



# Análise de Risco de uma Unidade de Armazenamento e Distribuição de Cloro

Giovana Romeu da Silva Pontes

Laís de Queiroz Gomes

## Projeto de Final de Curso

Orientador

Prof. Caetano Moraes, Ph.D.

Abril de 2009

# **ANÁLISE DE RISCO DE UMA UNIDADE DE ARMAZENAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DE CