversos perigos associados à produção da amônia, dada a sua toxicidade e a inflamabilidade do gás natural e do hidrogênio envolvidos no processo, além das altas pressões e temperaturas das etapas de síntese.

A segurança de processos visa fundamentar e desenvolver técnicas de análise qualitativas e quantitativas, capazes de identificar e mensurar os riscos de sistemas industriais para que, assim, seja possível a avaliação da tolerabilidade de operações e a implementação de medidas capazes de prevenir ou mitigar as consequências de cenários acidentais (CROWL e LOUVAR, 2002).

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um Estudo de Análise de Risco de uma planta de síntese de amônia que utiliza o processo Haber-Bosch, a fim de contribuir com o conhecimento acerca dos riscos envolvidos nestes sistemas. Esse estudo empregará a técnica qualitativa de Análise Preliminar de Perigos, seguida de tratamento quantitativo por meio dos programas *Effects* e *Riskcurves*, desenvolvidos pela Gexcon.

Para atingir esse objetivo, o segundo capítulo do presente trabalho introduz conceitos básicos da segurança de processo e apresenta diversas técnicas disponíveis para o desenvolvimento do estudo, apontando os métodos de análise utilizada. No capítulo seguinte, foi justificada a escolha de *softwares* de cálculo empregados e descrita a modelagem matemática usada. No capítulo 4, foi feito um breve histórico dos métodos de síntese desenvolvidos para a amônia até o procedimento atual, e elaborado o modelo de planta estudado. O quinto capítulo refere-se aos resultados encontrados para as análises qualitativa e quantitativa, e à discussão destes. Por fim, o último capítulo foi dedicado às conclusões do trabalho.

2 INTRODUÇÃO À SEGURANÇA DE PROCESSOS

A Segurança de Processos é uma disciplina científica em constante evolução desde os anos 50, que levou o conceito de segurança de algo focado somente na segurança de trabalhadores, como por exemplo o uso de equipamentos de proteção individual – EPI, para um foco nos processos em si, e na prevenção de perdas. A segurança sob essa ótica é definida como a prevenção de acidentes através da identificação de perigos, avaliação técnica e do desenvolvimento de novas funcionalidades de engenharia para evitar esses acidentes antes que ocorram (CROWL e LOUVAR, 2002).

Para o desenvolvimento desse estudo, foram usados os modelos e técnicas descritos nos *Coloured Books* (Livros Coloridos), que podem ser obtidos gratuitamente no endereço eletrônico: <https://www.gexcon.com/coloured-books/>. Os livros coloridos servem como orientação para o desenvolvimento de análises de segurança e são ampla e extensamente reconhecidos e utilizados como referência de segurança global (GEXCON, 2022).

2.1 CONCEITOS BÁSICOS

Acidentes constituem uma sequência de eventos que produzem ferimentos, mortes ou danos a propriedade não-intencionais, sendo eles resultados da perda de contenção de material ou energia perigosa (CROWL e LOUVAR, 2002).

Perigo é definido como tudo aquilo com o potencial de causar danos a pessoas, propriedade ou meio-ambiente, seja substância química ou condição física (CROWL e LOUVAR, 2002). Desta forma, em um dado reator de amônia a alta pressão, por exemplo, pode-se identificar pelo menos dois perigos, a amônia em si, por ser uma substância tóxica, e a pressão de processo – ambos têm o potencial de causar danos.

O risco por sua vez é uma medida de danos em termos da probabilidade de acidentes e a magnitude das perdas por eles acarretadas (CROWL e LOUVAR, 2002), sendo, portanto, calculado como o produto de duas variáveis, severidade e frequência. A frequência é uma medida de probabilidade expressa em eventos por unidade de tempo, usualmente eventos/ano (AICHE.CCPS, 2008).

É importante ressaltar que é impossível eliminar por completo o risco de qualquer operação e, portanto, se faz necessário definir se os riscos de um sistema analisado são toleráveis ou não (CROWL e LOUVAR, 2002). No Brasil, a tolerabilidade dos riscos de empreendimentos é definida por Normas Técnicas e Termos de Referência elaborados pelas

agências ambientais estaduais como a CETESB (CETESB, 2014) ou pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA.

A Análise de Risco tem como objetivo que o risco derivado de certo empreendimento esteja dentro dos padrões de tolerabilidade estabelecidos (AICHE.CCPS, 2007). A Análise de Risco se divide em Análise Qualitativa e Análise Quantitativa.

2.2 ANÁLISE QUALITATIVA DE RISCO

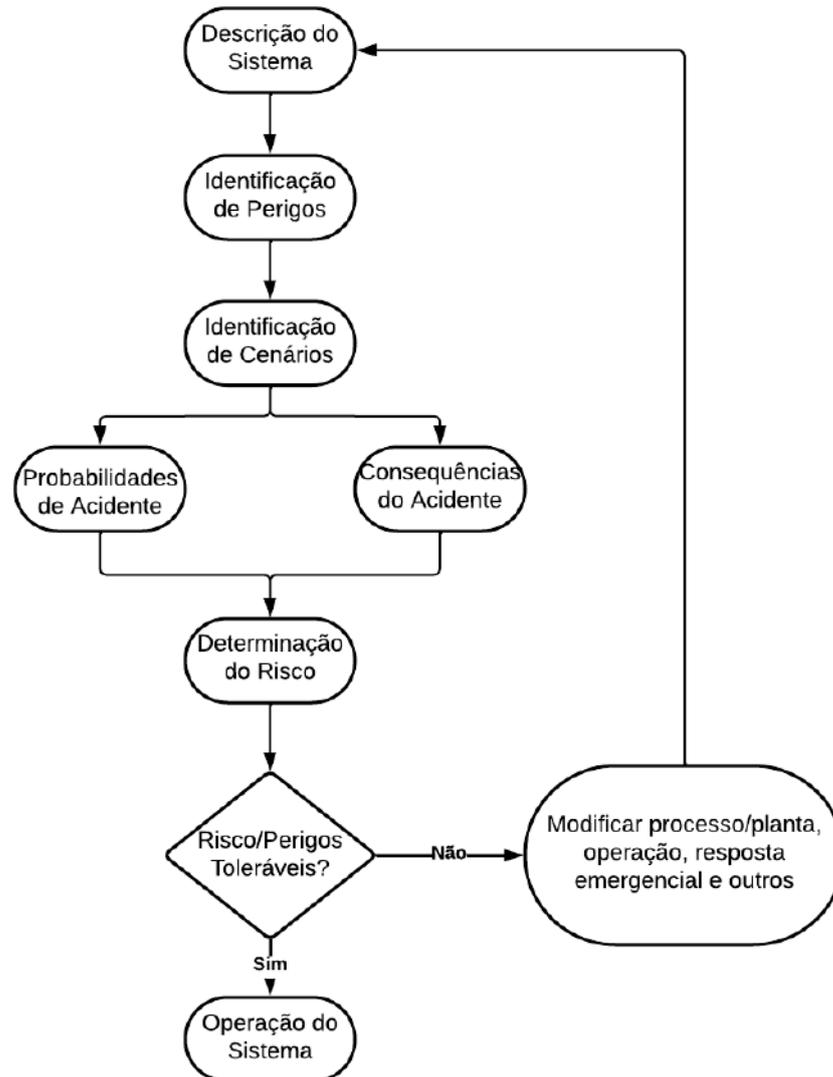
A Análise Qualitativa serve o propósito de identificação de perigos e riscos, além do desenvolvimento de hipóteses acidentais. É comum que ao final de uma análise qualitativa, seja desenvolvido um gráfico de risco que classifique tais hipóteses em um número de categorias, e para isso foram desenvolvidas diversas técnicas qualitativas (TNO, 1997).

Para um dado processo em uma planta química, as seguintes perguntas devem ser levantadas a fim de realizar uma análise de risco:

- Quais são os perigos?
- O que pode dar errado, e de que maneira?
- Quais são as chances?
- Quais são as consequências?

A primeira pergunta representa a identificação de perigos, enquanto a segunda é a identificação de hipóteses. A estipulação de frequências e consequências durante a análise qualitativa se limita a estimativas, que podem ser posteriormente calculadas durante a Análise Quantitativa de Riscos (AQR) (CROWL e LOUVAR, 2002). A Figura 2.1 ilustra o processo de identificação de perigos e avaliação de risco comum:

Figura 2.1 – Processo de identificação de perigos e avaliação de risco



Fonte: Adaptado de (CROWL e LOUVAR, 2002).

Após a descrição do sistema, os perigos são identificados, assim como as diversas hipóteses pelos quais um acidente pode ocorrer. Uma vez identificadas as hipóteses, é realizado o estudo concomitante das probabilidades e consequências de cada acidente. Esta informação é então reunida para a avaliação final do risco e, se ele for tolerável, o estudo está completo, se não, o método é reiniciado com a incorporação de modificações ao processo (CROWL e LOUVAR, 2002).

De uma perspectiva de exaustividade da análise qualitativa, é importante que as consequências não desejadas mais importante sejam identificadas e levadas em consideração para a avaliação do risco, sendo que a exaustividade da análise é dependente do quão sofisticado é o método utilizado, e do quão conhecidos são os perigos do processo (TNO, 1997).

Ainda que seja importante ter um método exaustivo, é também crucial discriminar entre perigos e hipóteses mais e menos importantes, de forma a impedir que avaliações subsequentes sejam sobrecarregadas pelo número de perigos potenciais (AICHE.CCPS, 2008). Neste trabalho, a análise qualitativa foi usada para, além de desenvolver hipóteses acidentais, classificá-las de acordo com frequências e consequências estimadas para, principalmente, priorizar hipóteses que deveriam ser avaliadas quantitativamente.

Foram avaliados diversos métodos de análise qualitativa comuns a fim de se obter aquele mais adequado a este fim, são eles:

- **Revisão de Segurança:** Existem dois tipos, formal e informal. A revisão informal é aplicada para pequenas mudanças em processos existentes ou para processos de escala de bancada. Este método envolve um time de duas a três pessoas, sendo uma especialista no processo e outras especialistas em segurança, que examinam os equipamentos e procedimentos, oferecendo sugestões que devem ser anotadas de como melhorar a segurança. A revisão formal é aplicada em processos novos, ou em necessidade de revisão extensa. Este método é desenvolvido em três etapas: preparação de relatório detalhado da revisão, revisão do relatório e inspeção do processo por parte de comitê, e implementação das recomendações. O relatório preparado deve incluir descrição do processo, todas reações, dados de engenharia, materiais usados, procedimentos e descarte de efluentes, entre outros (CROWL e LOUVAR, 2002).
- **Análise “E se” ou *What If*:** Método pouco formal de identificação de perigos que aplica a pergunta homônima a diversas áreas de investigação, como por exemplo “E se a vazão em tal ponto cessar?”. A equipe então decide quais seriam as possíveis consequências e como resolver tais problemas (CROWL e LOUVAR, 2002). Este método é similar à Análise Preliminar de Risco (APR), que será detalhada na seção seguinte.
- **Estudo de Perigos e Operabilidade ou *Hazard and Operability Studies* (HAZOP):** Método formal, efetivo e bem aceito pela indústria química. O HAZOP requer uma equipe de profissionais experientes de diversas áreas, além de um líder especialista em segurança e treinado na técnica. A equipe, munida de informações extensivas e detalhadas do processo, através de fluxogramas, diagramas e outros documentos de engenharia, se encontra regularmente durante algumas horas. Nas reuniões, cada sistema do processo (chamados de nó) é analisado através de parâmetros e palavras-guia, como temperatura e maior,

respectivamente, sendo que todas as combinações consideradas aplicáveis ao processo são analisadas como desvios (CROWL e LOUVAR, 2002). Um exemplo de desvio seria, ao analisar o nó Tanque de Armazenamento, considerar a situação de Nenhum Nível – a equipe então buscaria possíveis causas e sistemas de proteção para a ausência de material no tanque, possíveis consequências, e formularia então recomendações.

- A Análise Preliminar de Riscos (APR) consiste numa técnica de identificação de perigos e análise de risco que busca identificar eventos perigosos, causas, consequências e medidas de controle de risco. Seu nome vem de seu uso comum como método inicial de estudo de um processo. Os termos Análise Preliminar de Riscos e Análise Preliminar de Perigos (APP) são comumente utilizados para denominar a mesma técnica (CARDELLA, 2019).

O método de análise qualitativa selecionado para este trabalho foi a Análise Preliminar de Riscos – APR.

2.2.1 ANÁLISE PRELIMINAR DE RISCO

A APR é uma técnica que tem origem no programa de segurança padrão militar dos Estados Unidos. Esta técnica permite priorizar perigos em circunstâncias de ausência de informações ou recursos necessários para a utilização de uma técnica mais extensiva (AICHE.CCPS, 2008).

A APR foca de forma geral nas substâncias perigosas e nas principais áreas de processos de uma planta, sendo muitas vezes usada como precursora para análises futuras. Essa técnica formula uma lista de perigos/hipóteses acidentais ao considerar diversas características de processo, e assinala a cada um deles causas, efeitos e possíveis medidas corretivas e/ou preventivas (AICHE.CCPS, 2008). Para isso, os seguintes fatores devem ser considerados, de acordo com AICHe.CCPS (2008):

- Substâncias e equipamentos perigosos da planta (combustíveis, produtos químicos altamente reativos, substâncias tóxicas, sistemas de alta pressão e outros sistemas armazenadores de energia);
- Fatores do meio ambiente que possam interferir nos equipamentos e materiais da planta (vibração, descarga atmosférica, umidade ou temperaturas muito altas);

- Operação, teste, manutenção e procedimentos emergenciais (dependência do erro humano, layout / acessibilidade dos equipamentos, disponibilidade de equipamentos de proteção pessoal, entre outros);
- Recursos de apoio (armazenamento, equipamentos de teste e disponibilidade de utilidades); e
- Equipamentos relativos à segurança (sistema de alívio, redundância, recursos para extinção de incêndios e EPI).

Um ou mais analistas de risco avaliam a significância dos perigos de processo e podem determinar uma nota de tolerabilidade para cada situação. Esta nota pode então ser usada para priorizar ações para melhoras à segurança que surjam a partir da análise (AICHE.CCPS, 2008).

Esse método de identificação de perigos requer que o analista tenha acesso a critérios de *design* da planta, substâncias usadas, reações, parâmetros de processo envolvidos e principais equipamentos (AICHE.CCPS, 2008).

As hipóteses acidentais, também chamados de perigos nesta técnica, devem ser descritas conforme suas magnitudes, estados físicos, limites de bateria e sistemas de proteção, enquanto as consequências constituem as tipologias acidentais a serem avaliadas durante a análise quantitativa dos efeitos físicos (CETESB, 2014). Os limites de bateria são o escopo de um perigo, ou seja, o equipamento, vaso, linha ou afins do qual surge o perigo em questão.

A CETESB cita o *National Institute of Public Health and the Environment*, dizendo ser necessário assegurar a formulação de “hipóteses acidentais que contemplem a ruptura catastrófica do equipamento, a ruptura de linha (100% diâmetro), a ruptura parcial de linha (por exemplo, 10% do diâmetro, limitado a 50mm)” (CETESB, 2014).

Neste trabalho, a APR foi utilizada com o objetivo de selecionar as hipóteses de maior risco para a análise quantitativa, e foi desenvolvida utilizando a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Modelo de planilha para APR.

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
-	-	-	-	-	-	-

Fonte: adaptado de (NOLAN, 2015)

As colunas de frequência, severidade e risco devem ser preenchidas com as categorias correspondentes à hipótese acidental analisada, de acordo com os critérios apresentados nas Tabelas 2.2, 2.3 e 2.4 e na Figura 2.2.

Tabela 2.2 – Categorias de frequência.

Categoria	Descrição
1	Não deve ocorrer na vida útil do processo e não há experiência industrial histórica que sugira que vá ocorrer.
2	Eventos similares são improváveis de ocorrer, mas há registro histórico de sua ocorrência neste tipo de processo em algum empreendimento da indústria.
3	Essa hipótese específica é provável de ocorrer em algum empreendimento da indústria durante a vida útil deste tipo geral de processo.
4	Essa hipótese específica acontecerá quase com certeza em algum empreendimento da indústria durante a vida útil deste tipo específico de processo (mas não necessariamente no empreendimento analisado)
5	Esse processo específico já ocorreu em algum empreendimento na indústria neste processo específico ou é provável de ocorrer no empreendimento analisado durante sua vida útil.

Fonte: adaptado de (NOLAN, 2015)

Tabela 2.3 – Categorias de severidade.

Categoria	Descrição
1	Nenhum impacto à população externa.
2	Baixo impacto à população externa (incômodos com barulho, fumaça, odores e engarrafamentos).
3	Impacto moderado à população externa limitado a danos à propriedade, pequenos efeitos à saúde ou ferimentos de primeiros socorros.
4	Impacto significativo à população externa, com danos significativos à propriedade, efeitos a curto prazo na saúde ou ferimentos temporariamente incapacitantes.
5	Impacto severo à população externa, com danos severos à propriedade, morte, efeitos a longo prazo na saúde ou ferimentos incapacitantes.

Fonte: adaptado de (NOLAN, 2015)

Figura 2.2 – Matriz de risco.

Probabilidade	5	C	C	D	E	E
	4	B	C	C	D	E
	3	B	B	C	D	D
	2	A	B	C	C	D
	1	A	A	B	C	D
		1	2	3	4	5
		Consequência				

Fonte: adaptado de (NOLAN, 2015)

Tabela 2.4 – Categorias de risco.

Categoria	Descrição
A	Nenhuma ação ou estudo de segurança necessário.
B	Documentar estudos de segurança de processos, e medidas de redução de perigos e risco. Considerar viabilidade e custo/benefício de medidas de redução de risco adicionais.
C	Documentar estudos de segurança de processos, considerar de medidas de redução de risco adicionais e implementá-las se exposição de trabalhadores e público externo pode ser reduzida.
D	Documentar estudos de segurança de processos, e medidas de redução de perigos e risco. Identificar medidas de redução de risco adicionais e implementá-las se exposição de trabalhadores e público externo pode ser reduzida. Análise quantitativa de risco é necessária para avaliar perigos.
E	Estudos de segurança de processos e medidas de redução de risco adicionais são obrigatórios para diminuição do risco.

Fonte: adaptado de (NOLAN, 2015)

Conforme critérios acima, as hipóteses acidentais cujo risco foi estimado como pertencente às categorias D ou E foram selecionados para a etapa quantitativa da análise de risco.

A escolha da APR como técnica de análise qualitativa foi pautada nos três princípios levantados por AICHE.CCPS (Guidelines for hazard evaluation procedures, 2008): (1) satisfazer a necessidade de informação acerca do risco, (2) produzir resultados de alta qualidade e facilidade para tomar as decisões necessárias e (3) realizar o estudo com o mínimo de recursos necessários para atingir o objetivo proposto.

A motivação para o estudo de risco e o tipo de informação de risco necessário são os fatores mais importantes a serem analisados na escolha da técnica. Realizar uma análise de risco sem motivação e propósito bem definidos é um desperdício de recursos (AICHE.CCPS, 2008). São cinco as categorias de informação que podem ser produzidas por uma avaliação qualitativa (AICHE.CCPS, 2008):

- Lista de fontes de perigos;
- Lista de hipóteses acidentais;
- Lista de alternativas para redução do risco ou áreas que necessitam de maior estudo;
- Priorização dos resultados
- Informação para uma AQR.

Desta forma, neste estudo, a escolha foi pautada pela necessidade principal de listar hipóteses acidentais possíveis e a elas assinalar causas e consequências a serem estudadas de forma quantitativa. A APR leva à produção dessas hipóteses, além de viabilizar o posterior estudo da frequência das causas e consequências identificadas, e a extensão dos danos dessas consequências específicas.

A qualidade dos resultados produzidos é dependente da informação disponível para análise e do quanto a análise foi completa, ou seja, extensiva em seus resultados. Uma análise qualitativa que parte de informações desatualizadas ou imprecisas é fútil e um desperdício de recursos (AICHE.CCPS, 2008). Considerando as limitações à informação da planta analisada, seria impossível produzir um HAZOP, pois este necessita de fluxogramas e diversos documentos de engenharia que descrevam minuciosamente o processo estudado. Neste trabalho, foram reunidas informações acerca da disposição dos principais equipamentos e linhas do processo, além de suas condições de operação. Embora suficiente para produzir todas as principais hipóteses acidentais através de uma APR, este nível de detalhamento não é condizente com um HAZOP ou outras técnicas que buscam identificar todos os desvios plausíveis.

Por fim, embora seja importante buscar não desperdiçar recursos, a minimização dos gastos deve ser vista como o menos importante dos três principais fatores. Escolher uma técnica baseado somente em seu baixo custo ou no quão comum é seu uso pode levar a resultados ineficientes, de baixa qualidade ou ainda resultados não-aplicáveis ao processo analisado (AICHE.CCPS, 2008). Assim, este ponto foi aquele de menor influência sobre a escolha.

2.3 ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCO

Selecionadas as hipóteses acidentais que devem ser avaliadas quantitativamente, emprega-se o uso de modelos para calcular as características de cada momento que sucede a perda de contenção de substâncias perigosa (CROWL e LOUVAR, 2002).

Desta forma, a análise quantitativa de risco se inicia com a determinação da vazão e dispersão do material vazado ou com a quantificação da energia liberada, e dos efeitos resultantes, sendo eles toxicidade, radiação térmica e sobrepressão. A partir disso, o consequente impacto sobre humanos, ou vulnerabilidade, é computado. Por fim, são calculadas as frequências de ocorrência das hipóteses avaliadas (TNO, 1999).

Os riscos estimados quantitativamente são produto da vulnerabilidade e da frequência. Neste sentido, o risco é calculado de duas formas diferentes: o Risco Individual (RI) expressa a probabilidade de uma pessoa morrer em um dado local, independente da presença de pessoas nesse local ou não. O Risco Social (RS) correlaciona a frequência das hipóteses com quantas vítimas resultariam deles, baseado no tamanho e distribuição da população presente no local analisado (TNO, 1999).

Os riscos individual e social são então comparados com critérios de tolerabilidade, que determinam se o processo avaliado tem risco tolerável, intolerável ou tão baixo quanto viável. O conceito de tão baixo quanto viável (ou *As Low as Reasonably Practicable* – ALARP) configura o caso no qual o risco não é intolerável, mas medidas precisam ser tomadas para diminuí-lo o máximo tanto quanto for razoável a fim de viabilizar o processo (AICHE.CCPS, 2008).

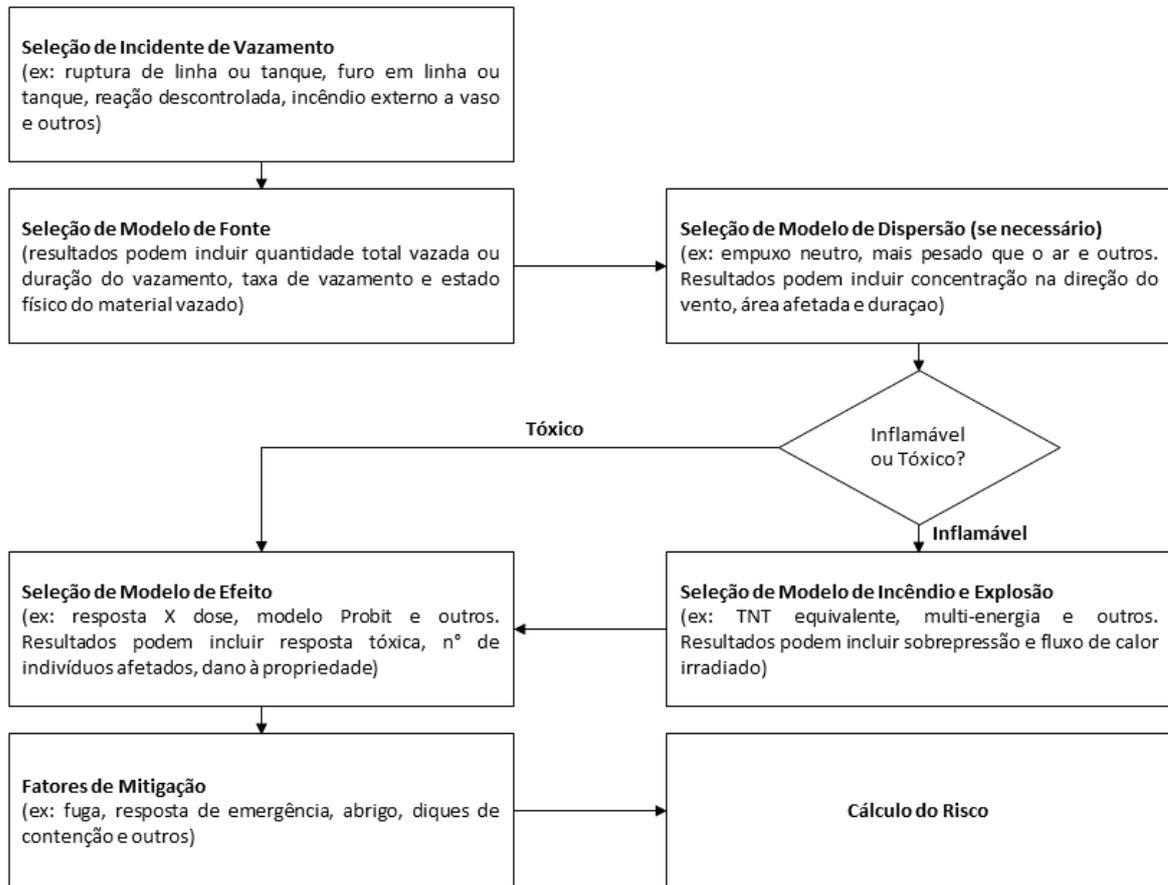
2.3.1 Cálculo dos Efeitos Físicos e da Vulnerabilidade

O cálculo dos efeitos físicos e da vulnerabilidade se resume na aplicação de modelos que geram informações acerca do dano causado pelas hipóteses acidentais, ou mesmo informações como vazão, duração e distribuição do material estudado, a serem usadas como *input* de modelos de dano (TNO, 1996)

As hipóteses acidentais se iniciam com um incidente, causa, que resulta na perda de contenção do material de processo ou na liberação de energia. Para o caso de perda de contenção, o material, com propriedades perigosas como toxicidade e inflamabilidade, pode vaziar de diversas formas, como rupturas e furos em linhas ou tanques e vasos. Uma vez conhecida a causa, modelos de fonte são selecionados para descrever como os materiais vazam no processo. O modelo de fonte é responsável por prover informações acerca da taxa de vazamento, quantidade vazada e o estado físico do material vazado. Um modelo de dispersão descreve então como esse material é transportado pelo vento e dispersado até dados níveis de concentração (CROWL e LOUVAR, 2002).

Modelos de incêndio e explosão convertem informações de fonte e dispersão, no caso de vazamentos de substâncias inflamáveis, em perigos energéticos, como radiação térmica e sobrepressão, além de também calcularem estes efeitos para o caso da liberação de energia. Modelos de vulnerabilidade traduzem as informações de energia ou concentração de material tóxico no efeito que estes têm sobre pessoas. Para a modelagem de uma hipótese acidental, podem ser usados também fatores de mitigação, isto é, salvaguardas como sistemas de espuma e diques de contenção, que reduzem a magnitude dos efeitos (CROWL e LOUVAR, 2002). A sequência de modelos que constitui o cálculo dos efeitos de uma hipótese acidental é ilustrada na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Processo de análise de consequências.



Fonte: adaptado de (AICHE.CCPS, 1999)

Para incidentes de liberação de energia, diferente de incidentes de vazamento, o processo se inicia já com Modelos de Incêndio e Explosão.

No presente trabalho, não foram considerados fatores de mitigação nas simulações. Isto foi feito de forma conservativa, ou seja, para situações em que é necessária informação que não está disponível, assumiu-se aquela de pior consequência. Assim, a análise de risco se adequa ao pior cenário possível, evitando considerar um determinado cenário tolerável quando, na realidade, existe a possibilidade dele não o ser.

2.3.2 Estimativa de Frequências Acidentais

A frequência com que cada Hipótese Acidental ocorre, ou seja, com que ocorre a perda de contenção em dado equipamento de processo, é chamada de frequência de falha. Existem diversos métodos quantitativos para o cálculo de frequências, dentre eles, três dos mais comuns são o emprego de Árvores de Falha, de frequências padrão e de Árvores de Eventos.

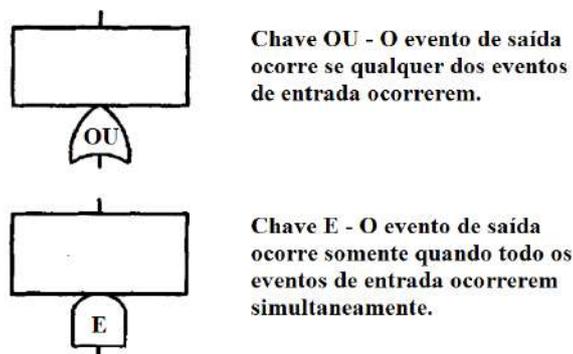
2.3.2.1 Árvore de Falhas

A árvore de falhas é uma técnica dedutiva que foca em um incidente e determina as suas causas. O seu propósito é identificar a combinação de falhas de equipamentos e erros humanos que podem resultar neste incidente, chamado de evento-topo (AICHE.CCPS, 2008).

A análise se inicia com o evento-topo, procedido pela identificação das suas causas imediatas, chamadas de eventos de falha, que por sua vez tem suas causas também determinadas. Este processo é repetido até a identificação dos eventos básicos, constituídos por falhas que ocorrem em condições normais de operação, como defeitos intrínsecos ao invés de forças ou condições externas (AICHE.CCPS, 2008).

A árvore de falhas, portanto, é construída de cima para baixo, do evento-topo para os eventos de falha, para então os eventos básicos. Abaixo de cada evento, exceto os básicos, se localiza uma chave lógica utilizada para indicar como as causas deste se relacionam a fim de ocasionar a falha em questão (AICHE.CCPS, 2008). As chaves lógicas são “Ou” e “E”, conforme Figura 2.4.

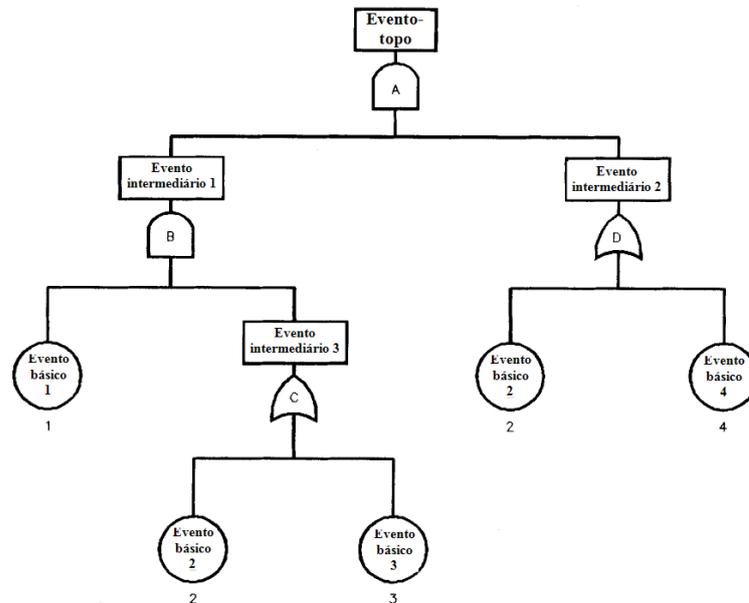
Figura 2.4 – Chaves lógicas em árvore de falhas.



Fonte: adaptado de (AICHE.CCPS, 2008)

Uma estrutura completa de árvore de falhas é apresentada na Figura 2.5. A partir da árvore construída e das frequências atreladas aos eventos básicos, é possível identificar a taxa de falha do evento-topo analisado através das chaves lógicas aplicadas (AICHE.CCPS, 2008).

Figura 2.5 –Estrutura de árvore de falhas.



Fonte: adaptado de (AICHE.CCPS, 2008)

Para a construção de uma árvore de falhas é preciso entendimento detalhado do funcionamento do sistema, procedimentos, desenhos, e conhecimento dos modos de falha de cada componente e seus efeitos. Faz-se necessário o uso de analistas experientes e bem treinados, muitas vezes com a dedicação exclusiva de um analista para cada árvore desenvolvida (AICHE.CCPS, 2008).

Sistemas complexos com diversos eventos-topo podem requerer semanas ou mesmo meses de trabalho de uma equipe experiente, ainda mais, caso ocorra a quantificação e documentação de frequências (AICHE.CCPS, 2008). Ademais, problemas como as grandes dimensões que a ilustração pode ter, a impossibilidade de garantir sua exaustividade, a necessidade de se ater a falhas binárias e a não sensibilidade à sobrecarga ou estresse operacional também ocorrem.

2.3.2.2 Frequências de Falha Padrão

Em vez de calcular a frequência de falha de um equipamento através da consideração de todos os seus modos de falha e da frequência de cada um, é possível utilizar-se de uma estimativa padrão para cada tipo de equipamento (TNO, 1999). Estas são obtidas através da análise histórica de perdas de contenção em equipamentos de diversas indústrias, assumindo algumas condições para que a modelagem seja válida (NATIONAL INSTITUTE OF PUBLIC HEALTH AND ENVIRONMENT - RIVM, 2009).

Neste trabalho, devido aos problemas e complexidade supracitados envolvendo a técnica de árvore de falhas, foram empregadas frequências padrão para cada equipamento analisado quantitativamente. As frequências foram todas obtidas do *Reference Manual Bevi Risk Assessment* (NATIONAL INSTITUTE OF PUBLIC HEALTH AND ENVIRONMENT - RIVM, 2009), com as seguintes considerações:

Assume-se que o empreendimento atinge o padrão de bom gerenciamento, incluindo o gerenciamento de risco a par do requerido e a tomada de medidas suficientes contra todos os mecanismos de falha previstos. As frequências padrão não levam em consideração os efeitos de reações com avalanche térmica. Não foi identificado na literatura menções a riscos de avalanche térmica no processo Haber-Bosch, e, portanto, esses efeitos foram desconsiderados.

As frequências padrão não levam em consideração danos externos e efeitos dominó. Danos externos podem ser causados pela colisão de veículos ou objetos, sendo especialmente importantes para avaliar os riscos de caminhões-tanque ou de instalações fixas sob o risco de quedas de avião, cargas ou turbinas eólicas (conforme destacado por RIVM (Reference Manual Bevi Risk Assessment, 2009)). Estes riscos foram desconsiderados neste trabalho.

Similarmente, devido à limitação presente nas frequências padrão, a influência de efeitos dominó sobre a frequência de falhas de equipamentos não foi considerada neste trabalho.

As frequências de falha adequadas para cada tipo de equipamento analisado neste trabalho, suas considerações específicas e características são apresentadas a seguir.

Para tanques de armazenamento pressurizados acima do solo foram utilizadas as frequências da Tabela 2.5. Essas frequências levam em consideração a falha do tanque, suas conexões soldadas, placas de fixação, linhas de instrumentação e linhas de processo até o primeiro flange (NATIONAL INSTITUTE OF PUBLIC HEALTH AND ENVIRONMENT - RIVM, 2009).

Tabela 2.5 – Frequências de cenários de tanque pressurizado acima do chão.

Cenário	Frequência (ano ⁻¹)
Liberação instantânea de todo conteúdo	5×10^{-7}
Liberação de todo conteúdo em 10min em fluxo contínuo e constante	5×10^{-7}
Liberação contínua do conteúdo por furo de diâmetro de 10mm	1×10^{-5}

Fonte: adaptado de (NATIONAL INSTITUTE OF PUBLIC HEALTH AND ENVIRONMENT - RIVM, 2009)

Para tubulações acima do solo foram utilizadas as frequências da Tabela 2.6. Essas frequências não discernem entre tubulações de transporte ou processo, os materiais da tubulação, a presença de revestimento, a pressão de projeto ou a localização em *pipe bridge*. Essas frequências levam em consideração a falha das tubulações, suas conexões (flanges e soldas) e válvulas.

Tabela 2.6 – Frequências de cenários de tubulações acima do chão.

Cenário	Frequência (metro ⁻¹ ano ⁻¹) para diâmetro < 75mm	Frequência (metro ⁻¹ ano ⁻¹) para diâmetro entre 75 e 150mm	Frequência (metro ⁻¹ ano ⁻¹) para diâmetro > 150mm
Ruptura da linha	1×10^{-6}	3×10^{-7}	1×10^{-7}
Furo com 10% do diâmetro, limitado a 50mm	5×10^{-6}	2×10^{-6}	5×10^{-7}

Fonte: adaptado de (NATIONAL INSTITUTE OF PUBLIC HEALTH AND ENVIRONMENT - RIVM, 2009)

Para vasos de reação ou processo foram utilizadas as frequências da Tabela 2.7. Essas frequências levam em consideração a falha do vaso, suas linhas de instrumentação e linhas de processo até o primeiro flange (NATIONAL INSTITUTE OF PUBLIC HEALTH AND ENVIRONMENT - RIVM, 2009).

Tabela 2.7 – Frequências de cenários de vaso de reação/processo.

Cenário	Frequência (ano ⁻¹)
Liberação instantânea de todo conteúdo	5×10^{-6}
Liberação de todo conteúdo em 10min em fluxo contínuo e constante	5×10^{-6}
Liberação contínua do conteúdo por furo de diâmetro de 10mm	1×10^{-4}

Fonte: adaptado de (NATIONAL INSTITUTE OF PUBLIC HEALTH AND ENVIRONMENT - RIVM, 2009)

Para bombas e compressores recíprocos foram utilizadas as frequências da Tabela 2.8. Os cenários de falha catastrófica e furo em bombas e compressores devem ser modelados como se ocorressem na linha de entrada desses equipamentos. (NATIONAL INSTITUTE OF PUBLIC HEALTH AND ENVIRONMENT - RIVM, 2009).

Tabela 2.8 – Frequências de cenários de bombas/compressores recíprocos.

Cenário	Frequência (ano ⁻¹)
Falha catastrófica	1×10^{-4}
Furo (10% do diâmetro)	$4,4 \times 10^{-3}$

Fonte: adaptado de (NATIONAL INSTITUTE OF PUBLIC HEALTH AND ENVIRONMENT - RIVM, 2009)

Para trocadores de calor e condensadores foram utilizadas as frequências da Tabela 2.9. Os cenários abaixo e suas respectivas frequências de falha são relativos a equipamentos no qual a substância perigosa se localiza parte exterior. (NATIONAL INSTITUTE OF PUBLIC HEALTH AND ENVIRONMENT - RIVM, 2009).

Tabela 2.9 – Frequências de cenários de trocadores de calor/condensadores.

Cenário	Frequência (ano ⁻¹)
Liberação instantânea de todo conteúdo	5×10^{-5}
Liberação de todo conteúdo em 10min em fluxo contínuo e constante	5×10^{-5}
Liberação contínua do conteúdo por furo de diâmetro de 10mm	1×10^{-3}

Fonte: adaptado de (NATIONAL INSTITUTE OF PUBLIC HEALTH AND ENVIRONMENT - RIVM, 2009)

2.3.2.3 Árvores de Evento

No caso da perda de contenção de substâncias inflamáveis, para a ocorrência de uma dada tipologia accidental é necessário não só a ocorrência da perda de contenção, como também de outros fenômenos. A análise da frequência de cada uma das tipologias a serem estudadas pode ser feita através do conhecimento da probabilidade desses fenômenos acontecerem, e do emprego da técnica de Árvore de Eventos (TNO, 1999).

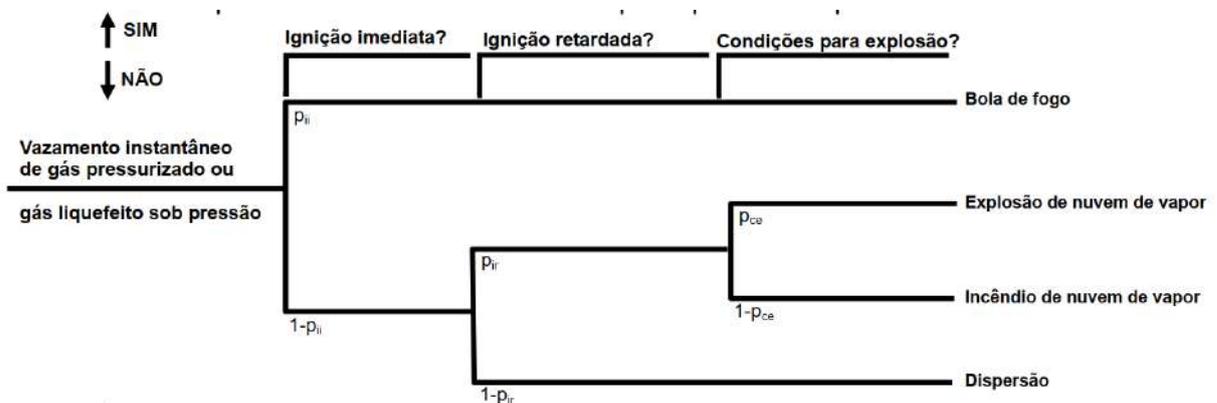
A Árvore de Eventos é uma técnica de análise gráfica, com a qual é possível listar as possíveis consequências de um evento e calcular suas probabilidades. A árvore de eventos se inicia a partir de um evento iniciador, por exemplo a perda de contenção de gás natural, que é procedido por eventos intermediários, cada qual gerando uma ramificação na árvore (TNO, 1997).

Os eventos devem ser organizados da esquerda para a direita de forma cronológica, e a partir de cada evento intermediário, um ramo da árvore deve se dividir em dois ou mais ramos. A única restrição à ramificação é que a soma da probabilidade de todos os ramos deve ser igual àquela do ramo original. Ao fim da árvore, encontram-se as consequências resultantes de cada sequência de eventos intermediários (TNO, 1997).

Cada evento intermediário tem a ele atrelada uma probabilidade condicional, isto é, a chance que o evento intermediário ocorra, dado a ocorrência do evento iniciador. A frequência de cada consequência listada, portanto, será igual à frequência do evento iniciador vezes o produto das probabilidades dos eventos intermediários que levaram a ela.

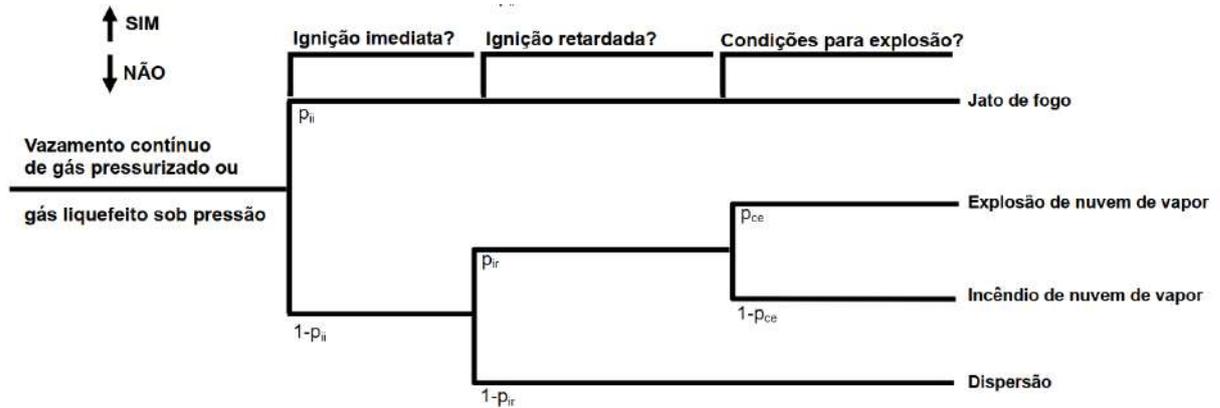
Neste trabalho, foram usadas as árvores de eventos apresentadas nas Figuras 2.6 e 2.7 para os vazamentos instantâneo e contínuo, respectivamente, de gás pressurizado.

Figura 2.6 – Árvore de eventos para vazamento instantâneo de gás pressurizado.



Fonte: adaptado de (CETESB, 2014)

Figura 2.7 – Árvore de eventos para vazamento contínuo de gás pressurizado.



Fonte: adaptado de (CETESB, 2014)

Portanto, para uma frequência de falha f_s , a probabilidade que cada uma das tipologias acidentais ocorra se dá através das fórmulas da Tabela 2.10.

Tabela 2.10 – Cálculo das probabilidades das tipologias.

Tipologia	Fórmula
Jato de Fogo/Bola de Fogo	$f_s(p_{ii})$
Explosão de nuvem de vapor	$f_s(1 - p_{ii})(p_{ir})(p_{ce})$
Incêndio em nuvem de vapor	$f_s(1 - p_{ii})(p_{ir})(1 - p_{ce})$
Dispersão	$f_s(1 - p_{ii})(1 - p_{ir})$

Fonte: elaboração própria

A probabilidade de ignição imediata p_{ii} depende da substância e de sua vazão, conforme apresentado na Tabela 2.11.

Tabela 2.11 – Probabilidade de ignição imediata p_{ii} .

Categoria da Substância	Vazão (Vazamento Contínuo)	Volume (Vazamento Instantâneo)	p_{ii}
Categoria 0 (Alta Reatividade)	< 10 kg/s	< 1.000 kg	0,2
	10 – 100 kg/s	1.000 – 10.000 kg	0,5
	> 100 kg/s	> 10.000 kg	0,7
Categoria 0 (Baixa Reatividade)	< 10 kg/s	< 1.000 kg	0,02
	10 – 100 kg/s	1.000 – 10.000 kg	0,04
	> 100 kg/s	> 10.000 kg	0,09
Categoria 1	Qualquer vazão	Qualquer volume	0,065
Categoria 2	Qualquer vazão	Qualquer volume	0,01
Categoria 3	Qualquer vazão	Qualquer volume	0

Fonte: adaptado de (NATIONAL INSTITUTE OF PUBLIC HEALTH AND ENVIRONMENT - RIVM, 2009)

As Categorias de Substâncias apresentadas acima estão definidas na Tabela 2.12, onde P_F é o ponto de fulgor e P_E o ponto de ebulição.

Tabela 2.12 – Categorias de substâncias inflamáveis.

Categoria da Substância	Definição	Limites
Categoria 0	Extremamente inflamável	Substâncias e misturas líquidas com $P_F < 0 \text{ }^\circ\text{C}$ e $P_E \leq 35 \text{ }^\circ\text{C}$. Substâncias e misturas gasosas que podem inflamar-se a temperatura e pressão normais quando expostos ao ar.
Categoria 1	Muito inflamável	Substâncias e misturas líquidas com $P_F < 21 \text{ }^\circ\text{C}$, mas que não são extremamente inflamáveis.
Categoria 2	Inflamável	Substâncias e misturas líquidas com $21^\circ\text{C} \leq P_F \leq 55 \text{ }^\circ\text{C}$
Categoria 3	-	Substâncias e misturas líquidas com $55^\circ\text{C} \leq P_F \leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$
Categoria 4	-	Substâncias e misturas líquidas com $P_F \geq 100 \text{ }^\circ\text{C}$

Fonte: adaptado de (NATIONAL INSTITUTE OF PUBLIC HEALTH AND ENVIRONMENT - RIVM, 2009)

A Categoria 0 se divide de acordo com a reatividade da substância, que se traduz em sua susceptibilidade à aceleração da chama, e é determinada com base em sua área de explosão e de ignição mínima, temperatura de combustão espontânea e experiência em situações práticas (NATIONAL INSTITUTE OF PUBLIC HEALTH AND ENVIRONMENT - RIVM, 2009). O metano, conforme Tabela 10 do Módulo B do RIVM, é considerado uma substância de Categoria 0 e baixa reatividade, e o hidrogênio de alta reatividade (NATIONAL INSTITUTE OF PUBLIC HEALTH AND ENVIRONMENT - RIVM, 2009).

As probabilidades de ignição retardada foram obtidas a partir do “Second Canvey Report.” O estudo em questão configura uma atualização da metodologia e riscos estipulados em sua primeira edição e, quando foi publicado em 1981, estabeleceu-se como a análise de segurança mais compreensiva que já havia sido feita na Inglaterra (MANNAN, 2012). A validade atual das probabilidades nele expostas em relação à ignição retardada é confirmada na norma P4.261 (CETESB, 2014).

As probabilidades de ignição retardada do “Second Canvey Report” são apresentadas na Tabela 2.13. A definição de quantas fontes de ignição estão presentes em um local é dependente do julgamento do analista (MANNAN, 2012). Para este estudo, considerando as

restrições a fontes de ignição necessariamente presentes em áreas industriais sensíveis, foi conservativamente utilizado o valor referente a “Poucas” fontes de ignição.

Tabela 2.13 – Probabilidade de ignição retardada p_{ir} .

Fontes de Ignição	p_{ir}
Nenhuma	0,1
Muito poucas	0,2
Poucas	0,5
Muitas	0,9

Fonte: adaptado de (MANNAN, 2012)

Por fim, o *Purple Book* indica que a probabilidade de haver condições para explosão p_{ce} deve ser sempre considerada igual a 0,4 (TNO, 1999, p. 4.16).

2.3.2.4 Estabilidade Atmosférica e Direções do Vento

As condições atmosféricas são extremamente importantes para determinar como a dispersão de uma substância ocorre. Para isso, é possível dividir os ventos em um dado local em um número arbitrário de direções, cada qual com uma velocidade média e uma frequência (TNO, 1996). Neste trabalho, foram consideradas oito direções: Norte, Nordeste, Leste, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste e Noroeste. Neste trabalho, na ausência de dados meteorológicos, foi seguido o recomendado pela norma P4.261 (CETESB, 2014). Assumiu-se uma distribuição uniforme da frequência do vento nas 8 direções (probabilidade de 12,5% para cada direção) e duas classes de estabilidade atmosférica, uma para o dia e outra para a noite (CETESB, 2014). Define-se a partir disso, que um cenário acidental é a combinação de Hipótese Acidental (vazamento de material perigoso) + tipologia acidental + classe de estabilidade + direção do vento.

2.3.3 Estimativa Populacional

A estimativa da população no entorno do empreendimento foi feita de duas formas. Para áreas residenciais, foram utilizados os dados de população por setor censitário de 2010, disponíveis em: <https://censo2010.ibge.gov.br/sinopseporsetores/?nivel=st>. Desta forma, foi assumido que pequenos comércios, parques, e vias de circulação de pedestres e automóveis são ocupados pela própria população do setor onde estão localizados. Não foram utilizados dados do Censo 2023, pois as informações divulgadas são preliminares, podendo mudar, além de não haver ainda resumo populacional por setores disponível (IBGE, 2023).

Para locais de recreação, comércio e outros fins que reúnem grande número de pessoas, a população foi determinada caso a caso. Exemplos de estabelecimentos dessa natureza são atacados, grandes igrejas, shoppings e outros centros comerciais, hospitais, escolas e outros.

A presença da população estimada para cada área varia com o tempo. Pode-se assumir que em áreas residenciais, a população durante o dia (de 8:00 às 18:30) é 70% presente, enquanto que durante a noite (de 18:30 às 8:00) a população é 100% presente. Em outras áreas, a fração da população presente durante o dia foi 1, e durante a noite foi 0 ou 0,2, para o caso em que há o funcionamento de um turno da noite (TNO, 1999).

Ademais, as pessoas podem estar dentro de um local fechado (seja casa ou outro estabelecimento) ou não. As frações típicas de população abrigada e desabrigada de acordo com o tempo são apresentadas na Tabela 2.14.

Tabela 2.14 – Fração da população abrigada.

Período	Fração Abrigada	Fração Desabrigada
Dia	0,93	0,07
Noite	0,99	0,01

Fonte: adaptado de (TNO, 1999)

Para o cálculo do risco social, uma vez calculada a letalidade de uma tipologia em dado ponto, a população que efetivamente vai a óbito devido a ela depende de estar abrigada ou desabrigada.

No caso da radiação térmica, assume-se que pessoas abrigadas estão protegidas, e, portanto, a letalidade para essa população é 0%, exceto para radiações de 35 kW/m² ou mais, a partir das quais construções se incendiam, e todos abrigados são assumidos mortos (TNO, 1999). Pessoas desabrigadas tem sua letalidade definida de acordo com o modelo de vulnerabilidade apresentado no Capítulo 3.

No caso da sobrepressão, para pessoas abrigadas assume-se que a letalidade é 100% para valores acima de 0,3 bar, 2,5% para 0,1 bar e 0% abaixo disso. Entre estes valores, a letalidade varia linearmente (TNO, 1999). Pessoas desabrigadas tem sua letalidade definida conforme relação apresentada no Capítulo 3. A diferença entre abrigados e desabrigados advém do efeito de reflexo da onda de choque contra superfícies próximas a um indivíduo, que prevalece sobre a onda original nas áreas próximas a superfícies (TNO, 1992).

Pessoas abrigadas e desabrigadas são afetadas igualmente por uma mesma concentração de amônia, porém a concentração em ambientes fechados é diferente da concentração do lado de fora. Nesses casos, a concentração depende fortemente da passagem de tempo da nuvem no

ponto analisado, da taxa de ventilação durante a passagem da nuvem e da taxa de ventilação após a passagem da nuvem (TNO, 1999). A taxa de ventilação é o inverso do tempo necessário para que todo o volume de ar presente em um ambiente seja substituído pelo ar presente no ambiente externo. Devido à ausência de informações específicas, deve-se assumir que a taxa de ventilação é constante durante e após a passagem da nuvem (as pessoas não sabem quando a nuvem passou), e igual a 1 h^{-1} , equivalente à ventilação natural. Assume-se também que a amônia não é adsorvida por nenhum material do abrigo (TNO, 1999).

2.3.4 Cálculo do Risco

Conforme supracitado, o cálculo quantitativo do risco é dividido em Risco Individual e Risco Social. O Risco Individual é calculado para diversos pontos ao redor da instalação e representado sobre um mapa por linhas de contorno, também chamadas de isorriscos, sobre as quais o RI é o mesmo. O Risco Social é calculado para cada cenário acidental, correlacionando a frequência F de ocorrência desse cenário com seu número de vítimas N , e representado em um gráfico F - N com a junção de todos os pares ordenados F - N (TNO, 1999).

As Hipóteses Acidentais avaliadas quantitativamente cujos efeitos físicos não resultaram em pelo menos uma tipologia acidental com alcance de 1% de letalidade ou maior fora dos limites da instalação tiveram seu risco considerado tolerável. Caso contrário, as HAS tiveram suas frequências estimadas e riscos calculados quantitativamente. Esta distinção foi feita, pois o risco foi avaliado para a população extramuros, e fenômenos sem letalidade além dos limites da instalação resultariam em riscos toleráveis independentemente de sua frequência.

2.3.4.1 Cálculo do Risco Individual

A frequência de morte de um indivíduo é calculada em um dado ponto para cada hipótese acidental, cada classe de estabilidade Pasquill-Gifford, cada direção do vento e cada tipologia (somente para materiais inflamáveis) separadamente. Então, o Risco Individual deste ponto é calculado pela soma das contribuições de todos os cenários considerados (TNO, 1999). As etapas de cálculo do RI em um dado ponto são:

- 1- Selecionar uma hipótese acidental S cuja frequência de falha que causa perda de contenção é dada por f_s (ano^{-1}).
- 2- Selecionar uma classe de estabilidade M de probabilidade P_M (-). Selecionar uma direção do vento φ de probabilidade condicional P_φ (-), sendo essa a probabilidade de ocorrer a direção do vento φ , dada a classe de estabilidade M .

- 3- Para a perda de contenção de materiais inflamáveis, selecionar a tipologia i , de probabilidade condicional P_i (-).
- 4- Considerar a letalidade P_d no ponto analisado, dada a hipótese acidental S , com classe de estabilidade M , direção do vento φ e tipologia i (para materiais inflamáveis).
- 5- Calcular a contribuição $\Delta RI_{S, M, \varphi, i}$ da hipótese acidental S , com classe de estabilidade M , direção do vento φ e tipologia i de acordo com a Equação 2.1 (TNO, 1999).

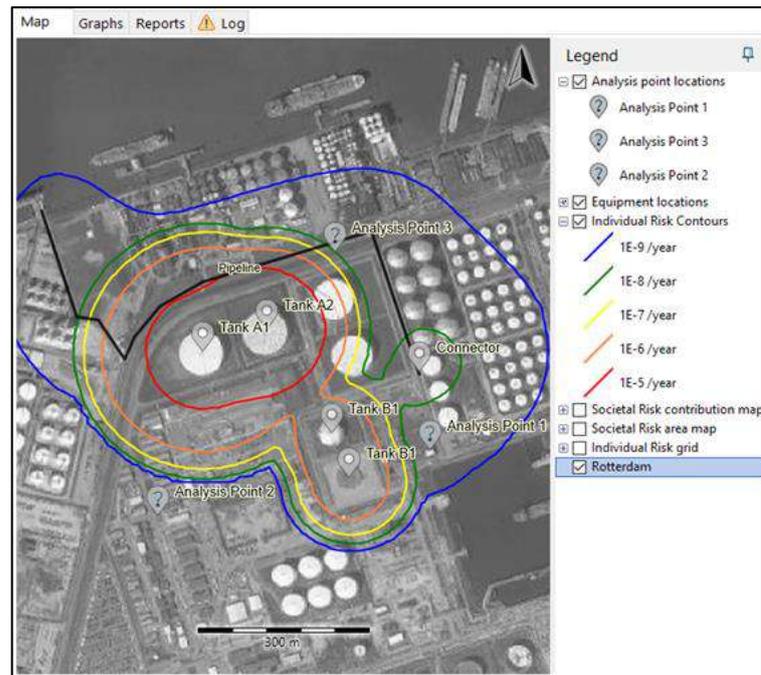
$$\Delta RI_{S, M, \varphi, i} = f_S * P_M * P_\varphi * P_i * P_d \text{ (ano}^{-1}\text{)} \quad (2.1)$$

- 6- Repetir as etapas 3 a 5 para todas as tipologias no caso de materiais inflamáveis, etapas 2 a 5 para todas as classes de estabilidade e direções do vento e etapas 1 a 5 para todas as hipóteses acidentais. O Risco Individual total, RI , no ponto analisado é calculado conforme Equação 2.2 (TNO, 1999).

$$RI = \sum_S \sum_M \sum_\varphi \sum_i \Delta RI_{S, M, \varphi, i} \text{ (ano}^{-1}\text{)} \quad (2.2)$$

Após o cálculo da frequência de morte esperada em todos os pontos ao redor da instalação analisada, é possível representar o Risco Individual através de isorriscos. Uma isorrisco é formada ligando todos os pontos onde a frequência calculada é igual ao mesmo valor. Um exemplo de isorriscos ao redor de uma instalação é apresentado na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Exemplo de representação do risco individual por isorriscos.

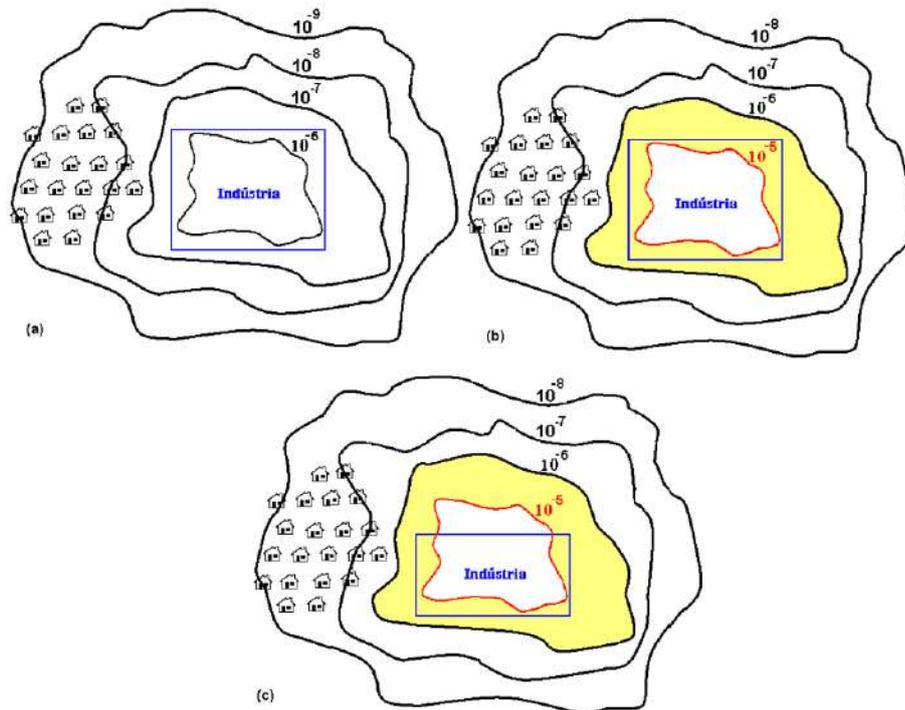


Fonte: (GEXCON NETHERLANDS BV, 2022b)

Neste trabalho, a tolerabilidade do Risco Individual foi pautada nos critérios delineados na norma P4.261 (CETESB, 2014), conforme Figura 2.9.

O risco individual é considerado tolerável caso a isorrisco de $1 \times 10^{-6} \text{ ano}^{-1}$ esteja situada dentro dos limites do empreendimento (situação *a*), ou esse nível de RI não seja atingido. Para o caso em que os limites do empreendimento estão entre as isorriscos de $1 \times 10^{-5} \text{ ano}^{-1}$ e $1 \times 10^{-6} \text{ ano}^{-1}$ (situação *b*), o risco é considerado na região de risco a ser reduzido ou ALARP. Por fim, o risco é considerado intolerável quando o contorno de isorrisco de $1 \times 10^{-5} \text{ ano}^{-1}$ ultrapassa os limites do empreendimento, mesmo que parcialmente (situação *c*) (CETESB, 2014).

Figura 2.9 – Critério de tolerabilidade do risco individual.



Fonte: (CETESB, 2014).

2.3.4.2 Cálculo do Risco Social

Em um ponto, o número de mortes esperadas é calculado para uma hipótese acidental, em certa classe de estabilidade, direção do vento e tipologia (inflamáveis). O número de mortes esperadas N para esse cenário se obtém somando o número de mortes de todos os pontos calculados. Este processo é repetido separadamente para todas as hipóteses acidentais, em todas as classes de estabilidade, direções do vento e tipologias. A partir da análise de todos os cenários, determina-se a frequência cumulativa F de ocorrerem mais de N mortes somando a frequência de todos os cenários que resultam em N mortes ou mais (TNO, 1999). Isso é feito para todos os valores de N obtidos, do maior até o menor. As etapas de cálculo do RS são:

- 1- Selecionar uma hipótese acidental S de frequência f_S , uma classe de estabilidade M de probabilidade P_M , uma direção do vento φ de probabilidade condicional P_φ e, no caso de materiais inflamáveis, uma tipologia i de probabilidade condicional P_i .
- 2- Selecionar um ponto, cuja população é N_{Ponto} .
- 3- Calcular a fração de mortes F_d no ponto selecionado dado o cenário selecionado.

- 4- Calcular o número de mortes esperadas no ponto $\Delta N_{S, M, \varphi, i}$ dado o cenário selecionado de acordo com a equação 2.3. $\Delta N_{S, M, \varphi, i}$ não é necessariamente um número inteiro (TNO, 1999).

$$\Delta N_{S, M, \varphi, i} = F_d * N_{Ponto} \quad (2.3)$$

- 5- Repetir as etapas 2 a 4 para todos os pontos a serem calculados. Calcular a contribuição de todos os pontos para o número total de fatalidades $N_{S, M, \varphi, i}$ do cenário selecionado conforme equação 2.4 (TNO, 1999).

$$N_{S, M, \varphi, i} = \sum_{\text{todos os pontos}} \Delta N_{S, M, \varphi, i} \quad (2.4)$$

- 6- Calcular a frequência $f_{S, M, \varphi, i}$ do cenário selecionado através da equação 2.5 (TNO, 1999).

$$f_{S, M, \varphi, i} = f_S * P_M * P_\varphi * P_i \text{ (ano}^{-1}\text{)} \quad (2.5)$$

- 7- Repetir as etapas 1 a 6 para todos os cenários possíveis (todas as tipologias de todas as hipóteses acidentais, em cada combinação de classe de estabilidade e direção do vento). A curva FN é construída acumulando todas as frequências $f_{S, M, \varphi, i}$ para as quais $N_{S, M, \varphi, i}$ é maior ou igual a N.

$$FN = \sum_{S, M, \varphi, i} f_{S, M, \varphi, i} \text{ com } N_{S, M, \varphi, i} \geq N \quad (2.6)$$

Deste modo, a curva FN é construída em gráfico log-log, da direita para a esquerda, do maior N calculado até 1, conforme demonstrado no exemplo a seguir. A partir dos cenários acidentais expostos na Tabela 2.15 junto às suas frequências e números de mortes, é possível construir a Tabela 2.16.

Tabela 2.15 – Exemplo de cenários acidentais para construção da curva FN.

Cenário	$N_{S, M, \varphi, i}$	$f_{S, M, \varphi, i}$
1	10	$5,00 \times 10^{-7}$
2	5	$5,00 \times 10^{-7}$
3	100	$7,50 \times 10^{-8}$
4	50	$1,50 \times 10^{-7}$
5	25	$8,00 \times 10^{-7}$
6	1	$1,50 \times 10^{-6}$
7	75	$7,50 \times 10^{-8}$

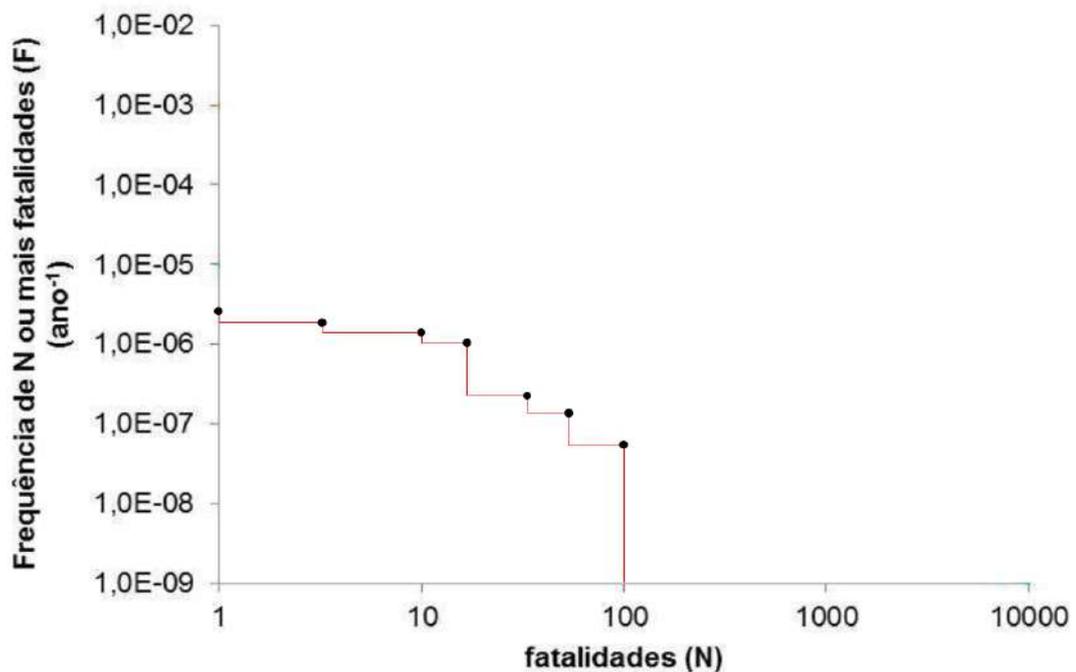
Fonte: elaboração própria.

Tabela 2.16 – Cenários acidentais ordenados para construção da curva FN.

N	$\sum_{S, M, \varphi, i} f_{S, M, \varphi, i}$	F
100	$7,50 \times 10^{-8}$	$7,50 \times 10^{-8}$
75	$7,50 \times 10^{-8} + 7,50 \times 10^{-8}$	$1,50 \times 10^{-7}$
50	$1,50 \times 10^{-7} + 1,50 \times 10^{-7}$	$3,00 \times 10^{-7}$
25	$3,00 \times 10^{-7} + 8,00 \times 10^{-7}$	$1,10 \times 10^{-6}$
10	$1,10 \times 10^{-6} + 5,00 \times 10^{-7}$	$1,60 \times 10^{-6}$
5	$1,60 \times 10^{-6} + 5,00 \times 10^{-7}$	$2,10 \times 10^{-6}$
1	$2,10 \times 10^{-6} + 1,50 \times 10^{-6}$	$3,60 \times 10^{-6}$

Fonte: elaboração própria.

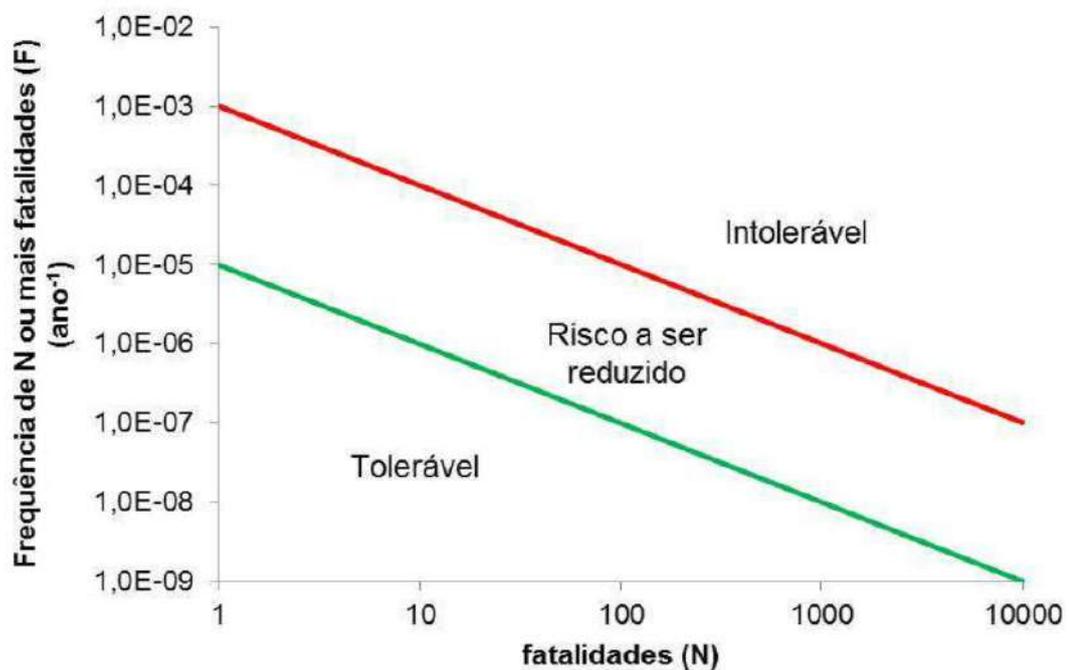
A curva FN resultante destes valores é apresentada na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Exemplo de curva FN.

Fonte: elaboração própria

Neste trabalho, a tolerabilidade do Risco Social foi pautada nos critérios delineados na norma P4.261 (CETESB, 2014), conforme Figura 2.11. Este critério estabelece três regiões sobre as quais a curva FN calculada deve ser desenhada. Uma curva FN situada completamente na região tolerável indica risco social tolerável, situada parcialmente na região de risco a ser reduzido indica situação de risco social ALARP e situada parcialmente na região intolerável indica risco social intolerável (CETESB, 2014).

Figura 2.11 – Critério de tolerabilidade do risco social.



Fonte: (CETESB, 2014).

3 ESCOLHA DE SOFTWARE E MODELOS UTILIZADOS

Neste trabalho, os cálculos de vazamento, dispersão, efeitos e riscos foram feitos através dos programas *Effects 12* e *Riskcurves 12*. Estes programas, desenvolvidos pela Gexcon, têm sua modelagem baseada nos livros coloridos, exceto em casos em que tenha sido adaptada de acordo com descobertas teóricas mais recentes (GEXCON NETHERLANDS BV, 2022a).

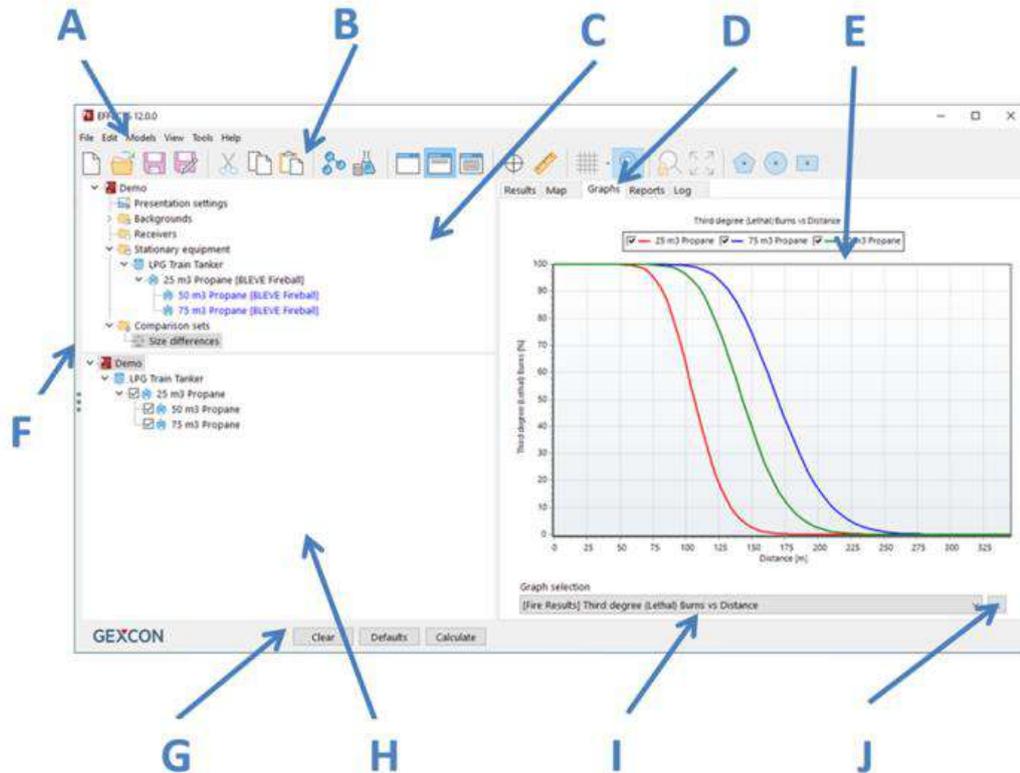
Eles foram utilizados pois são renomadas ferramentas de análise quantitativa de riscos, o *Effects* é inclusive citado pela Norma Técnica P4.261 como um dos *softwares* de cálculo recomendados (CETESB, 2014).

Ademais, os programas contam com a base de dados do *Design Institute for Physical Properties* (DIPPR) 2010 e 2015 (GEXCON NETHERLANDS BV, 2022a), uma das fontes mais conhecidas mundialmente em termos de dados de propriedades termofísicas. A DIPPR contém 34 constantes termodinâmicas e 15 propriedades em função da temperatura de 2330 substâncias diferentes (DECHEMA, 2016). Os *softwares* são voltados para AQRs e permitem o encadeamento de modelos (de forma que os dados de saída de um modelo de fonte, por exemplo, podem ser automaticamente inseridos como dados de entrada de uma dispersão) (GEXCON NETHERLANDS BV, 2022a).

A interface do programa é apresentada na Figura 3.1. Nela, estão destacados:

- (A) o menu, com acesso às opções de arquivo, modelos, visualização, ferramentas presentes no programa e uma guia de ajuda
- (B) a faixa de ferramentas, com atalhos aos pontos mais importantes do menu
- (C) a árvore de projeto, onde estão disponíveis as opções de apresentação, mapa, ponto analisado e os equipamentos, que são constituídos do encadeamento de modelos matemáticos
- (D) Barra de resultados, mapa, gráficos, reports (que trazem resultados em maior detalhe) e log de simulação
- (E) Espaço de visualização de resultados/gráficos/log
- (F) Seleção de modelos, que expande dos três pontos para um menu quando clicada
- (G) Botões de comando
- (H) Área de input de informações para os modelos
- (I) Seleção de gráficos
- (J) Opção expert de gráficos (permite alterar propriedades, escalas e outros pontos acerca dos gráficos gerados)

Figura 3.1 – Interface do Effects 12.

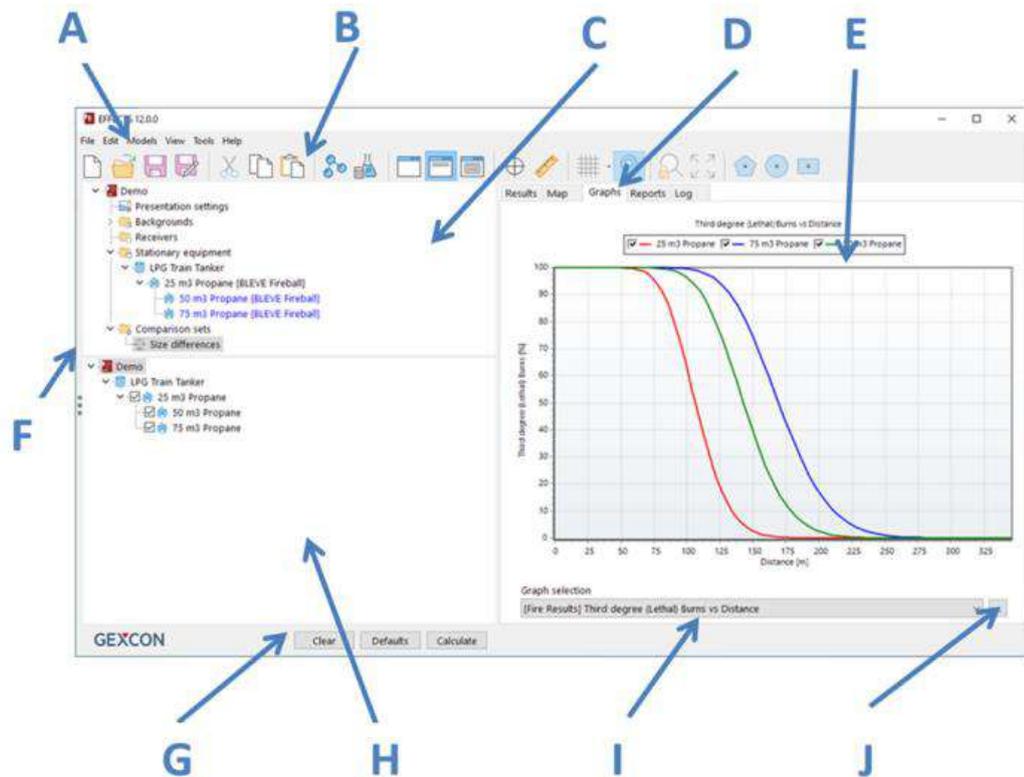


Fonte: (GEXCON NETHERLANDS BV, 2022a)

O *Riskcurves* 12 foi utilizado para a construção de curvas de isorriscos e curvas F-N. É possível acoplar dados de população e frequências acidentais com modelos de dano do *Effects* 12, que podem ser passados de um programa ao outro (GEXCON NETHERLANDS BV, 2022b). Desta forma, obtém-se as representações de risco individual e social de forma automática, além de informações acerca da contribuição de cada cenário acidental ao risco total (GEXCON NETHERLANDS BV, 2022b).

A interface do programa é apresentada na Figura 3.2. O programa tem basicamente as mesmas funções e interface do *Effects* 12, porém com opções acerca da população presente junto a árvore de projetos.

Figura 3.2 – Interface do Riskcurves 12.



Fonte: (GEXCON NETHERLANDS BV, 2022b)

A seguir são apresentados os modelos de cálculo utilizados com esses programas.

3.1 MODELOS DE FONTE

Neste trabalho foram utilizados modelos de fonte para a liberação de gases comprimidos e de gases liquefeitos sob pressão, tanto para vazamentos instantâneos como para vazamentos contínuos.

Para gases reais, aplica-se a equação de estado apresentada na Equação 3.1 (TNO, 1996), na qual v é o inverso da densidade, z é o fator de compressibilidade, R a constante universal dos gases, T e P são temperatura e pressão, e μ_i é a massa molar da substância i avaliada.

$$v = z * R * \frac{T}{P * \mu_i} \quad (3.1)$$

O fator de compressibilidade é função da temperatura e pressão reduzidas, e propriedade particular de cada gás. O escoamento de gás de um vaso ou tubulação pressurizado leva à expansão do gás remanescente, que por sua vez resulta no seu resfriamento e despressurização. A modelagem deste processo busca determinar essas quedas em pressão e temperatura (TNO, 1996).

Neste trabalho, assumiu-se que todas as expansões de gás foram processos adiabáticos, onde não há troca de calor entre o sistema e a vizinhança. Portanto, para cada processo de escoamento, têm que a relação $P * V^\gamma$ é constante, onde γ é o coeficiente de Poisson, equivalente à razão entre o calor específico a pressão constante C_p e o calor específico a volume constante C_v da substância analisada (GEXCON NETHERLANDS BV, 2022a).

Para a liberação instantânea de gases comprimidos, a nuvem resultante e suas propriedades são determinadas a partir do cálculo da expansão do material em condições de processo até as condições atmosféricas (GEXCON NETHERLANDS BV, 2022a). Desta forma, assume-se que a nuvem formada não foi diluída com a entrada de ar durante sua expansão (TNO, 1996).

No caso do vazamento contínuo de gases através de furos, a modelagem busca prever a vazão mássica como uma função da queda de pressão ao longo do furo, conforme Equação 3.2 (TNO, 1996). Nesta, q_s é a vazão mássica, C_d o coeficiente de descarga, A_h a área da seção transversal do orifício, ψ o coeficiente de escoamento, ρ_0 a densidade inicial do gás e P_0 a pressão inicial do gás.

$$q_s = C_d * A_h * \psi * \sqrt{\left(\rho_0 * P_0 * \gamma * \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{(\gamma+1)}{(\gamma-1)}} \right)} \quad (3.2)$$

O coeficiente de escoamento é determinado dependendo de o escoamento ser crítico (ou *choked*) ou não. O escoamento é crítico quando a velocidade de escoamento atinge a velocidade do som no meio vazado, não podendo superá-la (CROWL e LOUVAR, 2002), e ocorre quando a razão entre P_0 e a pressão atmosférica P_a respeita a desigualdade apresentada na Equação 3. (TNO, 1996):

$$\frac{P_0}{P_a} \geq \left(\frac{(\gamma + 1)}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (3.3)$$

O coeficiente de escoamento é determinado pela Equação 3.4 quando há escoamento crítico, e pela Equação 3.5 quando há escoamento subcrítico (TNO, 1996).

$$\psi^2 = 1 \quad (3.4)$$

$$\psi^2 = \frac{2}{\gamma - 1} * \left(\left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}} * \left(\frac{P_a}{P_0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} * \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_0} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right) \right) \quad (3.5)$$

O coeficiente de descarga C_d é determinado pelo produto do coeficiente de fricção C_f e do coeficiente de contração C_c . Para orifícios arredondados, a contração não tem influência nenhuma, e a fricção é muito baixa. Desta forma, o valor de C_D está entre 0,95 e 0,99 (TNO, 1996). Conservativamente, assumiu-se que todos os orifícios avaliados quantitativamente eram arredondados, caso no qual o programa utiliza um coeficiente de descarga de valor unitário (GEXCON NETHERLANDS BV, 2022a).

Os modelos acima são suficientes para determinar a vazão e propriedades da liberação de gases através de um orifício em um vaso. Para a liberação de gases através de orifícios em tubulações, é preciso primeiro determinar a pressão P_e na tubulação imediatamente antes do orifício. Para isso, o programa estima este valor, calcula uma vazão de escoamento no orifício através da Equação 3.2, e então calcula uma vazão de escoamento ao longo da tubulação conforme Equação 3.6 (TNO, 1996). Se as vazões calculadas cumprirem a condição estabelecida pela Equação 3.7 (TNO, 1996), a vazão através do orifício foi determinada, caso contrário o processo é repetido com uma nova estimativa de P_e .

$$q_s = \frac{A_p}{\sqrt{\frac{2 * \int_{P_0}^{P_e} \rho(P) * dP}{4f_F * \frac{l_p}{d_p}}} \quad (3.6)$$

Onde A_p é a área transversal da tubulação, l_p seu comprimento e d_p seu diâmetro interno.

$$q_{S,tubulação}(\Delta P_{tubulação}) = q_{S,orifício}(\Delta P_{orifício}) \quad (3.7)$$

No caso da liberação instantânea de gases liquefeitos sob pressão, a massa presente na nuvem é resultante da fração flasheada χ durante a liberação e da evaporação devido a mistura do material com o ar (GEXCON NETHERLANDS BV, 2022a). Esta relação se dá de acordo com a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Massa na nuvem de vapor após liberação instantânea de gás liquefeito.

Fração de <i>flash</i> adiabático χ	Massa na nuvem (fração do inventário do vaso)
$\chi < 0,1$	$2 * \chi$
$0,1 \leq \chi < 0,36$	$(0,8*\chi-0,028)/0,26$
$\chi \geq 0,36$	1

Fonte: adaptado de (TNO, 1999)

Para a liberação contínua de gases liquefeitos sobre pressão, a modelagem busca prever a queda de temperatura e massa líquida durante o escoamento. Inicialmente, deve-se determinar se o escoamento inicial é vapor (caso o vazamento seja acima do nível do líquido borbulhante), bifásico (caso seja entre o nível do líquido e do líquido borbulhante) ou líquido, caso contrário (TNO, 1996). Neste trabalho, foi conservativamente considerado que o orifício estava localizado na base dos vasos analisados, garantindo assim a perda de inventário máxima. Desta forma, o escoamento inicial se deu sempre na fase líquida.

Para o escoamento de líquidos através de orifícios, a Equação 3.8 (Equação de Bernoulli) (TNO, 1996) determina a vazão mássica q_S , onde ρ_L é a densidade do líquido e P a pressão total na abertura, obtida pela soma da pressão hidráulica do líquido e pressão externa.

$$q_S = C_d * A_h * \sqrt{2(P - P_a) * \rho_L} \quad (3.8)$$

Para o escoamento de líquidos através de tubulações, a vazão mássica q_S , velocidade média de escoamento u_L e queda de pressão ΔP são encontrados pelas Equações 3.9 a 3.11 (TNO, 1996), respectivamente. f_D é o fator de atrito, determinado de forma iterativa pelo programa por depender do número Reynolds (função da vazão), enquanto u_f é a velocidade do fluido após flashear.

$$q_S = \rho_L * u_L * A_p \quad (3.9)$$

$$u_L = \sqrt{2 * \frac{\Delta P}{l_p} * \frac{d_p}{f_D * \rho_L}} \quad (3.10)$$

$$\Delta P = f_D * \frac{\rho_f}{2} * u_f^2 * \frac{l_p}{d_p} \quad (3.11)$$

A fração flasheada tanto para liberações instantâneas quanto contínuas de gases liquefeitos sob pressão foi calculada pelo *software* a partir das seguintes premissas: mistura com o ar é negligenciável, e vapor e gotículas possuem a mesma velocidade. Assume-se que há conservação de entalpia (Equação 3.12), momento (Equação 3.13) e massa (Equação 3.14) (TNO, 1996), e a partir dessas equações, da temperatura de ebulição T_B de forma que $P_V(T_B) = P_a$, da equação de estado e dados de entalpia, determina-se as condições de *flash* (TNO, 1996). H_e e u_e são a entalpia e a velocidade do fluido nas condições de saída, e H_f e u_f após o *flash*; A_e é a área transversal de saída, P_e a pressão de saída e A_f a seção transversal do jato após *flash*.

$$H_e + 0,5u_e^2 = H_f + 0,5u_f^2 \quad (3.12)$$

$$\rho_e u_e^2 A_e + A_e (P_e - P_a) = \rho_f u_f^2 A_f \quad (3.13)$$

$$\rho_e u_e A_e = \rho_f u_f A_f \quad (3.14)$$

A massa líquida restante forma uma poça no chão, que contribui para a nuvem conforme evapora (TNO, 1996). Assim, tanto para liberações instantâneas quanto contínuas de gases liquefeitos sob pressão, deve ser utilizado como dado de entrada dos modelos de dispersão uma nuvem inicial cuja massa é igual à soma da nuvem formada pelo *flasheamento* e da nuvem formada pela evaporação da poça (GEXCON NETHERLANDS BV, 2022a).

A poça formada estará na temperatura de ebulição da substância vazada. A área da poça é definida a partir do seu volume e sua altura, dependente do solo sobre o qual ela se espalha. A taxa de transferência de calor para a poça é produto do calor advindo do ar e do solo (GEXCON NETHERLANDS BV, 2022a).

Como as vazões calculadas para a liberação de material perigoso variam com o tempo, para a utilização como dado de entrada em modelos de dispersão e consequência, é necessário

definir uma vazão representativa constante para todo o vazamento. O programa Effects realizada a divisão da liberação de material em cinco segmentos, cada qual com a mesma massa de material liberado. O *Purple Book* determina que, no caso de substâncias inflamáveis, a vazão representativa deve ser igual à vazão média ao longo da perda inicial de 20% do material vazado. Para substâncias tóxicas, a vazão representativa deve ser igual à vazão média ao longo da perda dos 20% de material subsequentes, ou seja, a vazão média após a perda inicial de 20% do material, até 40% (TNO, 1999).

3.2 MODELOS DE DISPERSÃO

As dispersões foram calculadas utilizando classes de estabilidade Pasquill-Gifford.

3.2.1 Classes de Estabilidade Pasquill-Gifford

O modelo de Pasquill-Gifford estabelece classes de estabilidade da atmosfera, dependentes das condições atmosféricas, para permitir o cálculo de desvios de concentração ao longo da direção do vento. As classes são estabelecidas com base na velocidade do vento e na quantidade de luz solar. Durante o dia, maiores velocidades resultam em maior estabilidade atmosférica, enquanto durante a noite a relação é a inversa (CROWL e LOUVAR, 2002).

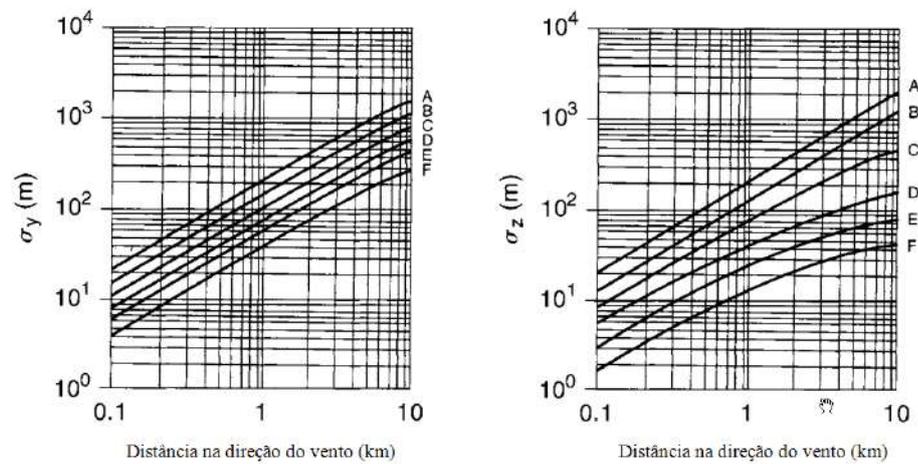
As classes de estabilidade indicam como os coeficientes de difusividade σ_x , σ_y e σ_z de uma nuvem se comportam ao longo da distância do ponto de liberação. Estes coeficientes são relacionados ao desvio padrão da concentração na direção do vento, perpendicular ao vento e verticalmente, respectivamente (CROWL e LOUVAR, 2002).

A Tabela 3.2 mostra as condições nas quais cada classe de estabilidade se aplica. As Figuras 3.3 e 3.4 representam a relação de σ_y e σ_z de uma nuvem com a distância na direção do vento, de acordo com a classe utilizada, para áreas urbanas e rurais, respectivamente. É razoável assumir que $\sigma_y = \sigma_x$ (CROWL e LOUVAR, 2002).

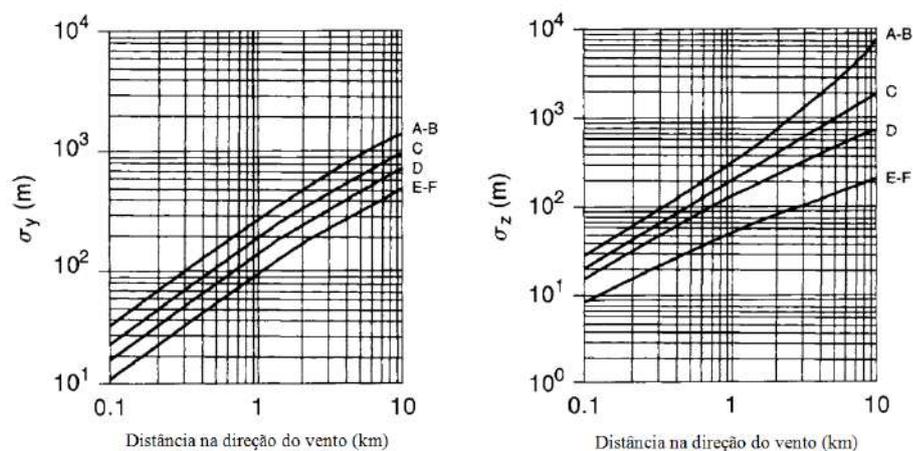
Tabela 3.2 – Classes de estabilidade Pasquill-Gifford.

Velocidade do vento (m/s)	Insolação diurna			Condições noturnas	
	Forte	Moderada	Leve	>1/2 do céu nublado	≤3/8 do céu nublado
<2	A	A-B	B	F	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-4	B	B-C	C	D	E
4-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Fonte: adaptado de (CROWL e LOUVAR, 2002)

Figura 3.3 – Coeficientes de dispersão para áreas rurais.

Fonte: adaptado de (CROWL e LOUVAR, 2002)

Figura 3.4 – Coeficientes de dispersão para áreas urbanas.

Fonte: adaptado de (CROWL e LOUVAR, 2002)

Neste trabalho, de acordo com o recomendado na ausência de dados específicos pela norma P4.261 (CETESB, 2014), as condições de vento e estabilidade da Tabela 3.3 foram assumidas.

Tabela 3.3 – Condições meteorológicas assumidas.

Período	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Umidade Relativa (%)	Velocidade do vento (m/s)	Classe de estabilidade Pasquill-Gifford
Dia	25,0	30,0	80,0	3,0	C
Noite	20,0	20,0	80,0	2,0	E

Fonte: adaptado de (CETESB, 2014).

3.2.2 Modelagem de Dispersões

O programa usado utiliza um modelo de dispersão unificado que identifica o comportamento esperado, incluindo dispersões densas (como da amônia liquefeita), dispersões neutras (de gases de densidade similar a do ar) e de dispersões mais leves que o ar (como a amônia gasosa) (GEXCON NETHERLANDS BV, 2022a).

Assume-se que não há mudanças na velocidade, direção e estabilidade do vento ao longo do espaço. Em relação a gases mais leves que o ar, é considerada a tendência de se espalhar de forma radial devido a gravidade, formando uma “poça gasosa”, até mesmo contra a direção do vento (GEXCON NETHERLANDS BV, 2022a).

O objetivo do cálculo de dispersão é a determinação da concentração nos diversos pontos ao redor da liberação de material. Esta dispersão se dá tanto pela turbulência da fonte, calculada pelos modelos de fonte, como pela turbulência da atmosfera, responsável pela dispersão passiva. A concentração em um dado ponto resultante de dispersão passiva de fontes contínuas e instantâneas pode ser calculada pelas Equações 3.15 e 3.16 (TNO, 1996), respectivamente (TNO, 1996).

$$c(x, y, z) = \frac{q}{u_a} F_y(x, y) F_z(x, y) \quad (3.15)$$

$$c(x, y, z, t) = Q F_x(x, t) F_y(t u_a, y) F_z(t u_a, z) \quad (3.16)$$

Nas equações acima, q é a taxa de liberação, u_a a velocidade do vento e as funções F_x , F_y , F_z representam a dispersão longitudinal, lateral e vertical, sendo que F_y e F_z são iguais em ambas equações, somente com um tempo diferente utilizado.

As dispersões lateral, vertical e na longitudinal (na direção do vento) são calculadas de acordo com a série de equações apresentadas no capítulo 4 do *Yellow Book* (TNO, 1996, p. 4.69-4-77). É importante ressaltar a dependência dessas relações com a altura de mistura h_i , altura limite da turbulência atmosférica, que por sua vez é dependente da estabilidade atmosférica (TNO, 1996). A altura de mistura é calculada através da Tabela 3.4, onde u_* é a velocidade de fricção, L é o comprimento de Monin-Obukhov e f é o parâmetro de Coriolis.

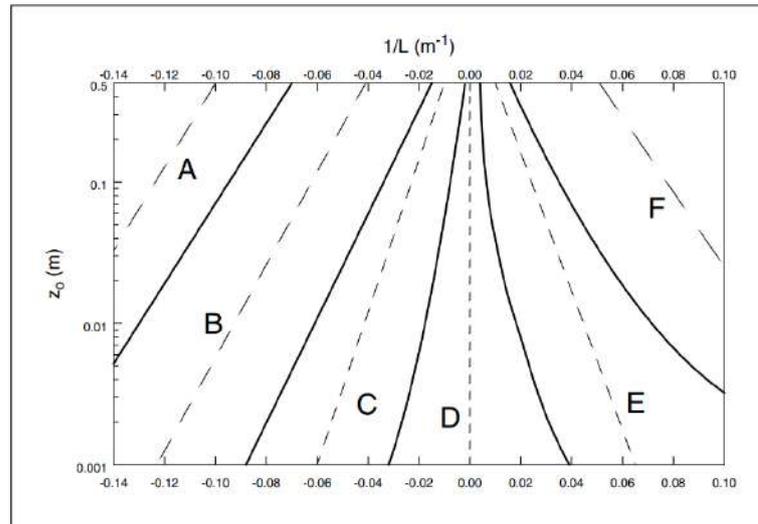
Tabela 3.4 – Altura de mistura h_i .

$1/L$	Estabilidade	h_i (m)
> 0	F, E, D	$0,4 \sqrt{\frac{u_*}{f}} L$
0	D	O menor valor entre $0,2 u_*/f$ ou 500
< 0	C	1000
	B, A	1500

Fonte: adaptado de (TNO, 1999)

Onde, $f = 2\Omega \cdot \sin(\varphi)$, sendo Ω a rotação da terra ($7,27 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) e φ a latitude do local (TNO, 1996). A velocidade de fricção u_* é definida como a raiz quadrada da razão entre a tensão de cisalhamento dividida pela densidade do ar na superfície da nuvem. Já o comprimento de Monin-Obukhov é a altura na qual a turbulência gerada pelo vento iguala a turbulência dissipada pelo fluxo de calor entre nuvem e atmosfera. L pode ser obtido a partir do gráfico apresentado na Figura 3.5, a partir da classe de estabilidade Pasquill-Gifford e do comprimento de rugosidade de superfície z_0 do local (TNO, 1996).

Figura 3.5 – Relação entre L, estabilidade e z_0 .



Fonte: (TNO, 1996)

As opções de comprimento de rugosidade apresentadas na Tabela 3.5 são disponibilizadas pelo *software* de acordo com as características do local analisado.

Tabela 3.5 – Comprimentos de rugosidade de superfície z_0 .

Número	Comprimento de Rugosidade (m)	Descrição
1	0,0002	Águas abertas por pelo menos 5km
2	0,005	Lama plana, neve, zero vegetação
3	0,03	Terreno plano aberto, grama, poucos objetos isolados
4	0,1	Cultivos baixos, objetos grandes ocasionais
5	0,25	Cultivos altos, objetos grandes espalhados
6	0,5	Parques, arbustos, objetos numerosos
7	1,0	Objetos grandes regulares (subúrbio, floresta)
8	3,0	Centro urbano com edificações altas e baixas

Fonte: adaptado de (GEXCON NETHERLANDS BV, 2022a)

3.3 MODELOS DE RADIAÇÃO TÉRMICA E SOBREPRESSÃO

Após a liberação de gases inflamáveis, caso ocorra a ignição desses gases imediatamente, observa-se a ocorrência de um jato ou uma bola de fogo, dependendo de o vazamento ser contínuo ou instantâneo, respectivamente (TNO, 1999).

O perigo presente em ambas as tipologias é o fluxo de calor irradiado por elas, que é determinado a partir das dimensões do fenômeno, do calor gerado pela combustão, da fração deste calor que é irradiada e pela transmissividade da atmosfera e distância ao ponto analisado (TNO, 1996).

O jato de fogo é caracterizado pela ignição de um vazamento contínuo de gás inflamável, que permanece emitindo calor por quanto tempo o produto for vazado. Sua taxa de queima sob condições estacionárias é considerada igual à taxa de vazamento do material inflamável. A bola de fogo, sendo resultado de uma liberação instantânea, é a pluma liberada pelo incidente incendiada. Embora esta dure somente o tempo necessário para a combustão queimar todo o gás disponível, seu fluxo de calor é bem mais intenso, devido ao maior inventário de combustível. Sua taxa de queima é considerada igual a quantidade total de material inflamável dividida pela duração da bola de fogo (TNO, 1996).

Os fatores importantes para o cálculo da radiação térmica são: o poder de emissão de superfície ou SEP (*Surface Emissive Power*), que é o calor irradiado por área superficial da chama. O fator de visualização F_{view} que engloba o formato da chama, inclusive a influência do vento, a distância do receptor ao exterior da chama e a orientação da superfície receptora. A transmissividade atmosférica τ_a . A quantidade de fuligem sobre a chama, que para gases pode ser considerada 0. (TNO, 1996).

A transmissividade atmosférica é afetada pela absorção de calor do ar, que pode ser representada pela absorção dos dois componentes mais relevantes, gás carbônico e vapor d'água (TNO, 1996), conforme Equação 3.17 (TNO, 1996). Nesta, α_w é absorção do vapor d'água e α_c a absorção do gás carbônico.

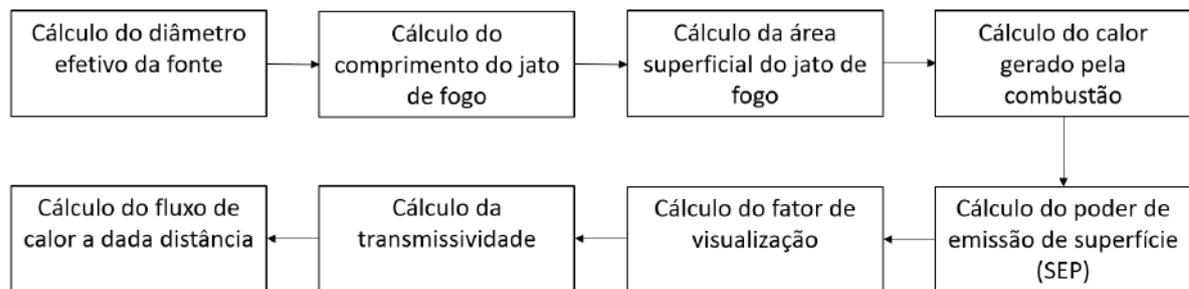
$$\tau_a = 1 - \alpha_w - \alpha_c \quad (3.17)$$

Ambos os fatores dependem da pressão de vapor parcial, comprimento L coberto pela radiação, temperatura de radiação e temperatura ambiente. A pressão parcial do dióxido de carbono na atmosfera é sempre 30 N/m², enquanto a do vapor d'água é dependente da temperatura e umidade relativa (TNO, 1996).

Neste trabalho, o formato da chama e a radiação resultantes de jatos de fogo foram calculados pelo modelo de Chamberlain. Este modelo foi desenvolvido através de anos de pesquisa e validado por testes em tuneis de vento e testes de campo *onshore* e *offshore*. O modelo representa a chama como um tronco de cone, irradiando como um corpo sólido com SEP uniforme. É possível determinar a variação da forma da chama e seu SEP sob diversas condições ambientes e de vazão. Um aumento na velocidade de saída do gás reduz a fração de calor irradiado (TNO, 1996).

A sequência de cálculos que constitui o modelo de Chamberlain é demonstrada na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Etapas de cálculo do modelo de Chamberlain.



Fonte: adaptado de (TNO, 1996)

Para a realização destes cálculos, o modelo requer como entrada informações de temperatura e pressão de saída do material vazado, além de sua vazão, todas providas pelos cálculos de modelo de fonte. É necessário também o tamanho do furo, que para ruptura de tubulações foi assumido igual aos seus diâmetros. É necessário também o ângulo de saída, considerado 0° , ou horizontal, e a altura da liberação, padronizada como 1 metro para todos os equipamentos.

Para bolas de fogo, o processo de cálculo de radiação é similar (TNO, 1996). O raio r_{fb} da bola de fogo é calculado conforme a Equação 3.18, onde c_9 é $3,24 \text{ m/kg}^{0,325}$ e m é a massa de material inflamável. Sua duração t é calculada conforme a Equação 3.19, onde c_{10} é $0,852\text{s/kg}^{0,28}$. Por fim, assume-se que a altura a qual a bola de fogo ascende é o dobro de seu raio (TNO, 1996).

$$r_{fb} = c_9 * m^{0,325} \quad (3.18)$$

$$t = c_{10} * m^{0,26} \quad (3.19)$$

Para a realização dos cálculos, o modelo requer temperatura e pressão no vaso analisado, seu volume e sua altura.

Um modelo de sobrepressão foi utilizado para calcular os efeitos físicos gerados por explosões de nuvens de vapor, ou VCEs (*Vapour Cloud Explosions*). Um VCE ocorre quando uma nuvem de material inflamável é incendiada após sua dispersão, de forma que a propagação da chama causa a súbita expansão dos produtos gasosos da combustão a sua frente. Essa expansão causa um fluxo logo a frente da chama conforme essa se alastra pela nuvem, e, dado que esse fluxo se torne turbulento, a expansão resulta em fortes sobrepressões (TNO, 1996).

Algumas condições são necessárias para que um VCE aconteça após a ignição do vapor ou gás. A ignição deve ocorrer somente após a nuvem ter se dispersado, dado que se ocorrer imediatamente após o vazamento do material, tem-se um jato ou bola de fogo. Parte da nuvem tem que estar dentro dos limites de inflamabilidade, ou seja, em uma concentração abaixo do limite superior e acima do limite inferior. É necessária a presença de turbulência na expansão dos produtos de combustão, que pode ser fruto da turbulência da própria fonte de vazamento, ou da interação do fluxo com obstáculos físicos no caminho da chama (TNO, 1996).

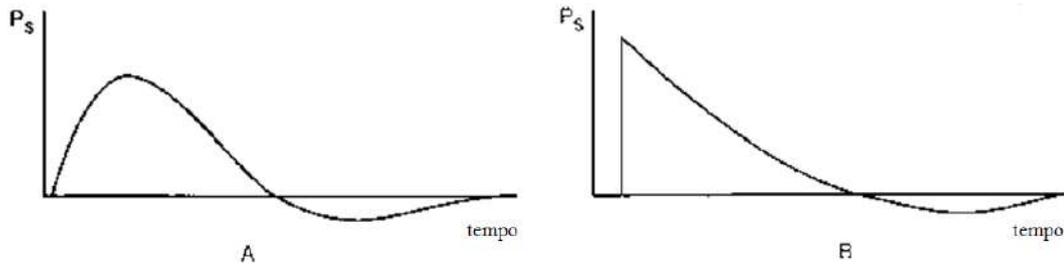
Desta forma, o VCE é um fenômeno que não é alimentado pela nuvem como um todo. Somente as áreas da nuvem que estão dentro dos limites de inflamabilidade, e próximas do vazamento de material inflamável ou a áreas congestionadas por obstáculos contribuem para os efeitos de sobrepressão. Isto ocorre, pois a chama se espalha por meio de deflagração, ao invés de detonação, fenômeno esse muito raro.

Na deflagração, a propagação da chama se dá pela condução térmica e difusão molecular, de forma que os produtos da reação esquentam os reagentes mais à frente na nuvem, levando a sua ignição. Este processo não é particularmente veloz por si só, mas a introdução de turbulência no sistema aumenta a velocidade da chama e, conseqüentemente, a sobrepressão resultante. A deflagração é mais comum que a detonação pois requer energias de ignição da ordem de 10^{-4} Joules, como faíscas e superfícies quentes, enquanto a energia de ignição para detonação é da ordem de 10^6 Joules (TNO, 1996).

A sobrepressão de uma explosão de nuvem de vapor se propaga na forma de uma onda de choque, isto é, uma mudança transiente na pressão da atmosfera. Inicialmente, um rápido

aumento na pressão, seguido de diminuição branda até condições abaixo das normais, e por fim um retorno à pressão ambiente (TNO, 1996). A Figura 3.7 ilustra como a pressão em um dado ponto varia, e como o formato da onda de choque depende da velocidade de combustão da nuvem (em que B representa a onda resultante de uma combustão mais rápida que A).

Figura 3.7 – Ondas de choque típicas de um VCE.



Fonte: adaptado de (TNO, 1996)

Existem dois grupos principais de modelos para VCEs: modelos de equivalência, que quantificam a fonte por uma quantidade equivalente de explosivos, usualmente TNT, e modelos combustível-ar, que consideram as diferenças de comportamento entre explosivos e VCEs (TNO, 1996). Neste trabalho, o modelo de equivalência TNT não foi utilizado, pois não considera a variação da sobrepressão de VCEs de acordo com a geometria do local de explosão, nem às características específicas à deflagração de gases. Este modelo é especialmente inadequado para representar VCEs mais brandos (TNO, 1996).

Dentre os modelos combustível-ar, considerados uma melhor alternativa para a determinação dos efeitos de uma explosão de nuvem de vapor, o modelo de Multi-Energia é o mais adequado para subsequente determinação do dano a pessoas. Isso ocorre, pois diferente de outros modelos deste tipo, um dos seus resultados é o formato da onda de choque (TNO, 1996).

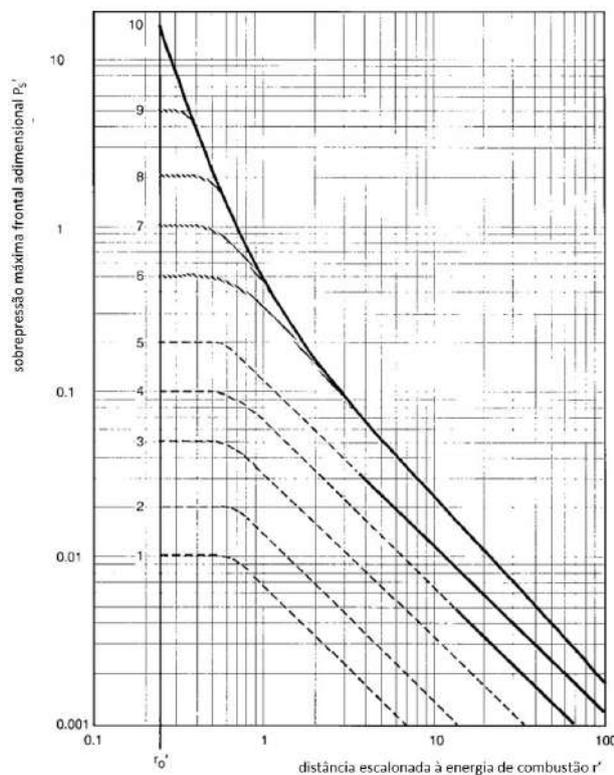
O conceito de multi-energia é que a combustão deflagrativa ocorre não somente em partes da nuvem suficientemente congestionadas, mas também em locais que já têm turbulência antes da combustão, como àqueles próximos ao ponto de liberação de material. O resto da nuvem, portanto, não tem contribuição significativa à explosão. Assim, um VCE não é uma única entidade, mas um conjunto de sub-explosões (TNO, 1996).

O modelo multi-energia assume uma distribuição de sub-explosões simétrica ideal, cujos efeitos são determinados pela força inicial de explosão, indicada por curvas numeradas de 1, para forças baixas, a 10, para forças de detonação. A partir destas curvas, adequadas para

energia de combustão de $3,5 \text{ MJ/m}^3$, característica de misturas estequiométricas de hidrocarbonetos com ar, obtém-se os parâmetros relevantes do VCE (TNO, 1996).

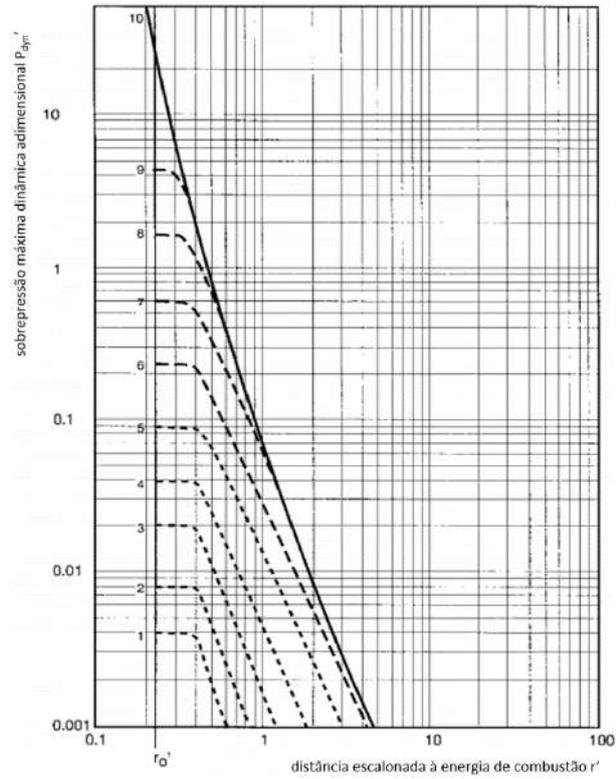
Estes parâmetros são a sobrepressão máxima frontal, a sobrepressão máxima dinâmica e a duração da fase positiva (fase na qual a pressão da onda de choque é superior a ambiente). As Figuras 3.8, 3.9 e 3.10 apresentam a relação destes parâmetros com a distância escalonada à energia de combustão r' . A relação se dá de forma adimensional, podendo ser usada por qualquer grupo consistente de unidades. Explosões de força de detonação são representadas por linhas sólidas, de baixa força inicial por linhas pontilhadas e a transição entre ambos estados é representada por linhas tracejadas (TNO, 1996).

Figura 3.8 – Sobrepressão máxima frontal – Multi-Energia.



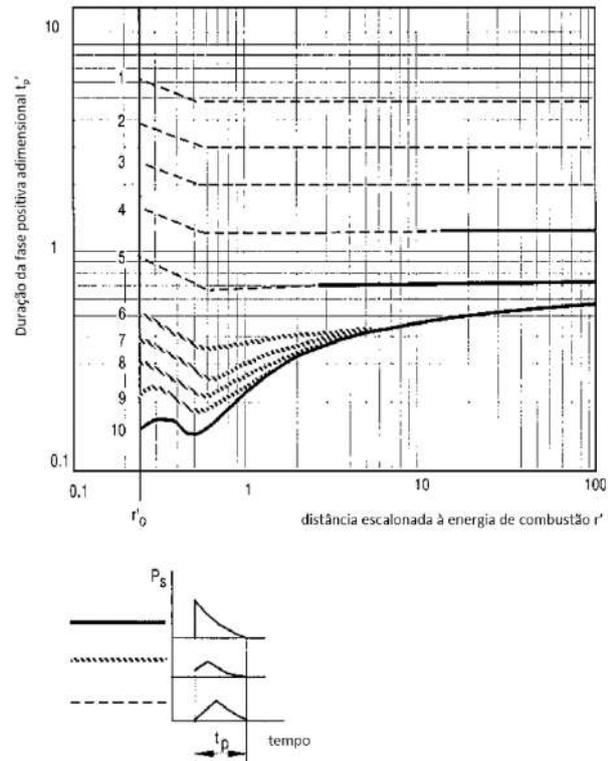
Fonte: adaptado de (TNO, 1996)

Figura 3.9 – Sobrepressão máxima dinâmica – Multi-Energia.



Fonte: adaptado de (TNO, 1996)

Figura 3.10 – Duração da fase positiva e formato da onda de choque – Multi-Energia.



Fonte: adaptado de (TNO, 1996)

Para utilizar estas relações, segue-se o seguinte roteiro: primeiramente, calcular a distância escalonada r' , a partir da distância r do centro da explosão que está sendo considerada e da energia disponível E e pressão ambiente p_a , conforme Equação 3.20 (TNO, 1996).

$$r' = \frac{r}{\left(\frac{E}{p_a}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (3.20)$$

Assumir uma força de explosão (classes 1 a 10) e encontrar os valores na distância escalonada calculada nos gráficos apresentados. Calcular a pressão máxima P_s conforme Equação 3.21 (TNO, 1996).

$$P_s = P'_s * p_a \quad (3.21)$$

Calcular a duração da fase positiva t_p conforme Equação 3.22 (TNO, 1996), onde a_a é a velocidade do som em ar ambiente.

$$t_p = t'_p * \frac{\left(\frac{E}{p_a}\right)^{\frac{1}{3}}}{a_a} \quad (3.22)$$

Calcular a pressão dinâmica máxima p_{dyn} conforme Equação 3.23 (TNO, 1996).

$$p_{dyn} = p'_{dyn} * p_a \quad (3.23)$$

Determinar o formato da onda e choque conforme Figura 3.10. Calcular o impulso positivo i_s pela integração da variação da sobrepressão durante a fase positiva, que resulta no produto da Equação 3.24 (TNO, 1996).

$$i_s = \frac{1}{2} * P_s * t_p \quad (3.24)$$

Neste trabalho, duas premissas foram utilizadas para todos os VCEs calculados. Assumiu-se que a força das explosões pode ser representada pela curva de número 6 (CETESB, 2014), e que a fração das nuvens inflamadas com valores apreciáveis de sobrepressão é 0,08 (TNO, 1999).

3.4 MODELOS DE VULNERABILIDADE

Para avaliar as consequências de efeitos físicos em seres humanos, estas podem ser expressas em mortes, uma vez que a dificuldade de comparar diferentes tipos de ferimentos provocados por diferentes tipologias acarretam a necessidade de uma unidade comum (AICHE.CCPS, 1999).

Para isso, o método utilizado neste trabalho foi o método estatístico de dose-resposta junto à função probit. O método de dose-resposta foi escolhido, pois considera a variedade de respostas presentes em uma população para uma mesma dose, ao invés de assumir uma resposta uniforme. Já a função probit (*probability unit* ou unidade de probabilidade) lineariza a resposta desse método, através de uma relação dependente do tempo entre dose tóxica (ou efeitos térmicos e sobrepressão) e porcentagem da população afetada (AICHE.CCPS, 1999).

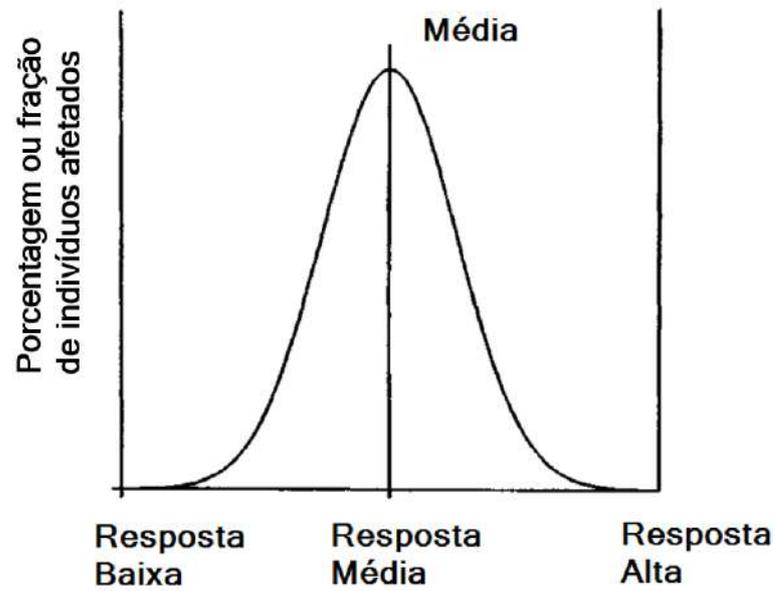
3.4.1 Dose-Resposta

Toxicidade é a capacidade de uma substância de produzir efeitos indesejáveis, dada uma concentração suficiente em certa parte do corpo. Esta propriedade pode ser estudada através de testes onde uma população de animais, como ratos e camundongos, é exposta a uma dose fixa e sua resposta é notada. No caso de vapores inaláveis, a dose é medida como concentração de vapor ao longo de um período (AICHE.CCPS, 1999).

Em uma população típica de humanos, existe grande variedade nas respostas a certa dose, devido a fatores como idade, saúde e cansaço. Idosos, crianças e pessoas com problemas de saúde nos sistemas respiratório e cardiovascular são mais sensíveis. Esta variedade de resposta pode ser modelada por uma distribuição normal, cujo formato da curva é determinado inteiramente pela resposta medida μ e pelo desvio padrão σ (AICHE.CCPS, 1999).

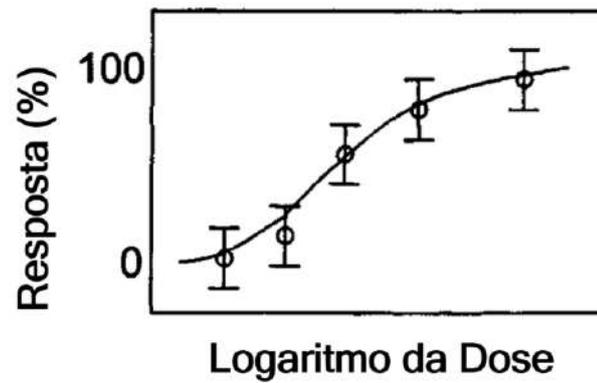
A Figura 3.11 apresenta uma distribuição normal típica, relacionando a porcentagem de indivíduos com o nível de resposta em uma dada dose. Esse experimento é repetido com diversas doses, gerando diversas distribuições, de forma que uma curva dose-resposta pode ser construída com a resposta média cumulativa em cada dose. A curva dose-resposta é usualmente traçada com o logaritmo das doses, conforme Figura 3.12, pois alguns indivíduos toleram altas doses, e outros são extremamente sensíveis (AICHE.CCPS, 1999).

Figura 3.11 – Distribuição normal de resposta típica.



Fonte: adaptado de (AICHE.CCPS, 1999)

Figura 3.12 – Curva log(dose)-resposta típica.



Fonte: adaptado de (AICHE.CCPS, 1999)

3.4.2 Função probit

Devido à dificuldade de se trabalhar com uma curva sigmoide, obter uma equação analítica linear a partir desses mesmos dados é vantajoso, e isso pode ser feito através do método de transformação probit. Na equação 3.25 a variável probit Y (de distribuição normal, média 5 e desvio padrão 1) se relaciona com a probabilidade P , e u é uma variável de integração. Esta mesma relação pode ser expressa de maneira mais facilmente computável pela Equação 3.26 (AICHE.CCPS, 1999).

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (3.25)$$

$$P = 50 \left[1 + \frac{Y-5}{|Y-5|} \operatorname{erf}\left(\frac{|Y-5|}{\sqrt{2}}\right) \right] \quad (3.26)$$

O resultado dessa relação entre variável probit e probabilidade é demonstrado na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Conversão de probit para probabilidade.

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,87	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,07	5,10	5,13	5,15	5,17	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33

Fonte: adaptado de (AICHE.CCPS, 1999)

Tendo a relação entre variável probit e probabilidade, é possível usar funções probit para determinar a relação entre dose e resposta. Essas funções tomam a forma geral apresentada na Equação 3.27 (AICHE.CCPS, 1999), onde Y é a variável probit, V é a variável que causa resposta (a dose) e k_1 e k_2 são constantes.

$$Y = k_1 + k_2 \ln V \quad (3.27)$$

Para a dispersão tóxica da amônia, a função probit usada foi a Equação 3.28 (TNO, 1992), onde C é a concentração de amônia e t o tempo de passagem da nuvem, calculados pelo modelo de dispersão no ponto analisado, em mg/m^3 e minutos, respectivamente.

$$Y = -15,8 + \ln(C^2 t) \quad (3.28)$$

Para a radiação térmica, a função probit usada foi a Equação 3.29 (TNO, 1999). Q é a radiação térmica calculada pelo modelo no ponto analisado, em W.m^{-2} , e t é o tempo de duração do jato de fogo, limitado a um máximo de 20 segundos, equivalente ao tempo necessário para que pessoas expostas fujam (TNO, 1999).

Não foram considerados nesse trabalho os efeitos de proteção devido a vestimentas. Comumente, o fator de 0,14 é aplicado à letalidade encontrada com a função probit, mas esse valor é dependente das roupas usadas pela população e, conservativamente, foi ignorado.

$$Y = -36,38 + 2,56 \ln \left(Q^{\frac{4}{3}} t \right) \quad (3.29)$$

Para qualquer tipologia de incêndio, define-se que todos aqueles que estiverem dentro do envelope da chama têm uma probabilidade de 100% de morte, enquanto aqueles do lado de fora têm uma probabilidade de 0% de morte (TNO, 1999). Incêndios em nuvem levam a óbito somente nesse caso, e não tem sua letalidade definida pela função probit acima, devido a sua curta duração.

Para os efeitos de sobrepressão, diferentes funções probit são utilizadas para determinar a probabilidade de uma população de ser afetada pelas diversas consequências possíveis. Essas consequências se dividem em efeitos primários (ou diretos), secundários e terciários. Efeitos primários são o colapso de pulmões e outros órgãos sensíveis, e a perfuração dos tímpanos, resultados do aumento de pressão. Secundários envolvem a colisão com detritos, tanto originados na fonte da explosão como de objetos ao redor que são impulsionados por ela. Terciários englobam o impacto do corpo contra obstáculos e o impacto da cabeça contra obstáculos (TNO, 1992).

Devido à complexidade resultante de tantas modelagens distintas, e a dificuldade de prever quais consequências ocorreriam, optou-se nesse trabalho por utilizar uma relação simplificada entre sobrepressão e letalidade. Pode-se assumir que a letalidade é de 100% para sobrepressões acima de 0,3 bar, e 0% caso contrário (TNO, 1999).

4 PROCESSO HABER-BOSCH E PLANTA DE SÍNTESE DE AMÔNIA ESTUDADA

A amônia é uma substância conhecida desde 1774, quando Joseph Priestley, um químico inglês, primeiro a isolou. Foi somente em 1898 que uma maneira de sintetizar a amônia através da fixação de nitrogênio do ar foi descoberta. Adolph Frank e Nikodem Caro estudaram a fixação do nitrogênio através de sua reação com carbeto de cálcio, que poderia ser posteriormente hidrolisado para a formação de amônia, conforme as reações das Equações 4.1 e 4.2 (PATTABATHULA e RICHARDSON, 2016).



Este método de síntese não era capaz de produzir grandes quantidades de amônia, e foi somente no início do século XX que isto se tornou possível (PATTABATHULA e RICHARDSON, 2016). Durante a primeira década deste século, a demanda por fertilizantes nitrogenados superava amplamente a sua oferta. Até então, as maiores fontes de nitrogênio para a agricultura eram materiais naturais ou seus produtos de decomposição, como o sulfato de amônio advindo da produção de coque de carvão, e, principalmente, depósitos de fezes de aves, também chamados de guano (MODAK, 2002).

Fritz Haber e Walther Nernst ambos estudaram de forma independente um método que permitia a síntese de amônia através da reação direta entre N_2 e H_2 sob um catalisador de ferro, em temperaturas próximas a $500^\circ C$ e pressões entre 150 e 200 atm. Embora Nernst houvesse concluído que esta reação seria inviável em escalas industriais, Haber, em 1906, chegou a uma conversão de 6%, e, a partir disso, concluiu que seria possível obter maior conversão através de um sistema de reciclo (PATTABATHULA e RICHARDSON, 2016)

Após comprar a patente deste processo de Haber, a empresa alemã BASF, liderada neste projeto por Carl Bosch, iniciou o desenvolvimento de melhores opções de catalisador e de equipamentos capazes de suportar as condições severas de reação. Em 1913, a primeira planta de produção de amônia comercial foi construída em Oppau, na Alemanha, com uma capacidade de produção de 30 toneladas diárias (PATTABATHULA e RICHARDSON, 2016). Deste empreendimento, nasceu o processo Haber-Bosch, que até os dias de hoje permanece fundamentalmente inalterado em seu processo de síntese (APPL, 1997).

Atualmente, a amônia produzida a partir do processo Haber-Bosch é a base de quase todos os produtos nitrogenados, com uma produção mundial de mais de 130 milhões de toneladas, o sexto produto químico de maior produção no planeta (MODAK, 2002).

A síntese de amônia se inicia sempre a partir de uma matéria-prima, da qual é produzida o hidrogênio necessário para a produção. Embora existam diversas matérias-primas viáveis, inclusive o carvão, muito comumente utilizado na China, a maior parte de toda produção global de amônia depende da reforma de gás natural (PATTABATHULA e RICHARDSON, 2016). O processo Haber-Bosch a partir de gás natural consiste nas seguintes etapas principais (SARTORE, 2014).

- Dessulfurização do gás natural;
- Reforma Primária;
- Reforma Secundária;
- Conversão de Shift de monóxido de carbono;
- Remoção do dióxido de carbono;
- Metanação;
- Secagem do gás de síntese;
- Síntese da amônia;
- Recuperação de amônia;
- Refrigeração da amônia.

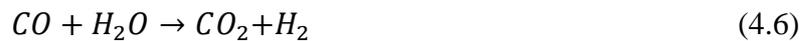
A dessulfurização do gás natural ocorre em um vaso com catalisadores de cobalto-molibdênio, após misturá-lo com uma pequena quantidade de hidrogênio, reciclado do loop de síntese. Neste vaso, compostos de enxofre orgânico RSH são convertidos em compostos dessulfurizados RH e sulfeto de hidrogênio, conforme Equação 4.3. Contaminantes clorados também presentes no gás natural e o sulfeto de hidrogênio formado são posteriormente adsorvidos em separadores com leitos de óxido de zinco (SARTORE, 2014).



O gás natural dessulfurizado é misturado então com vapor d'água sob pressão e ambos são pré-aquecidos na seção de convecção do Reformador Primário. Este equipamento tem tubos com catalisadores a base de níquel, onde os hidrocarbonetos pesados (HCp) do gás natural reagem com o vapor, e são convertidos a metano, conforme Equação 4.4. O metano produto dessa conversão e presente no gás natural reage formando gás de síntese, uma mistura de hidrogênio e monóxido de carbono, de acordo com a Equação 4.5 (SARTORE, 2014).



Já nesta etapa ocorre a reação de *Shift*, conforme Equação 4.6, onde monóxido de carbono reage com vapor d'água para formar mais gás hidrogênio e dióxido de carbono (SARTORE, 2014).



Na Reforma Secundária, ar de processo comprimido e aquecido é alimentado pelo topo, onde seu oxigênio reage com a corrente efluente do Reformador Primário, formando óxidos de carbono, água e calor. A mistura gasosa então passa por leito catalítico a base de níquel, havendo novamente conversão de metano em gás de síntese, mandado ao Conversor de Shift (SARTORE, 2014).

A etapa de Shift é feita em dois estágios, pois a reação da Equação 4.4 é favorecida em relação a formação de produtos em baixas temperaturas, embora sejam necessárias altas temperaturas para atingir altas taxas de reação. Desta forma, utiliza-se primeiro um conversor de shift de alta temperatura (HTS), com promotores de cobre com catalisadores de ferro, onde a maior parte do monóxido de carbono é convertido. Na sua saída, os gases são resfriados e então introduzidos no conversor de shift de baixa temperatura (LTS), com catalisadores de cobre/zinco. Após esta etapa, quase todo o monóxido de carbono originalmente presente na corrente está convertido a CO₂ (SARTORE, 2014).

A remoção de CO₂ ocorre em uma absorvedora que utiliza amina ativada em contracorrente, e, após a lavagem do gás, este passa por um vaso de *knock-out* para retirada de amina que possa ainda estar na corrente (SARTORE, 2014).

Na etapa de metanação, os gases CO e CO₂ remanescentes na corrente entram em contato com catalisadores a base de níquel do metanador e reagem com hidrogênio para a formação de metano e água, conforme as Equações 4.5 e 4.6 (SARTORE, 2014).



A secagem do gás de síntese é feita através da sua passagem por peneiras moleculares, que operam alternadamente, de forma que enquanto uma é usada para a remoção de água do gás de síntese, a outra é regenerada. A corrente efluente das peneiras passa por trocadores de calor, onde ocorre a remoção de metano e argônio do gás de síntese (SARTORE, 2014).

A síntese da amônia ocorre conforme equação 4.7, no reator de síntese, de leito fixo com catalisadores a base de ferro (SARTORE, 2014).



A amônia formada é então refrigerada e separada em um separador de amônia dos gases não reagidos e dos gases inertes, que são reciclados ao processo. Esta sequência de síntese, separação e reciclo constitui o loop de síntese. A amônia separada é expandida e resfriada, e segue líquida para armazenamento em tanques pulmão (SCHMITS, RENIERS e SWUSTE, 2021). Um fluxograma simplificado do processo é apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Fluxograma simplificado do processo.

Material	λ_s ($J s^{-1} m^{-1} K^{-1}$)	ρ_s ($kg m^{-3}$)	$C_{n,s}$ ($J kg^{-1} K^{-1}$)	a_s ($m^2 s^{-1}$)
isolation concrete	0.207	900	920	2.5×10^{-7}
light concrete	0.418	1800	920	2.5×10^{-7}
heavy concrete	1.3	2400	920	5.9×10^{-7}
clinkers	0.7	2000	836	4.2×10^{-7}
average subsoil 8 wt% moist	0.9	2500	836	4.3×10^{-7}
dry sandy subsoil	0.3	1600	799	2.0×10^{-7}
wet sand 8 wt% moist/clay	0.6	1940	937	3.3×10^{-7}
wood	0.2	550	2300	1.6×10^{-7}
gravel	2.5	2000	1140	11.0×10^{-7}
carbon steel	46.0	7840	460	128.0×10^{-7}

Fonte: adaptado de (SCHMITS, RENIERS e SWUSTE, 2021).

4.1 OS PERIGOS ASSOCIADOS A SÍNTESE DE AMÔNIA

Conforme levantado no Capítulo 2, os perigos de um processo advêm das características perigosas das substâncias envolvidas, como toxicidade e inflamabilidade, e da energia deste processo, sua temperatura e pressão.

Neste trabalho, as hipóteses acidentais foram avaliadas tanto na fase qualitativa como quantitativa primariamente em função das propriedades perigosas das substâncias do processo. As condições de temperatura e pressão foram consideradas de forma indireta, de acordo com sua influência sobre os materiais perigosos liberados, como, por exemplo, na maior intensidade

de vazamento consequente de uma maior pressão de operação. No processo de síntese de amônia, as seguintes substâncias estão presentes em grandes quantidades: metano, dióxido de carbono, monóxido de carbono, gás hidrogênio, gás nitrogênio, água e amônia (SCHMITS, RENIERS e SWUSTE, 2021).

Tanto o dióxido de carbono (CETESB, 2016b) como o gás nitrogênio (CETESB, 2016f) são gases não-inflamáveis e não tóxicos. A água, evidentemente, também não possui propriedades perigosas. Assim, essas substâncias não foram consideradas como perigosas para a análise de riscos. Ademais, quando essas substâncias inertes estão presentes em grandes quantidades na mistura liberada, as consequências relacionadas a outras substâncias são efetivamente mitigadas (SCHMITS, RENIERS e SWUSTE, 2021), diminuindo a severidade destes vazamentos.

Tanto o metano (CETESB, 2016d) como o gás hidrogênio (CETESB, 2016c) são gases inflamáveis, e nenhum deles possui características tóxicas. A amônia é um gás tóxico e corrosivo (CETESB, 2016a). Embora também seja inflamável, essa característica não é tão perigosa quanto sua toxicidade ou a inflamabilidade de outros gases, devido à sua alta temperatura de autoignição e sua faixa de inflamabilidade restrita (limites inferior e superior de inflamabilidade muito próximos) (CHUNG, LEE, *et al.*, 2022). O monóxido de carbono é considerado um gás tóxico e inflamável (CETESB, 2016e).

Desta forma, foram considerados relevantes para a análise de risco os perigos advindos da inflamabilidade do metano, do hidrogênio e do monóxido de carbono, e da toxicidade da amônia e do monóxido de carbono. Suas quantidades em cada equipamento também são relevantes, especificamente substâncias cuja fração molar na mistura vazada foi muito baixa, menor ou igual a 0,01, não foram consideradas perigosas nesses vazamentos (TNO, 1999).

4.2 PLANTA ESTUDADA

Neste trabalho, a planta estudada teve seus equipamentos e suas condições de processo baseados no artigo “*Realistic ranking of dangerous process equipment Ammonia Production*” (SCHMITS, RENIERS e SWUSTE, 2021). Este artigo foi elaborado com o objetivo de disponibilizar para a OCI Nitrogen, uma planta de fertilizantes do grupo OCI localizada em Geleen, nos Países Baixos (CHEMELOT, 2023), uma lista dos equipamentos mais perigosos envolvidos no seu processo de produção de amônia (SCHMITS, RENIERS e SWUSTE, 2021).

Para isso, foram avaliados os equipamentos de processo mais relevantes na síntese de amônia, selecionados de acordo com a opinião e experiência de colaboradores da OCI Nitrogen, considerando os equipamentos mais reconhecíveis do processo como um todo. A listagem

inclui os nomes dos equipamentos, suas condições de temperatura e pressão manométrica, a composição molar do gás nesses equipamentos, e a massa de amônia gasosa e líquida nesses equipamentos (SCHMITS, RENIERS e SWUSTE, 2021).

Esta listagem foi adaptada no item 4.2.1, e serviu de base para a elaboração da APR, que considerou perdas de contenção nesses equipamentos, e em suas tubulações associadas. Como não há informações específicas para as tubulações associadas a estes equipamentos, foram utilizadas as seguintes premissas:

- Para cada equipamento listado, foi avaliado também um seguimento de tubulação subsequente a este, exceto para compressores e bombas, que já são avaliados como vazamentos em uma tubulação, como levantado no item 2.3.2.2;
- Conservativamente, considerou-se que todas as tubulações se conectam aos seus respectivos equipamentos na base, de forma a maximizar a quantidade de material vazado;
- Considerou-se que não há diferença de altura entre o início das tubulações e seus respectivos pontos de vazamento;
- Como as frequências para perda de contenção em tubulações apresentadas na Tabela 2.5 consideram a falha de conexões e válvulas, elas assumem um comprimento mínimo de 10 metros (NATIONAL INSTITUTE OF PUBLIC HEALTH AND ENVIRONMENT - RIVM, 2009). Considerou-se, portanto, que este é o comprimento de todas as tubulações avaliadas, e que a perda de contenção ocorre em seus pontos médios, a 5 metros do equipamento associado;
- Ainda de acordo com a Tabela 2.5, quanto maior o diâmetro de uma tubulação, menor sua frequência de falha. Por outro lado, conforme Equação 3.6, quanto maior a área transversal de uma tubulação, maior a vazão mássica que escoar por ela e pelo orifício do vazamento. De forma conservativa, considerou-se que todas as tubulações avaliadas tinham o diâmetro máximo da categoria de frequência intermediária da Tabela 2.5, 150 milímetros;
- A rugosidade média da tubulação influencia o fator de atrito f_D (TNO, 1996). O *Yellow Book* apresenta três rugosidades típicas de materiais comumente usados em tubulações, uma rugosidade para bronze, chumbo e vidro, outra para ferro fundido e outra para aço comercial e ferro forjado. Considerou-se que todas as tubulações avaliadas são de aço comercial, cuja rugosidade média é de 0,045 milímetros (TNO, 1996).

O material do chão da planta é importante, pois, conforme discutido no Capítulo 3, a taxa de transferência de calor para poças líquidas é produto do calor advindo tanto do ar como do solo. Dentre as opções disponíveis no *software Effects 12*, apresentadas na Figura 4.2, considerou-se mais adequado para uma planta de síntese o concreto, e, portanto, foi utilizado nas simulações o material *Heavy concrete*, concreto pesado. A massa específica de 2.400 kg/m³ é, de acordo com Rodrigues et al. (Propriedades de um concreto leve estrutural com incorporação de argila expandida e resíduo de granito, 2022), típica do concreto convencional, o mais utilizado na construção civil.

Figura 4.2 – Materiais disponíveis no *Effects 12* para caracterização do solo.

Material	λ_s (J s ⁻¹ m ⁻¹ K ⁻¹)	ρ_s (kg m ⁻³)	$C_{n,s}$ (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	a_s (m ² s ⁻¹)
isolation concrete	0.207	900	920	2.5×10^{-7}
light concrete	0.418	1800	920	2.5×10^{-7}
heavy concrete	1.3	2400	920	5.9×10^{-7}
clinkers	0.7	2000	836	4.2×10^{-7}
average subsoil 8 wt% moist	0.9	2500	836	4.3×10^{-7}
dry sandy subsoil	0.3	1600	799	2.0×10^{-7}
wet sand 8 wt% moist/clay	0.6	1940	937	3.3×10^{-7}
wood	0.2	550	2300	1.6×10^{-7}
gravel	2.5	2000	1140	11.0×10^{-7}
carbon steel	46.0	7840	460	128.0×10^{-7}

Fonte: (TNO, 1999).

De acordo com Schmits, Reniers e Swuste (2021), o tempo de resposta, e, portanto, o tempo máximo para vazamentos, da planta analisada é de 5 minutos. Neste trabalho, foi conservativamente considerado um tempo máximo de vazamento de 10 minutos, conforme recomendado pelo *Purple Book* (TNO, 1999).

4.2.1 Principais equipamentos, suas dimensões e suas condições de operação

Os equipamentos selecionados como aqueles de maior perigo por Schmits, Reniers e Swuste (Determining a realistic ranking of the most dangerous process equipment of the ammonia production process: A practical approach, 2021), e, portanto, que foram avaliados na Análise Preliminar de Risco, estão apresentados na Tabela 4.1. Equipamentos onde ocorre troca de calor entre dois fluxos foram separados como dois equipamentos, um lado casco (SS – *Shell Side*) e outro lado tubo (TS – *Tube Side*).

Tabela 4.1 – Equipamentos avaliados na APR.

Equipamento	Pressão (bar g)	Temperatura (°C)	Composição (mol%)							NH ₃ gasoso (kg)	NH ₃ líquido (kg)
			CH ₄	CO ₂	CO	H ₂	N ₂	H ₂ O	NH ₃		
Dessulfurização	38	320	83,8	1,4	0	3,5	4	0			
Reformador Primário (TS)	38	800	11,9	3,6	28	21,2	0,8	59,1			
Reformador Secundário	37	950	2,7	4,9	7,1	32,5	14,6	37,1			
Caldeira de calor residual do gás	37	620	0,2	4,9	10,1	35,2	14,2	37,1			
Shift de Alta Temperatura	35	360	0,2	8,0	6,1	38,3	14,2	34,0			
Shift de Baixa Temperatura	33,5	240	0,2	12,0	1,1	42,3	14,2	30,0			
Absorção de CO ₂	31,7	-1	0,2	10,1	0,3	67,1	22,0	0			
Separador do efluente de absorção de CO ₂	31	-1	0,3	0,1	0,3	74,6	24,4	0			
Metanação	30	270	0,5	0,1	0,1	74,2	24,5	0,3			
Resfriador do gás de síntese (SS)	30	30	0,7	0	0	73,9	24,6	0,5			
Compressor do gás de síntese	200	40	0,7	0	0	73,9	24,6	0,5			
Peneiras moleculares	72	5	0,7	0	0	73,9	24,6	0,5			
Trocador de calor de gás de síntese (TS)	200	31	9,5			57,5	21,5		8,5	8.500	
Reator de Síntese	200	450	9,5			57,5	21,5		8,5	8.500	
Caldeira de calor residual do loop de síntese (TS)	200	300	9,5			57,5	21,5		8,5	8.500	
Trocador de calor de gás de síntese (SS)	200	175	9,5			57,5	21,5		8,5	8.500	
Resfriador do efluente de síntese de NH ₃ (TS)	200	-25	9,5			57,5	21,5		8,5	8.500	
Separador de amônia	200	-25	9,5			57,5	21,5		8,5	8.500	1.500
Vaso de expansão de NH ₃	18	-22	23,5			42,3	15,8		11,1		2.300
Resfriador do efluente de síntese de NH ₃ A (SS)	5,2	10									5.650
Resfriador do efluente de síntese de NH ₃ B (SS)	2,3	-7									4.600
Resfriador do efluente de síntese de NH ₃ C (SS)	0,8	-21									4.200
Resfriador do efluente de síntese de NH ₃ D (SS)	0,1	-32									2.200
Compressor de NH ₃	9,3	105									
Condensador de NH ₃	9	25									5
Vaso coletor de NH ₃	9	25									2.200
Bomba de produto de NH ₃	17	10									3.700
Tanque pulmão de NH ₃	16	10									32.200

Fonte: adaptado de (SCHMITS, RENIERS e SWUSTE, 2021)

A Tabela 4.2 apresenta a altura de cada equipamento e, portanto, a altura em que ocorrem os vazamentos, dado que estes foram conservativamente considerados na base de cada equipamento.

Tabela 4.2 – Altura dos equipamentos da planta.

Equipamento	Altura (metro)
Dessulfurização	3
Reformador Primário (TS)	3
Reformador Secundário	3
Caldeira de calor residual do gás	4
Shift de Alta Temperatura	3
Shift de Baixa Temperatura	3
Absorção de CO ₂	4,5
Separador da absorção de CO ₂	1
Metanação	4
Resfriador do gás de síntese (SS)	2
Compressor do gás de síntese	1
Peneiras moleculares	3
Trocador de calor de gás de síntese (TS)	3
Reator de Síntese	1
Caldeira de calor residual do loop de síntese (TS)	1,5
Trocador de calor de gás de síntese (SS)	3
Resfriador do efluente de síntese de NH ₃ (TS)	3
Separador de amônia	1
Vaso de expansão de amônia	5
Resfriador do efluente de síntese de NH ₃ A (SS)	3
Resfriador do efluente de síntese de NH ₃ B (SS)	3
Resfriador do efluente de síntese de NH ₃ C (SS)	3
Resfriador do efluente de síntese de NH ₃ D (SS)	3
Compressor de amônia	1
Condensador de amônia	9
Vaso coletor de amônia	5
Bomba de produto de amônia	1
Tanque pulmão de amônia	1,5

Fonte: adaptado de (SCHMITS, RENIERS e SWUSTE, 2021)

O artigo de Schmits, Reniers e Swuste (Determining a realistic ranking of the most dangerous process equipment of the ammonia production process: A practical approach, 2021) não traz informações acerca dos inventários a serem vazados de cada equipamento. Esta informação é crucial para a etapa quantitativa de análise de risco, e tem influência sobre as vazões e massas vazadas resultantes das hipóteses acidentais. Na ausência desses inventários no artigo usado de base para a planta, os inventários dos equipamentos que foram analisados quantitativamente foram estimados da seguinte maneira:

- para vazamentos líquidos, o inventário utilizado foi igual à massa de amônia líquida presente no equipamento de acordo com a Tabela 4.1;
- para vazamentos gasosos com presença de amônia, o inventário total foi obtido através da massa de amônia gasosa e das frações molares presentes na Tabela 4.1. Com a massa de amônia gasosa, sua fração molar e sua massa molar, é possível obter o total de mols no equipamento, e com as massas molares dos outros componentes, o inventário mássico total do equipamento. A partir desta massa, o *Effects* foi usado para calcular o volume do inventário;
- para vazamentos gasosos sem a presença de amônia, não foi possível estimar o inventário a ser vazado. Desta forma, foi conservativamente considerado que esses equipamentos possuíam inventário igual ao Reator de Síntese, que possui o maior dos inventários estimados.

Os inventários obtidos estão apresentados na Tabela 4.3. Os compressores foram avaliados considerando o inventário dos equipamentos a sua montante, já que são simulados como rupturas em tubulações.

Tabela 4.3 – Inventários a serem vazados dos equipamentos da planta.

Equipamento	Inventário gasoso (m ³)	Inventário líquido (kg)
Dessulfurização	800,07	-
Absorção de CO ₂	800,07	-
Separador da absorção de CO ₂	800,07	-
Metanação	800,07	-
Resfriador do gás de síntese (SS)	800,07	-
Compressor do gás de síntese	800,07	-
Peneiras moleculares	800,07	-
Trocador de calor de gás de síntese (TS)	289,47	-
Reator de Síntese	800,07	-
Caldeira de calor residual do loop de síntese (TS)	634,11	-
Trocador de calor de gás de síntese (SS)	495,82	-
Resfriador do efluente de síntese de NH ₃ (TS)	159,71	-
Separador de amônia	159,71	1.500
Vaso de expansão de amônia	-	2.300
Resfriador do efluente de síntese de NH ₃ A (SS)	-	5.650
Resfriador do efluente de síntese de NH ₃ B (SS)	-	4.600
Resfriador do efluente de síntese de NH ₃ C (SS)	-	4.200
Resfriador do efluente de síntese de NH ₃ D (SS)	-	2.200
Compressor de amônia	-	2.200
Condensador de amônia	-	5
Vaso coletor de amônia	-	2.200
Bomba de produto de amônia	-	3.700
Tanque pulmão de amônia	-	32.200

Fonte: adaptado de (SCHMITS, RENIERS e SWUSTE, 2021)

Os demais equipamentos não tiveram seus inventários estimados, pois não foram considerados na análise quantitativa, conforme exposto no Capítulo 5. A escolha de considerar o maior inventário estimado em todo o processo para os equipamentos em que não foi possível estimá-lo diminui a precisão dos resultados, acarretando maior magnitude e piores consequências do que a realidade. Entretanto, esta escolha viabiliza a análise quantitativa destes equipamentos, que desconsiderados levariam também à imprecisão, subestimando os riscos associados ao processo.

Devido ao desconhecimento acerca do arranjo dos equipamentos, para a análise de risco considerou-se que eles se localizam todos no centro da planta de síntese.

4.2.2 Localização e População Extramuros

A área da planta OCI Nitrogen foi estimada em aproximadamente 243.287 metros quadrados, conforme perímetro delineado em vermelho na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Perímetro da OCI Nitrogen.



Fonte: (GOOGLE, 2020)

Para a planta estudada nesse trabalho, uma área aproximadamente igual foi delimitada em um espaço desocupado em um distrito industrial brasileiro, a fim de permitir a utilização do método de estimativa populacional exposto no item 2.3.3. Esta área é apresentada na Figura 4.4

Figura 4.4 – Área da planta estudada.



Fonte: (GOOGLE, 2023)

Foi avaliado que o comprimento de rugosidade de superfície do entorno da planta é igual a 1,0 metro, relacionado a presença de árvores e de casas baixas, conforme Tabela 3.5.

A partir do centro do perímetro desenhado para a planta, todos os cenários acidentais cujos alcances de 1% superaram 164 metros ultrapassaram os limites do empreendimento e foram, portanto, avaliados nos cálculos de risco individual e social.

A população extramuro afetada consiste nos setores censitários apresentados na Tabela 4.4 e na Figura 4.5, e nos estabelecimentos apresentados na Tabela 4.5 e na Figura 4.6.

Tabela 4.4 – Setores censitários próximos à planta de síntese de amônia.

Setor	População
1	626
2	537
3	714
4	460
5	598
6	602

Fonte: (IBGE, 2010)

Figura 4.5 – Setores censitários próximos à planta de síntese de amônia.



Fonte: (GOOGLE, 2023)

Tabela 4.5 – Estabelecimentos próximos à planta de síntese de amônia.

Estabelecimento	População estimada
Centro Religioso A	50
Centro Religioso B	50
Fábrica A	300
Fábrica B	400
Fábrica C	500

Fonte: elaboração própria

Figura 4.6 – Estabelecimentos próximos à planta de síntese de amônia.



Fonte: (GOOGLE, 2023)

Para os estabelecimentos, considerou-se uma população 100% abrigada. Os centros religiosos tiveram população estimada como presente durante 1 hora por dia, 7 dias por semana, com população completamente ausente durante a noite. As fábricas tiveram população estimada como presente durante 8 horas por dia e 8 horas por noite, 6 dias por semana, com uma população 20% menor durante a noite, conforme item 2.3.3.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE PRELIMINAR DE RISCOS

A APR desenvolvida para a planta de síntese de amônia estudada está apresentada no Apêndice A. A partir dela, foi construída a matriz de risco da Figura 5.1, com a contagem das notas e classificação de risco de todas as Hipóteses Acidentais. As classificações de risco são, do canto inferior-esquerdo ao superior direito, A, B, C, D e E, conforme Tabela 2.4.

Figura 5.1 – Matriz de risco da planta de síntese de amônia.

Probabilidade	5	2	17	0	0	0
	4	9	0	13	0	3
	3	11	36	13	28	26
	2	0	9	2	14	13
	1	0	0	0	0	0
		1	2	3	4	5
		Consequência				

Fonte: elaboração própria.

A APR resultou em um total de 196 Hipóteses Acidentais, divididas em 14 sistemas, separados de acordo os diferentes processos que ocorrem ao longo da síntese. Esses sistemas são:

1. Dessulfurização;
2. Reforma Primária;
3. Reforma Secundária;
4. Shift de alta temperatura;
5. Shift de baixa temperatura;
6. Remoção de CO₂;

7. Metanação;
8. Secagem do gás de síntese;
9. Síntese da amônia;
10. Resfriamento/Condensação;
11. Separação de amônia;
12. Expansão da amônia;
13. Sistema de resfriamento da amônia;
14. Tanque-pulmão.

Das 196 HAs, 70 apresentaram classificação de risco D ou E, e foram então selecionadas para serem avaliadas quantitativamente. Os sistemas 2, 3, 4 e 5 não apresentaram nenhuma hipótese acidental selecionada, e isso se deve ao fato de que suas categorizações de severidade foram mais baixas em relação aos outros sistemas, devido à grande presença de gases inertes na composição de seus inventários.

Somente três hipóteses apresentaram a categoria de risco mais alta, E, e foram elas as hipóteses 052, 124 e 136, todas relacionadas à ruptura catastrófica de compressores ou bombas. A ruptura desses equipamentos recebeu notas de frequência mais altas que a de outros equipamentos, devido a maior frequência de falha associada a eles.

Embora o vaso de expansão de amônia apresente composição gasosa, conforme Tabela 4.1, as HAs de grande vazamento de mistura gasosa nesse vaso (HAs 094a, 094b, 095a, 095b, 097a e 097b) não apresentaram categoria de risco elevada, pois a severidade de suas consequências foi avaliada como baixa. Isso se deu, pois o inventário de gás presente no equipamento é desprezível, conforme Tabela 4.3.

As Hipóteses Acidentais selecionadas para serem avaliadas quantitativamente estão apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Hipóteses Acidentais avaliadas quantitativamente.

Sistema	Hipóteses Acidentais
1	002, 003, 005
6	032, 033, 035, 037, 038, 040
7	042, 043, 045, 047, 048
8	054, 055, 057
9	059a, 059b, 060a, 060b, 064a, 064b, 065a, 065b, 067a, 067b
10	069a, 069b, 070a, 070b, 074a, 074b, 075a, 075b, 079a, 079b, 080a, 080b
11	084a, 084b, 085a, 085b, 087a, 087b, 089, 090, 092
12	099, 100, 102
13	104, 105, 109, 110, 114, 115, 119, 120, 126, 127, 131, 132, 134
14	138, 139, 141

Fonte: elaboração própria

Desta forma, os seguintes equipamentos não tiveram nenhuma hipótese selecionada, considerando-se assim que seus riscos são toleráveis para a população extramuros.

- Reformador Primário (TS);
- Reformador Secundário;
- Caldeira de calor residual do gás;
- Reator de Shift de alta temperatura;
- Reator de Shift de baixa temperatura.

5.2 ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCOS

As vazões efluentes e os alcances de letalidade das Hipóteses Acidentais cujos efeitos físicos foram simulados estão nas Tabelas 5.2 a 5.24. Nos casos em que houve diferença entre os efeitos diurno e noturno, estão apresentados os maiores alcances de letalidade dentre os dois. Para as tipologias explosão de nuvem, jato de fogo e dispersão tóxica, os alcances apresentados são relativos a 1% de letalidade. Para incêndios em nuvem, os alcances apresentados são relativos a 100% de letalidade, devido a natureza desta tipologia, conforme explicado no item 3.4.2.

Tabela 5.2 – Resultados das simulações de efeitos físicos do reator de dessulfurização.

Hipótese Acidental	Consequência	
002	Vazão efluente	17,167 kg/s
	Incêndio em nuvem	17 m
	Explosão em nuvem	13 m
	Jato de fogo	72 m
003	Massa vazada	10.310 kg
	Incêndio em nuvem	84 m
	Explosão em nuvem	74 m
	Bola de fogo	121 m
005	Vazão efluente	60,834 kg/s
	Incêndio em nuvem	48 m
	Explosão em nuvem	31 m
	Jato de fogo	128 m

Fonte: elaboração própria

Tabela 5.3 – Resultados das simulações de efeitos físicos do absorvedor de CO₂.

Hipótese Acidental	Consequência	
032	Vazão efluente	22,92 kg/s
	Incêndio em nuvem	30 m
	Explosão em nuvem	21 m
	Jato de fogo	76 m
033	Massa vazada	13.742 kg
	Incêndio em nuvem	86 m
	Explosão em nuvem	82 m
	Bola de fogo	59 m
035	Vazão efluente	66,934 kg/s
	Incêndio em nuvem	78 m
	Explosão em nuvem	43 m
	Jato de fogo	124 m

Fonte: elaboração própria

Tabela 5.4 – Resultados das simulações de efeitos físicos do separador do efluente de absorção de CO₂.

Hipótese Acidental	Consequência	
037	Vazão efluente	15,457 kg/s
	Incêndio em nuvem	4 m
	Explosão em nuvem	4 m
038	Jato de fogo	80 m
	Massa vazada	9.265,9 kg
	Incêndio em nuvem	0 m
	Explosão em nuvem	0 m
040	Bola de fogo	74 m
	Vazão efluente	54,552 kg/s
	Incêndio em nuvem	4 m
	Explosão em nuvem	5 m
	Jato de fogo	142 m

Fonte: elaboração própria

Tabela 5.5 – Resultados das simulações de efeitos físicos do reator de metanação.

Hipótese Acidental	Consequência	
042	Vazão efluente	7,5115 kg/s
	Incêndio em nuvem	17 m
	Explosão em nuvem	12 m
	Jato de fogo	45 m
043	Massa vazada	4.510,8 kg
	Incêndio em nuvem	0 m
	Explosão em nuvem	0 m
	Bola de fogo	49 m
045	Vazão efluente	37,332 kg/s
	Incêndio em nuvem	17 m
	Explosão em nuvem	14 m
	Jato de fogo	94 m

Fonte: elaboração própria

Tabela 5.6 – Resultados das simulações de efeitos físicos do resfriador de gás de síntese (SS).

Hipótese Acidental	Consequência	
047	Vazão efluente	13,603 kg/s
	Incêndio em nuvem	9 m
	Explosão em nuvem	7 m
	Jato de fogo	68 m
048	Massa vazada	8.155,1 kg
	Incêndio em nuvem	0 m
	Explosão em nuvem	0 m
	Bola de fogo	69 m

Fonte: elaboração própria

Tabela 5.7 – Resultados das simulações de efeitos físicos do compressor do gás de síntese.

Hipótese Acidental	Consequência	
052	Vazão efluente	325,23 kg/s
	Incêndio em nuvem	4 m
	Explosão em nuvem	5 m
	Jato de fogo	304 m

Fonte: elaboração própria

Tabela 5.8 – Resultados das simulações de efeitos físicos da peneira molecular.

Hipótese Acidental	Consequência	
054	Vazão efluente	35,739 kg/s
	Incêndio em nuvem	13 m
	Explosão em nuvem	11 m
	Jato de fogo	0 m
055	Massa vazada	21.459 kg
	Incêndio em nuvem	0 m
	Explosão em nuvem	0 m
	Bola de fogo	109 m
057	Vazão efluente	125,93 kg/s
	Incêndio em nuvem	13 m
	Explosão em nuvem	12 m
	Jato de fogo	0 m

Fonte: elaboração própria

Tabela 5.9 – Resultados das simulações de efeitos físicos do trocador de calor de gás de síntese (TS).

Hipótese Acidental	Consequência	
059a	Vazão efluente	46,294 kg/s
	Incêndio em nuvem	80 m
	Explosão em nuvem	50 m
	Jato de fogo	113 m
059b	Vazão efluente	46,294 kg/s
	Dispersão tóxica	97 m
060a	Massa vazada	27.790 kg
	Incêndio em nuvem	110 m
	Explosão em nuvem	111 m
	Bola de fogo	131 m
060b	Massa vazada	27.790 kg
	Dispersão tóxica	129 m

Fonte: elaboração própria

Tabela 5.10 – Resultados das simulações de efeitos físicos do reator de síntese.

Hipótese Acidental	Consequência	
064a	Vazão efluente	46,287 kg/s
	Incêndio em nuvem	99 m
	Explosão em nuvem	61 m
	Jato de fogo	117 m
064b	Vazão efluente	46,287 kg/s
	Dispersão tóxica	106 m
065a	Massa vazada	27.790 kg
	Incêndio em nuvem	132 m
	Explosão em nuvem	134 m
	Bola de fogo	131 m
065b	Massa vazada	27.790 kg
	Dispersão tóxica	133 m
067a	Vazão efluente	175,72 kg/s
	Incêndio em nuvem	198 m
	Explosão em nuvem	130 m
	Jato de fogo	216 m
067b	Vazão efluente	175,72 kg/s
	Dispersão tóxica	147 m

Fonte: elaboração própria

Tabela 5.11 – Resultados das simulações de efeitos físicos da caldeira de calor residual do loop de síntese (TS).

Hipótese Acidental	Consequência	
069a	Vazão efluente	46,289 kg/s
	Incêndio em nuvem	84 m
	Explosão em nuvem	53 m
	Jato de fogo	114 m
069b	Vazão efluente	46,289 kg/s
	Dispersão tóxica	103 m
070a	Massa vazada	27.790 kg
	Incêndio em nuvem	131 m
	Explosão em nuvem	113 m
	Bola de fogo	132 m
070b	Massa vazada	27.790 kg
	Dispersão tóxica	105 m

Fonte: elaboração própria

Tabela 5.12 – Resultados das simulações de efeitos físicos do trocador de calor de gás de síntese (SS).

Hipótese Acidental	Consequência	
074a	Vazão efluente	46,347 kg/s
	Incêndio em nuvem	66 m
	Explosão em nuvem	41 m
	Jato de fogo	108 m
074b	Vazão efluente	46,347 kg/s
	Dispersão tóxica	83 m
075a	Massa vazada	27.790 kg
	Incêndio em nuvem	111 m
	Explosão em nuvem	110 m
	Bola de fogo	131 m
075b	Massa vazada	27.790 kg
	Dispersão tóxica	110 m

Fonte: elaboração própria

Tabela 5.13 – Resultados das simulações de efeitos físicos do resfriador do efluente de síntese de NH₃ (TS)

Hipótese Acidental	Consequência	
079a	Vazão efluente	46,273 kg/s
	Incêndio em nuvem	86 m
	Explosão em nuvem	53 m
	Jato de fogo	115 m
079b	Vazão efluente	46,273 kg/s
	Dispersão tóxica	102 m
080a	Massa vazada	27.790 kg
	Incêndio em nuvem	110 m
	Explosão em nuvem	111 m
	Bola de fogo	131 m
080b	Massa vazada	27.790 kg
	Dispersão tóxica	110 m

Fonte: elaboração própria

Tabela 5.14 – Resultados das simulações de efeitos físicos do separador de amônia.

Hipótese Acidental	Consequência	
084a	Vazão efluente	46,273 kg/s
	Incêndio em nuvem	124 m
	Explosão em nuvem	82 m
	Jato de fogo	131 m
084b	Vazão efluente	46,273 kg/s
	Dispersão tóxica	103 m
085a	Massa vazada	27.790 kg
	Incêndio em nuvem	104 m
	Explosão em nuvem	111 m
	Bola de fogo	131 m
085b	Massa vazada	27.790 kg
	Dispersão tóxica	110 m
087a	Vazão efluente	458,42 kg/s
	Incêndio em nuvem	280 m
	Explosão em nuvem	180 m
	Jato de fogo	367 m
087b	Vazão efluente	458,42 kg/s
	Dispersão tóxica	180 m
089	Vazão efluente para o ar	0,10715 kg/s
	Vazão efluente para a poça	2,3939 kg/s
	Dispersão tóxica	36 m
090	Massa vazada para o ar	82,816 kg
	Massa vazada para a poça	1420,4 kg
	Dispersão tóxica	236 m
092	Vazão efluente para o ar	291,05 kg/s
	Vazão efluente para a poça	158,29 kg/s
	Dispersão tóxica	195 m

Fonte: elaboração própria

Tabela 5.15 – Resultados das simulações de efeitos físicos do vaso de expansão de amônia.

Hipótese Acidental	Consequência	
099	Vazão efluente para o ar	0,63024 kg/s
	Vazão efluente para a poça	3,2025 kg/s
	Dispersão tóxica	79 m
100	Massa vazada para o ar	171,86 kg
	Massa vazada para a poça	2128,2 kg
	Dispersão tóxica	277 m
102	Vazão efluente para o ar	30,997 kg/s
	Vazão efluente para a poça	17,535 kg/s
	Dispersão tóxica	209 m

Fonte: elaboração própria

Tabela 5.16 – Resultados das simulações de efeitos físicos do resfriador de efluente de síntese A (SS).

Hipótese Acidental	Consequência	
104	Vazão efluente para o ar	9,4154 kg/s
	Vazão efluente para a poça	0 kg/s
	Dispersão tóxica	195 m
105	Massa vazada para o ar	1887 kg
	Massa vazada para a poça	3763,1 kg
	Dispersão tóxica	209 m

Fonte: elaboração própria

Tabela 5.17 – Resultados das simulações de efeitos físicos do resfriador de efluente de síntese B (SS).

Hipótese Acidental	Consequência	
109	Vazão efluente para o ar	7,6658 kg/s
	Vazão efluente para a poça	0 kg/s
	Dispersão tóxica	175 m
110	Massa vazada para o ar	797,17 kg
	Massa vazada para a poça	3802,8 kg
	Dispersão tóxica	368 m

Fonte: elaboração própria

Tabela 5.18 – Resultados das simulações de efeitos físicos do resfriador de efluente de síntese C (SS).

Hipótese Acidental	Consequência	
114	Vazão efluente para o ar	1,1399 kg/s
	Vazão efluente para a poça	6,5135 kg/s
	Dispersão tóxica	109 m
115	Massa vazada para o ar	373,82 kg
	Massa vazada para a poça	4226,2 kg
	Dispersão tóxica	358 m

Fonte: elaboração própria

Tabela 5.19 – Resultados das simulações de efeitos físicos do resfriador de efluente de síntese D (SS).

Hipótese Acidental	Consequência	
119	Vazão efluente para o ar	0,024432 kg/s
	Vazão efluente para a poça	3,6408 kg/s
	Dispersão tóxica	59 m
120	Massa vazada para o ar	20,553 kg
	Massa vazada para a poça	2179,5 kg
	Dispersão tóxica	266 m

Fonte: elaboração própria

Tabela 5.20 – Resultados das simulações de efeitos físicos do compressor de amônia.

Hipótese Acidental	Consequência	
124	Vazão efluente para o ar	0,33208 kg/s
	Vazão efluente para a poça	53,393 kg/s
	Dispersão tóxica	141 m

Fonte: elaboração própria

Tabela 5.21 – Resultados das simulações de efeitos físicos do condensador de amônia.

Hipótese Acidental	Consequência	
126	Vazão efluente para o ar	0,0083293 kg/s
	Vazão efluente para a poça	0 kg/s
	Dispersão tóxica	0 m
127	Massa vazada para o ar	2,4704 kg
	Massa vazada para a poça	2,5296 kg
	Dispersão tóxica	34 m

Fonte: elaboração própria

Tabela 5.22 – Resultados das simulações de efeitos físicos do vaso coletor de amônia.

Hipótese Acidental	Consequência	
131	Vazão efluente para o ar	3,666 kg/s
	Vazão efluente para a poça	0 kg/s
	Dispersão tóxica	116 m
132	Massa vazada para o ar	1087 kg
	Massa vazada para a poça	1113 kg
	Dispersão tóxica	294 m
134	Vazão efluente para o ar	128,36 kg/s
	Vazão efluente para a poça	0 kg/s
	Dispersão tóxica	274 m

Fonte: elaboração própria

Tabela 5.23 – Resultados das simulações de efeitos físicos da bomba de produto de amônia.

Hipótese Acidental	Consequência	
136	Vazão efluente para o ar	93,048 kg/s
	Vazão efluente para a poça	0 kg/s
	Dispersão tóxica	315 m

Fonte: elaboração própria

Tabela 5.24 – Resultados das simulações de efeitos físicos do tanque pulmão de amônia.

Hipótese Acidental	Consequência	
138	Vazão efluente para o ar	53,572 kg/s
	Vazão efluente para a poça	0 kg/s
	Dispersão tóxica	539 m
139	Massa vazada para o ar	10754 kg
	Massa vazada para a poça	21446 kg
	Dispersão tóxica	793 m
141	Vazão efluente para o ar	96,441 kg/s
	Vazão efluente para a poça	0 kg/s
	Dispersão tóxica	641 m

Fonte: elaboração própria

É possível observar que as tipologias desenvolvidas a partir dos vazamentos de amônia líquida, das Tabelas 5.14 a 5.24, tiveram, em relação às suas massas vazadas, alcances de letalidade mais altos que às aquelas relativas a vazamentos gasosos, das Tabelas 5.3 a 5.14. Mesmo considerando inventários maiores (de 27.790 kg nas HAs 60a a 85, Tabelas 5.9 a 5.14), as dispersões de amônia líquida tiveram consequência mais severas, o que é claro ao comparar as HAs 85b e 90, da Tabela 5.14. Ocorrendo no mesmo equipamento, o separador de amônia, sob mesmas condições, elas resultam em alcance de letalidade da dispersão tóxica 2,15 vezes maior para o vazamento instantâneo de amônia líquida em relação ao vazamento de mistura gasosa, mesmo com uma massa 18,5 vezes menor. Isto possivelmente aconteceu devido à amônia líquida ter sido simulada como uma substância pura, enquanto a mistura gasosa, nesse caso, contém somente 8,5% molar de amônia. Desta forma, os maiores alcances de letalidade ocorreram com dispersões tóxicas a partir de amônia liquefeita.

As consequências mais severas ocorreram todas em hipóteses do mesmo equipamento, o tanque pulmão de amônia, apresentado na Tabela 5.24, que tem o maior inventário de amônia líquida de todo o processo. Os três vazamentos avaliados nesse tanque resultaram também nos três maiores alcances de letalidade.

Os vazamentos de misturas gasosas tiveram alcances próximos quando comparadas, para um mesmo vazamento, as consequências de dispersão tóxica e de tipologias resultantes da inflamabilidade, nas Tabelas 5.3 a 5.14. Em geral, porém, para um mesmo vazamento, a dispersão tóxica tendeu a ter alcances maiores que o incêndio em nuvem e a explosão de nuvem, e menores que o jato ou bola de fogo, como por exemplo na Tabela 5.10. Como o incêndio em nuvem e a explosão de nuvem resultam da formação e dispersão de nuvem inflamável, entende-se que para a dispersão das misturas gasosas analisadas, a toxicidade é mais letal que a inflamabilidade.

Entre o jato e a bola de fogo, os jatos de fogo resultaram em alcances maiores que as bolas de fogo, conforme alcances de todas as Tabelas em que foram apresentadas ambas tipologias, o que pode ser explicado pelas suas maiores durações. Mesmo que bolas de fogo queimem um grande inventário gasoso, a duração destes fenômenos foi menor em todos os casos que 20 segundos, tempo esse utilizado para calcular a dose de radiação para os jatos de fogo. Devido a esta diferença de tempo, os jatos de fogo resultaram em doses maiores e., conseqüentemente, em respostas maiores a estas doses. A pressão do processo teve grande influência sobre as conseqüências dos jatos e bolas de fogo, sendo os equipamentos do loop de síntese, onde a pressão equivale a 200 bar, aqueles com os maiores alcances em relação a essa tipologia.

Os seguintes equipamentos não tiveram nenhuma hipótese acidental cujo alcance ultrapassou os limites da instalação. Assim, eles não contribuem para o risco à população extramuros, e não foram considerados nos cálculos dos Riscos Individual e Social, tendo seus riscos considerados como toleráveis.

- Reator de dessulfurização;
- Reator de absorção de CO₂;
- Separador do efluente de absorção de CO₂;
- Reator de metanação;
- Resfriador de gás de síntese (SS);
- Peneira molecular;
- Trocador de calor do gás de síntese (TS);
- Caldeira de calor residual do loop (TS);
- Trocador de calor do gás de síntese (SS);
- Resfriador do efluente de síntese de NH₃ (TS);
- Compressor de amônia;
- Condensador de amônia.

Os demais equipamentos tiveram as frequências de suas tipologias acidentais calculadas conforme item 2.3.2.3, apresentadas na Tabela 5.25, onde os campos não aplicáveis a cada Hipótese Acidental estão tracejados (-).

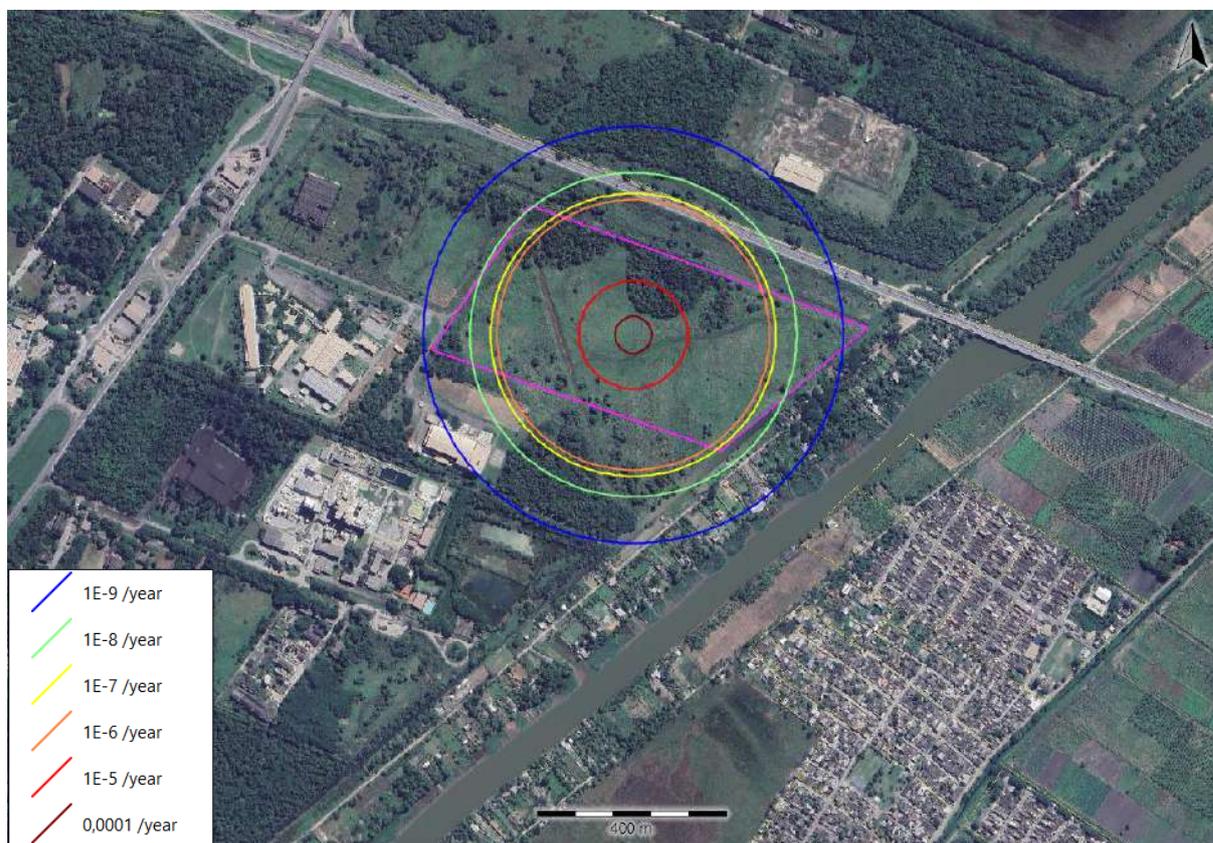
Tabela 5.25 – Cálculo das frequências das tipologias.

HA	Frequência de falha (oc/ano)	p_{ii}	p_{ir}	p_{ce}	Jato/bola de fogo (oc/ano)	Explosão de nuvem (oc/ano)	Incêndio em nuvem (oc/ano)	Dispersão Tóxica (oc/ano)
052	1×10^{-4}	0,7	0,5	0,4	$7,0 \times 10^{-5}$	$6,0 \times 10^{-6}$	$9,0 \times 10^{-6}$	-
064a	5×10^{-6}	0,5	0,5	0,4	$2,5 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-7}$	$7,5 \times 10^{-7}$	-
064b	5×10^{-6}	-	-	-	-	-	-	5×10^{-6}
065a	5×10^{-6}	0,7	0,5	0,4	$3,5 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-7}$	$4,5 \times 10^{-7}$	-
065b	5×10^{-6}	-	-	-	-	-	-	5×10^{-6}
067a	3×10^{-7}	0,7	0,5	0,4	$2,1 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-8}$	$2,7 \times 10^{-8}$	-
067b	3×10^{-7}	-	-	-	-	-	-	3×10^{-7}
084a	5×10^{-6}	0,5	0,5	0,4	$2,5 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-7}$	$7,5 \times 10^{-7}$	-
084b	5×10^{-6}	-	-	-	-	-	-	5×10^{-6}
085a	5×10^{-6}	0,7	0,5	0,4	$3,5 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-7}$	$4,5 \times 10^{-7}$	-
085b	5×10^{-6}	-	-	-	-	-	-	5×10^{-6}
087a	3×10^{-7}	0,7	0,5	0,4	$2,1 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-8}$	$2,7 \times 10^{-8}$	-
087b	3×10^{-7}	-	-	-	-	-	-	3×10^{-7}
089	5×10^{-6}	-	-	-	-	-	-	5×10^{-6}
090	5×10^{-6}	-	-	-	-	-	-	5×10^{-6}
092	3×10^{-7}	-	-	-	-	-	-	3×10^{-7}
099	5×10^{-6}	-	-	-	-	-	-	5×10^{-6}
100	5×10^{-6}	-	-	-	-	-	-	5×10^{-6}
102	3×10^{-7}	-	-	-	-	-	-	3×10^{-7}
104	5×10^{-5}	-	-	-	-	-	-	5×10^{-5}
105	5×10^{-5}	-	-	-	-	-	-	5×10^{-5}
109	5×10^{-5}	-	-	-	-	-	-	5×10^{-5}
110	5×10^{-5}	-	-	-	-	-	-	5×10^{-5}
114	5×10^{-5}	-	-	-	-	-	-	5×10^{-5}
115	5×10^{-5}	-	-	-	-	-	-	5×10^{-5}
119	5×10^{-5}	-	-	-	-	-	-	5×10^{-5}
120	5×10^{-5}	-	-	-	-	-	-	5×10^{-5}
131	5×10^{-6}	-	-	-	-	-	-	5×10^{-6}
132	5×10^{-6}	-	-	-	-	-	-	5×10^{-6}
134	3×10^{-7}	-	-	-	-	-	-	3×10^{-7}
136	1×10^{-4}	-	-	-	-	-	-	1×10^{-4}
138	5×10^{-7}	-	-	-	-	-	-	5×10^{-7}
139	5×10^{-7}	-	-	-	-	-	-	5×10^{-7}
140	3×10^{-7}	-	-	-	-	-	-	3×10^{-7}

Fonte: elaboração própria

O Risco Individual da planta de síntese de amônia, representado por curvas de isorrisco sobre foto de satélite, está apresentado na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Risco Individual da planta de síntese de amônia.



Fonte: elaboração própria através do programa *Riskcurves 12.2.0*

Devido a centralização de todos os equipamentos na planta, e a distribuição uniforme das direções dos ventos, o Risco Individual resultante é radialmente simétrico.

Como é possível ver, os limites da planta estão situados entre as curvas de 1×10^{-5} e 1×10^{-6} . De acordo com os critérios de tolerabilidade estabelecidos no Capítulo 2, isto significa que o RI da instalação está na região de risco a ser reduzido. Desta forma, embora este não seja intolerável, é necessária a tomada de tantas medidas de redução de risco quanto razoável para viabilizar a operação.

Ademais, a curva de isorrisco de valor mais baixo representada, de 1×10^{-9} , atingiu somente as casas esparsas próximas ao distrito industrial e uma das fábricas vizinhas, parcialmente. Isto mostra que, apesar de algumas tipologias terem alcances que chegam até as regiões residenciais dos setores censitários 3 e 4, o risco acumulado do empreendimento se limita à área industrial a que pertence e à sua vizinhança próxima.

O Risco Social da planta de síntese de amônia não pôde ser representado pela curva F-N, pois seu número esperado de vítimas foi menor que 1. O programa *Riskcuves* elabora um ranqueamento das consequências com maior contribuição ao RS, apresentado parcialmente na Figura 5.3.

Figura 5.3 – Contribuições ao Risco Social da planta de síntese de amônia.

Societal Risk ranking to Expected value		
Scenario	Contribution [%]	Value
1. Jet Fire Set through pipe (09. Reator de Síntese)	0	0,00E+00
2. Dispersion - Explosive Mass with ME through pipe (09. Reator de Síntese)	0	0,00E+00
3. Dispersion - Toxic Dose Set through pipe (09. Reator de Síntese)	0	0,00E+00
4. Dispersion - Explosive Mass with ME gas in 10 minutes (13. Separador de amônia)	0	0,00E+00
5. Dispersion - Toxic Dose Set gas in 10 minutes (13. Separador de amônia)	0	0,00E+00

Fonte: elaboração própria através do programa *Riskcurves 12.2.0*

Nenhuma tipologia apresentou o valor de Risco Social necessário para ser contabilizado pelo programa. Desta forma, o Risco Social da planta é tolerável.

Pode-se entender que a razão para um RS muito baixo é a localização da planta dentro do distrito industrial. Este local é separado dos setores mais densamente populadas por um corpo hídrico, além de duas faixas de baixa presença de casas de cada lado deste, o que resulta em número muito baixo de pessoas sujeitas às consequências de um acidente na planta. A faixa de casas esparsas afetada tem muitas poucas pessoas, e, portanto, não pode contribuir significativamente com o número esperado de vítimas. Já a Fábrica A, por ter sua população completamente abrigada, e presente somente em uma fração do tempo, também acaba por ter baixa influência no Risco Social.

Dado um Risco Individual a ser reduzido, e um Risco Social tolerável, a situação da planta de síntese de amônia estudada é de risco a ser reduzido.

Como as frequências padrão utilizadas assumem um bom padrão de gerenciamento de risco e a tomada de medidas suficientes contra todos os mecanismos de falha, entende-se que não seria viável reduzir significativamente as frequências de ocorrência das tipologias. Por outro lado, neste trabalho, nenhum fator de mitigação foi considerado nas simulações das consequências.

Como as consequências de maior severidade foram as dispersões tóxicas a partir da perda de contenção de amônia líquida, medidas que podem implementar fatores de mitigação específicos a esses casos são sistemas para impedir ou diminuir a formação de poças, por exemplo: ralos, bocas de lobo, grelhas e contenções secundárias como diques de contenção.⁷

Fatores de mitigação para dispersões tóxicas, independente do vazamento analisado, são aqueles que agiriam sobre a concentração ou o tempo de exposição das populações afetadas, como procedimentos para organização de evacuação ou coordenação do fechamento/abertura de portas e janelas por parte da população, conforme momento de passagem da nuvem tóxica nesses ambientes.

Embora tenham menor severidade, as consequências relacionadas a inflamabilidade das misturas gasosas vazadas, especialmente os jatos e bolas de fogo, podem ser mitigadas através de barreiras físicas resistentes ao fogo, que impeçam a passagem da chama, diminuindo assim sua área irradiante.

Por fim, ao longo do desenvolvimento do trabalho foram feitas suposições quando em relação à pontos sobre os quais não foi possível obter informações. Na maioria destas suposições, tomou-se uma abordagem conservativa, e assim, embora os riscos calculados possam não corresponder a um cenário real de operação de uma planta similar à analisada, é razoável assumir que o risco real seria menor, mais próximo a tolerabilidade.

Todavia, duas suposições, feitas conforme recomendação da literatura, que podem ter minimizado o risco calculado em relação ao risco real de uma planta similar à analisada foram a distribuição uniforme das direções do vento e a relação sobrepressão-letalidade das explosões de nuvem de vapor. Para distribuições não uniformes dos ventos, as dispersões tóxicas poderiam ter ocasionado maior risco social, atingissem elas maior população, enquanto que as explosões em nuvem de vapor, tivessem sua letalidade calculada de outra forma, poderiam ter seus alcances maiores.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Partindo do objetivo de desenvolver um Estudo de Análise de Risco de uma planta de síntese de amônia que utiliza o processo Haber-Bosch, foram realizadas análises qualitativa e quantitativa. Em termos qualitativos, foram identificados os maiores riscos nos seguintes sistemas selecionados para a análise quantitativa:

- Dessulfurização;
- Remoção de CO₂;
- Metanação;
- Secagem do gás de síntese;
- Síntese da amônia;
- Resfriamento/Condensação;
- Separação de amônia;
- Expansão da amônia;
- Sistema de resfriamento da amônia;
- Tanque-pulmão.

Em termos quantitativos, foi identificado que os maiores riscos se concentram nos equipamentos sujeitos ao vazamento de amônia liquefeita. Dado isso, foram levantados fatores de mitigação que poderiam agir sobre as consequências dos processos de síntese, especialmente a dispersão tóxica de amônia.

Ao fim da análise quantitativa, foi possível concluir que a planta de síntese de amônia analisada possui seu Risco Individual na região de risco a ser reduzido e seu Risco Social tolerável.

Como possibilidades para futuros estudos, seria interessante investigar com maior detalhamento os métodos de falha dos equipamentos responsáveis pelas consequências de maior severidade, e as medidas cabíveis para a redução do risco produto dessas falhas. Seria interessante também realizar análise com menor grau de incerteza, com ventos distribuídos de acordo com análise meteorológica do local, em vez da distribuição uniforme usada.

7 REFERÊNCIAS

AICHE.CCPS. **Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases**. Nova Iorque: AIChE, 1999. ISBN 978-0-8169-0786-1.

AICHE.CCPS. **Guidelines for Risk Based Process Safety**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. ISBN 978-0-470-16569-0.

AICHE.CCPS. **Guidelines for hazard evaluation procedures**. 3ª. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008. ISBN 978-0-471-97815-2.

APPL, M. **The Haber-Bosch Heritage: The Ammonia Production Technology**. Sevilla. 1997.

CARDELLA, B. **Safety at Work and Emergency Control - A Holistic Approach**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2019. ISBN 978-0-429-46312-9.

CETESB. **Risco de Acidente de Origem Tecnológica - Método para decisão e termos de referência**. São Paulo. 2014.

CETESB. Ficha de Resposta a Emergência - Amônia, Anidra. **Produtos Químicos**, 2016a. Disponível em: <<https://produtosquimicos.cetesb.sp.gov.br/ficha/produto/3>>. Acesso em: 19 Novembro 2023.

CETESB. Ficha de Resposta a Emergência Química - Dióxido de Carbono. **Produtos Químicos**, 2016b. Disponível em: <<https://produtosquimicos.cetesb.sp.gov.br/ficha/produto/57>>. Acesso em: 19 Novembro 2023.

CETESB. Ficha de Resposta a Emergência Química - Hidrogênio Comprimido. **Produtos Químicos**, 2016c. Disponível em: <<https://produtosquimicos.cetesb.sp.gov.br/ficha/produto/56>>. Acesso em: 19 Novembro 2023.

CETESB. Ficha de Resposta a Emergência Química - Metano. **Produtos Químicos**, 2016d. Disponível em: <<https://produtosquimicos.cetesb.sp.gov.br/ficha/produto/774>>. Acesso em: 19 Novembro 2023.

CETESB. Ficha de Resposta a Emergência Química - Monóxido de Carbono, Comprimido. **Produtos Químicos**, 2016e. Disponível em: <<https://produtosquimicos.cetesb.sp.gov.br/ficha/produto/189>>. Acesso em: 19 Novembro 2023.

CETESB. Ficha de Resposta a Emergência Química - Nitrogênio, Comprimido. **Produtos Químicos**, 2016f. Disponível em:

<<https://produtosquimicos.cetesb.sp.gov.br/ficha/produto/1040>>. Acesso em: 19 Novembro 2023.

CHEMELOT. OCI Nitrogen. **Site da Chemelot**, 2023. Disponível em: <<https://www.chemelot.nl/chemelot-en/companies/oci-nitrogen-1>>. Acesso em: 28 Novembro 2023.

CHUNG, Y. H. et al. Fire Safety Evaluation of High-Pressure Ammonia Storage Systems. **Energies**, 15, n. 2, 2022.

CROWL, D. A.; LOUVAR, J. F. **Chemical Process Safety - Fundamentals with Applications**. 2º. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 2002. ISBN ISBN 0-13-018176-5.

DECHEMA. DIPPR 801. **Site da DECHEMA**, 2016. Disponível em: <<https://dechema.de/en/dippr801.html>>. Acesso em: 18 jun. 2023.

GEXCON. What are the Coloured Books? **Site da Gexcon**, 19 Janeiro 2022. Disponível em: <www.gexcon.com/blog/what-are-the-coloured-books/>. Acesso em: 04 Setembro 2023.

GEXCON NETHERLANDS BV. **Effects Version 12 - User and reference manual**. Driebergen. 2022a.

GEXCON NETHERLANDS BV. **Riskcurves Version 12 - Quick Start Guide and User Manual**. Driebergen. 2022b.

GOOGLE. Geleen. **Google Earth Pro**, 2020. Disponível em: <<https://earth.google.com/web/search/oci+nitrogen/@50.97863958,5.79452424,60.71252441a,1503.34016518d,35y,0h,0t,0r/data=CigiJgokCTHnP0Q6RDRAETDnP0Q6RDTAGa5pOn6FzEJAIQPnuq7qDFDAOgMKATA>>. Acesso em: 06 Dezembro 2023.

GOOGLE. **Google Earth Pro**, 2023. Disponível em: <earth.google.com>. Acesso em: 06 Dezembro 2023.

HABER, F.; ROSSIGNOL, R. L. **Production of Ammonia**. 1.202.995, 13 Agosto 1909.

IBGE. Sinopse por setores. **censo2010**, 2010. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/sinopseporsetores/?nivel=st>>. Acesso em: 06 Dezembro 2023.

IBGE. Censo Demográfico - Sobre. **Site do IBGE**, 7 Julho 2023. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html?=&t=sobre>>. Acesso em: 16 Novembro 2023.

KAROLINE SANTOS RODRIGUES , H. et al. Propriedades de um concreto leve estrutural com incorporação de argila expandida e resíduo de granito. **Matéria (Rio de Janeiro)**, 1, 2022.

MANNAN, S. **Lee's Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control**. College Station: Butterworth-Heinemann, 2012. ISBN 978-0123971890.

MODAK, J. M. Haber process for ammonia synthesis. **Resonance**, n. 7, 2002.

NATIONAL INSTITUTE OF PUBLIC HEALTH AND ENVIRONMENT - RIVM. **Reference Manual Bevi Risk Assessment**. Bilthoven: [s.n.], 2009. Disponível em: <<https://www.rivm.nl/documenten/reference-manual-bevi-risk-assessments-version-32>>. Acesso em: 30 Outubro 2023.

NOLAN, D. P. **Safety and Security Revoew for the Process Industries: Application of HAZOP, PHA and SVA Reviews**. Waltham: Elsevier, 2015. ISBN 978-0-323-32295-9.

PATTABATHULA, V.; RICHARDSON, J. **Introduction to Ammonia Production**. **AIChE CEP**, 2016.

SARTORE, P. E. **Otimização Energética de uma Planta de Produção de Amônia (UFN V)**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2014.

SCHMITS, P.; RENIERS, G.; SWUSTE, P. Determining a realistic ranking of the most dangerous process equipment of the ammonia production process: A practical approach. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 70, 2021.

TNO. **Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from release of hazardous materials**. First Edition. ed. Haia: Committee for the Prevention of Disasters, 1992. ISBN CPR 16E. Disponível em: <<https://www.gexcon.com/coloured-books/>>. Acesso em: 03 ago. 2023.

TNO. **Methods for the calculation of physical effects - due to releases of hacardous materials (liquids and gases)**. Haia: Committee for the Prevention of Disasters, 1996. ISBN CPR 14E. Disponível em: <<https://www.gexcon.com/coloured-books/>>. Acesso em: 03 ago. 2023.

TNO. **Methods for determining and processing probabilities**. Second Edition. ed. Haia: Committee for Prevention of Disasters, 1997. ISBN CPR 12E. Disponível em: <<https://www.gexcon.com/coloured-books/>>. Acesso em: 03 ago. 2023.

TNO. **Guideline for quantitative risk assessment**. First Edition. ed. Haia: Committee for the Prevention of Disasters, 1999. ISBN CPR 18E. Disponível em: <<https://www.gexcon.com/coloured-books/>>. Acesso em: 03 ago. 2023.

APÊNDICE A – Análise Preliminar de Risco

Sistema 1: Dessulfurização.

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no reator de dessulfurização	Furo de diâmetro de 10mm	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	3	4	C	001
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no reator de dessulfurização	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	5	3	D	002
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no reator de dessulfurização	Ruptura catastrófica	Bola de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	5	3	D	003
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao reator de dessulfurização	Furo com 10% do diâmetro	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	3	B	004
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao reator de dessulfurização	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	5	2	D	005

Fonte: elaboração própria

Sistema 2: Reforma Primária.

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no reformador primário	Furo de diâmetro de 10mm	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	1	4	B	006a
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no reformador primário	Furo de diâmetro de 10mm	Formação e dispersão de nuvem tóxica	1	4	B	006b
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no reformador primário	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	3	B	007a
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no reformador primário	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	3	B	007b
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no reformador primário	Ruptura catastrófica	Bola de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	3	3	C	008a
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no reformador primário	Ruptura catastrófica	Formação e dispersão de nuvem tóxica	3	3	C	008b
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao reformador primário	Furo com 10% do diâmetro	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	1	3	B	009a

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao reformador primário	Furo com 10% do diâmetro	Formação e dispersão de nuvem tóxica	1	3	B	009b
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao reformador primário	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	2	B	010a
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao reformador primário	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	2	B	010b

Fonte: elaboração própria

Sistema 3: Reforma Secundária.

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no reformador secundário	Furo de diâmetro de 10mm	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	1	4	B	011a
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no reformador secundário	Furo de diâmetro de 10mm	Formação e dispersão de nuvem tóxica	1	4	B	011b
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no reformador secundário	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	3	B	012a
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no reformador secundário	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	3	B	012b
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no reformador secundário	Ruptura catastrófica	Bola de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	3	3	C	013a
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no reformador secundário	Ruptura catastrófica	Formação e dispersão de nuvem tóxica	3	3	C	013b
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao reformador secundário	Furo com 10% do diâmetro	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	1	3	B	014a

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao reformador secundário	Furo com 10% do diâmetro	Formação e dispersão de nuvem tóxica	1	3	B	014b
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao reformador secundário	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	2	B	015a
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao reformador secundário	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	2	B	015b
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na caldeira de calor residual do gás	Furo de diâmetro de 10mm	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	1	5	C	016a
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na caldeira de calor residual do gás	Furo de diâmetro de 10mm	Formação e dispersão de nuvem tóxica	1	5	C	016b
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na caldeira de calor residual do gás	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	3	B	017a
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na caldeira de calor residual do gás	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	3	B	017b

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa na caldeira de calor residual do gás	Ruptura catastrófica	Bola de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	3	3	C	018a
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa na caldeira de calor residual do gás	Ruptura catastrófica	Formação e dispersão de nuvem tóxica	3	3	C	018b
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada à caldeira de calor residual do gás	Furo com 10% do diâmetro	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	1	3	B	019a
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada à caldeira de calor residual do gás	Furo com 10% do diâmetro	Formação e dispersão de nuvem tóxica	1	3	B	019b
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada à caldeira de calor residual do gás	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	2	B	020a
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada à caldeira de calor residual do gás	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	2	B	020b

Fonte: elaboração própria

Sistema 4: Shift de alta temperatura.

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no reator de shift de alta temperatura	Furo de diâmetro de 10mm	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	1	4	B	021a
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no reator de shift de alta temperatura	Furo de diâmetro de 10mm	Formação e dispersão de nuvem tóxica	1	4	B	021b
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no reator de shift de alta temperatura	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	3	B	022a
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no reator de shift de alta temperatura	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	3	B	022b
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no reator de shift de alta temperatura	Ruptura catastrófica	Bola de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	3	3	C	023a
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no reator de shift de alta temperatura	Ruptura catastrófica	Formação e dispersão de nuvem tóxica	3	3	C	023b
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao reator de shift de alta temperatura	Furo com 10% do diâmetro	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	1	3	B	024a

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao reator de shift de alta temperatura	Furo com 10% do diâmetro	Formação e dispersão de nuvem tóxica	1	3	B	024b
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao reator de shift de alta temperatura	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	2	B	025a
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao reator de shift de alta temperatura	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	2	B	025b

Sistema 5: Shift de baixa temperatura.

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no reator de shift de baixa temperatura	Furo de diâmetro de 10mm	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	1	4	B	026
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no reator de shift de baixa temperatura	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	3	B	027
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no reator de shift de baixa temperatura	Ruptura catastrófica	Bola de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	3	3	C	028
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao reator de shift de baixa temperatura	Furo com 10% do diâmetro	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	1	3	B	029
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao reator de shift de baixa temperatura	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	2	B	030

Sistema 6: Remoção de CO₂.

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no absorvedor de CO ₂	Furo de diâmetro de 10mm	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	3	4	C	031
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no absorvedor de CO ₂	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	5	3	D	032
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no absorvedor de CO ₂	Ruptura catastrófica	Bola de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	5	3	D	033
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao absorvedor de CO ₂	Furo com 10% do diâmetro	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	3	B	034
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao absorvedor de CO ₂	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	5	2	D	035
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no separador de efluente da absorção de CO ₂	Furo de diâmetro de 10mm	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	3	4	C	036
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no separador de efluente da absorção de CO ₂	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	5	3	D	037

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no separador de efluente da absorção de CO ₂	Ruptura catastrófica	Bola de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	5	3	D	038
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao separador de efluente da absorção de CO ₂	Furo com 10% do diâmetro	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	3	B	039
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao separador de efluente da absorção de CO ₂	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	5	2	D	040

Sistema 7: Metanação.

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no reator de metanação	Furo de diâmetro de 10mm	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	3	4	C	041
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no reator de metanação	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	5	3	D	042
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no reator de metanação	Ruptura catastrófica	Bola de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	5	3	D	043
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao reator de metanação	Furo com 10% do diâmetro	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	3	B	044
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao reator de metanação	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	5	2	D	045
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no resfriador do gás de síntese (SS)	Furo de diâmetro de 10mm	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	5	C	046
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no resfriador do gás de síntese (SS)	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	4	3	D	047

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no resfriador do gás de síntese (SS)	Ruptura catastrófica	Bola de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	4	3	D	048
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao resfriador do gás de síntese (SS)	Furo com 10% do diâmetro	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	3	B	049
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao resfriador do gás de síntese (SS)	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	4	2	C	050

Sistema 8: Secagem do gás de síntese.

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no compressor do gás de síntese	Furo com 10% do diâmetro	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	5	C	051
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no compressor do gás de síntese	Ruptura catastrófica	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	5	4	E	052
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa nas peneiras moleculares	Furo de diâmetro de 10mm	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	3	4	C	053
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa nas peneiras moleculares	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	5	3	D	054
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa nas peneiras moleculares	Ruptura catastrófica	Bola de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	5	3	D	055
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada às peneiras moleculares	Furo com 10% do diâmetro	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	3	B	056
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada às peneiras moleculares	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	5	2	D	057

Sistema 9: Síntese de amônia.

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no trocador de calor de gás de síntese (TS)	Furo de diâmetro de 10mm	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	5	C	058a
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no trocador de calor de gás de síntese (TS)	Furo de diâmetro de 10mm	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	5	C	058b
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no trocador de calor de gás de síntese (TS)	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	4	3	D	059a
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no trocador de calor de gás de síntese (TS)	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	3	D	059b
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no trocador de calor de gás de síntese (TS)	Ruptura catastrófica	Bola de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	4	3	D	060a
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no trocador de calor de gás de síntese (TS)	Ruptura catastrófica	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	3	D	060b
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao trocador de calor de gás de síntese (TS)	Furo com 10% do diâmetro	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	3	B	061a

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao trocador de calor de gás de síntese (TS)	Furo com 10% do diâmetro	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	3	B	061b
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao trocador de calor de gás de síntese (TS)	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	4	2	C	062a
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao trocador de calor de gás de síntese (TS)	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	2	C	062b
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no reator de síntese	Furo de diâmetro de 10mm	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	3	4	C	063a
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no reator de síntese	Furo de diâmetro de 10mm	Formação e dispersão de nuvem tóxica	3	4	C	063b
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no reator de síntese	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	5	3	D	064a
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no reator de síntese	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Formação e dispersão de nuvem tóxica	5	3	D	064b

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no reator de síntese	Ruptura catastrófica	Bola de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	5	3	D	065a
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no reator de síntese	Ruptura catastrófica	Formação e dispersão de nuvem tóxica	5	3	D	065b
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao reator de síntese	Furo com 10% do diâmetro	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	3	B	066a
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao reator de síntese	Furo com 10% do diâmetro	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	3	B	066b
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao reator de síntese	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	5	2	D	067a
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao reator de síntese	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Formação e dispersão de nuvem tóxica	5	2	D	067b

Sistema 10: Resfriamento/condensação.

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na caldeira de calor residual do loop de síntese (TS)	Furo de diâmetro de 10mm	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	5	C	068a
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na caldeira de calor residual do loop de síntese (TS)	Furo de diâmetro de 10mm	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	5	C	068b
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na caldeira de calor residual do loop de síntese (TS)	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	4	3	D	069a
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na caldeira de calor residual do loop de síntese (TS)	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	3	D	069b
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa na caldeira de calor residual do loop de síntese (TS)	Ruptura catastrófica	Bola de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	4	3	D	070a
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa na caldeira de calor residual do loop de síntese (TS)	Ruptura catastrófica	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	3	D	070b
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada à caldeira de calor residual do loop de síntese (TS)	Furo com 10% do diâmetro	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	3	B	071a

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada à caldeira de calor residual do loop de síntese (TS)	Furo com 10% do diâmetro	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	3	B	071b
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada à caldeira de calor residual do loop de síntese (TS)	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	4	2	C	072a
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada à caldeira de calor residual do loop de síntese (TS)	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	2	C	072b
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no trocador de calor de gás de síntese (SS)	Furo de diâmetro de 10mm	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	5	C	073a
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no trocador de calor de gás de síntese (SS)	Furo de diâmetro de 10mm	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	5	C	073b
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no trocador de calor de gás de síntese (SS)	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	4	3	D	074a

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no trocador de calor de gás de síntese (SS)	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	3	D	074b
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no trocador de calor de gás de síntese (SS)	Ruptura catastrófica	Bola de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	4	3	D	075a
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no trocador de calor de gás de síntese (SS)	Ruptura catastrófica	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	3	D	075b
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao trocador de calor de gás de síntese (SS)	Furo com 10% do diâmetro	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	3	B	076a
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao trocador de calor de gás de síntese (SS)	Furo com 10% do diâmetro	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	3	B	076b
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao trocador de calor de gás de síntese (SS)	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	4	2	C	077a
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	2	C	077b

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
associada ao trocador de calor de gás de síntese (SS)						
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no resfriador de efluente de síntese de NH ₃ (TS)	Furo de diâmetro de 10mm	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	5	C	078a
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no resfriador de efluente de síntese de NH ₃ (TS)	Furo de diâmetro de 10mm	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	5	C	078b
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no resfriador de efluente de síntese de NH ₃ (TS)	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	4	3	D	079a
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no resfriador de efluente de síntese de NH ₃ (TS)	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	3	D	079b
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no resfriador de efluente de síntese de NH ₃ (TS)	Ruptura catastrófica	Bola de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	4	3	D	080a
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no resfriador de efluente de síntese de NH ₃ (TS)	Ruptura catastrófica	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	3	D	080b
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação	Furo com 10% do diâmetro	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	3	B	081a

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
associada ao resfriador de efluente de síntese de NH ₃ (TS)						
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao resfriador de efluente de síntese de NH ₃ (TS)	Furo com 10% do diâmetro	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	3	B	081b
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao resfriador de efluente de síntese de NH ₃ (TS)	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	4	2	C	082a
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao resfriador de efluente de síntese de NH ₃ (TS)	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	2	C	082b

Sistema 11: Separação de amônia.

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no separador de amônia	Furo de diâmetro de 10mm	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	3	4	C	083a
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no separador de amônia	Furo de diâmetro de 10mm	Formação e dispersão de nuvem tóxica	3	4	C	083b
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no separador de amônia	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	5	3	D	084a
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no separador de amônia	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Formação e dispersão de nuvem tóxica	5	3	D	084b
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no separador de amônia	Ruptura catastrófica	Bola de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	5	3	D	085a
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no separador de amônia	Ruptura catastrófica	Formação e dispersão de nuvem tóxica	5	3	D	085b
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao separador de amônia	Furo com 10% do diâmetro	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	2	3	B	086a

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao separador de amônia	Furo com 10% do diâmetro	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	3	B	086b
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao separador de amônia	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	5	2	D	087a
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao separador de amônia	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Formação e dispersão de nuvem tóxica	5	2	D	087b
Pequeno vazamento contínuo de amônia líquida no separador de amônia	Furo de diâmetro de 10mm	Formação e dispersão de nuvem tóxica	3	4	C	088
Grande vazamento contínuo de amônia líquida no separador de amônia	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Formação e dispersão de nuvem tóxica	5	3	D	089
Grande vazamento instantâneo de amônia líquida no separador de amônia	Ruptura catastrófica	Formação e dispersão de nuvem tóxica	5	3	D	090
Pequeno vazamento contínuo de amônia líquida na tubulação associada ao separador de amônia	Furo com 10% do diâmetro	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	3	B	091

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Grande vazamento contínuo de amônia líquida na tubulação associada ao separador de amônia	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Formação e dispersão de nuvem tóxica	5	2	D	092

Sistema 12: Expansão de amônia.

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no vaso de expansão de amônia	Furo de diâmetro de 10mm	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	1	4	B	093a
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa no vaso de expansão de amônia	Furo de diâmetro de 10mm	Formação e dispersão de nuvem tóxica	1	4	B	093b
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no vaso de expansão de amônia	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	3	3	C	094a
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa no vaso de expansão de amônia	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Formação e dispersão de nuvem tóxica	3	3	C	094b
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no vaso de expansão de amônia	Ruptura catastrófica	Bola de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	3	3	C	095a
Grande vazamento instantâneo de mistura gasosa no vaso de expansão de amônia	Ruptura catastrófica	Formação e dispersão de nuvem tóxica	3	3	C	095b
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao vaso de expansão de amônia	Furo com 10% do diâmetro	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	1	3	B	096a

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Pequeno vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao vaso de expansão de amônia	Furo com 10% do diâmetro	Formação e dispersão de nuvem tóxica	1	3	B	096b
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao vaso de expansão de amônia	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Jato de fogo, formação de nuvem inflamável, incêndio e explosão da nuvem	3	2	C	097a
Grande vazamento contínuo de mistura gasosa na tubulação associada ao vaso de expansão de amônia	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Formação e dispersão de nuvem tóxica	3	2	C	097b
Pequeno vazamento contínuo de amônia líquida no vaso de expansão de amônia	Furo de diâmetro de 10mm	Formação e dispersão de nuvem tóxica	3	4	C	098
Grande vazamento contínuo de amônia líquida no vaso de expansão de amônia	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Formação e dispersão de nuvem tóxica	5	3	D	099
Grande vazamento instantâneo de amônia líquida no vaso de expansão de amônia	Ruptura catastrófica	Formação e dispersão de nuvem tóxica	5	3	D	100
Pequeno vazamento contínuo de amônia líquida na tubulação	Furo com 10% do diâmetro	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	3	B	101

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
associada ao vaso de expansão de amônia						
Grande vazamento contínuo de amônia líquida na tubulação associada ao vaso de expansão de amônia	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Formação e dispersão de nuvem tóxica	5	2	D	102

Sistema 13: Sistema de resfriamento da amônia.

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Pequeno vazamento contínuo de amônia líquida no resfriador do efluente de síntese de NH ₃ A (SS)	Furo de diâmetro de 10mm	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	5	C	103
Grande vazamento contínuo de amônia líquida no resfriador do efluente de síntese de NH ₃ A (SS)	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	3	D	104
Grande vazamento instantâneo de amônia líquida no resfriador do efluente de síntese de NH ₃ A (SS)	Ruptura catastrófica	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	3	D	105
Pequeno vazamento contínuo de amônia líquida na tubulação associada ao resfriador do efluente de síntese de NH ₃ A (SS)	Furo com 10% do diâmetro	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	3	B	106
Grande vazamento contínuo de amônia líquida na tubulação associada ao resfriador do efluente de síntese de NH ₃ A (SS)	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	2	C	107
Pequeno vazamento contínuo de amônia líquida no resfriador do efluente de síntese de NH ₃ B (SS)	Furo de diâmetro de 10mm	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	5	C	108

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Grande vazamento contínuo de amônia líquida no resfriador do efluente de síntese de NH ₃ B (SS)	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	3	D	109
Grande vazamento instantâneo de amônia líquida no resfriador do efluente de síntese de NH ₃ B (SS)	Ruptura catastrófica	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	3	D	110
Pequeno vazamento contínuo de amônia líquida na tubulação associada ao resfriador do efluente de síntese de NH ₃ B (SS)	Furo com 10% do diâmetro	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	3	B	111
Grande vazamento contínuo de amônia líquida na tubulação associada ao resfriador do efluente de síntese de NH ₃ B (SS)	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	2	C	112
Pequeno vazamento contínuo de amônia líquida no resfriador do efluente de síntese de NH ₃ C (SS)	Furo de diâmetro de 10mm	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	5	C	113
Grande vazamento contínuo de amônia líquida no resfriador do efluente de síntese de NH ₃ C (SS)	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	3	D	114
Grande vazamento instantâneo de amônia líquida no resfriador do efluente de síntese de NH ₃ C (SS)	Ruptura catastrófica	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	3	D	115

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Pequeno vazamento contínuo de amônia líquida na tubulação associada ao resfriador do efluente de síntese de NH ₃ C (SS)	Furo com 10% do diâmetro	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	3	B	116
Grande vazamento contínuo de amônia líquida na tubulação associada ao resfriador do efluente de síntese de NH ₃ C (SS)	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	2	C	117
Pequeno vazamento contínuo de amônia líquida no resfriador do efluente de síntese de NH ₃ D (SS)	Furo de diâmetro de 10mm	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	5	C	118
Grande vazamento contínuo de amônia líquida no resfriador do efluente de síntese de NH ₃ D (SS)	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	3	D	119
Grande vazamento instantâneo de amônia líquida no resfriador do efluente de síntese de NH ₃ D (SS)	Ruptura catastrófica	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	3	D	120
Pequeno vazamento contínuo de amônia líquida na tubulação associada ao resfriador do efluente de síntese de NH ₃ D (SS)	Furo com 10% do diâmetro	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	3	B	121
Grande vazamento contínuo de amônia líquida na tubulação	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	2	C	122

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
associada ao resfriador do efluente de síntese de NH ₃ D (SS)						
Pequeno vazamento contínuo de amônia líquida no compressor de amônia	Furo com 10% do diâmetro	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	5	C	123
Grande vazamento contínuo de amônia líquida no compressor de amônia	Ruptura catastrófica	Formação e dispersão de nuvem tóxica	5	4	E	124
Pequeno vazamento contínuo de amônia líquida no condensador de amônia	Furo de diâmetro de 10mm	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	5	C	125
Grande vazamento contínuo de amônia líquida no condensador de amônia	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	3	D	126
Grande vazamento instantâneo de amônia líquida no condensador de amônia	Ruptura catastrófica	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	3	D	127
Pequeno vazamento contínuo de amônia líquida na tubulação associada ao condensador de amônia	Furo com 10% do diâmetro	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	3	B	128
Grande vazamento contínuo de amônia líquida na tubulação associada ao condensador de amônia	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Formação e dispersão de nuvem tóxica	4	2	C	129

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Pequeno vazamento contínuo de amônia líquida no vaso coletor de amônia	Furo de diâmetro de 10mm	Formação e dispersão de nuvem tóxica	3	4	C	130
Grande vazamento contínuo de amônia líquida no vaso coletor de amônia	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Formação e dispersão de nuvem tóxica	5	3	D	131
Grande vazamento instantâneo de amônia líquida no vaso coletor de amônia	Ruptura catastrófica	Formação e dispersão de nuvem tóxica	5	3	D	132
Pequeno vazamento contínuo de amônia líquida na tubulação associada ao vaso coletor de amônia	Furo com 10% do diâmetro	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	3	B	133
Grande vazamento contínuo de amônia líquida na tubulação associada ao vaso coletor de amônia	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Formação e dispersão de nuvem tóxica	5	2	D	134
Pequeno vazamento contínuo de amônia líquida na bomba de produto de amônia	Furo com 10% do diâmetro	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	5	C	135
Grande vazamento contínuo de amônia líquida na bomba de produto de amônia	Ruptura catastrófica	Formação e dispersão de nuvem tóxica	5	4	E	136

Sistema 14: Tanque Pulmão.

Perigo	Causas	Efeitos	Severidade	Frequência	Risco	N°
Pequeno vazamento contínuo de amônia líquida no tanque pulmão de amônia	Furo de diâmetro de 10mm	Formação e dispersão de nuvem tóxica	3	4	C	137
Grande vazamento contínuo de amônia líquida no tanque pulmão de amônia	Ruptura parcial com liberação de todo conteúdo em 10 minutos	Formação e dispersão de nuvem tóxica	5	3	D	138
Grande vazamento instantâneo de amônia líquida no tanque pulmão de amônia	Ruptura catastrófica	Formação e dispersão de nuvem tóxica	5	3	D	139
Pequeno vazamento contínuo de amônia líquida na tubulação associada ao tanque pulmão de amônia	Furo com 10% do diâmetro	Formação e dispersão de nuvem tóxica	2	3	B	140
Grande vazamento contínuo de amônia líquida na tubulação associada ao tanque pulmão de amônia	Ruptura da linha (100% do diâmetro)	Formação e dispersão de nuvem tóxica	5	2	D	141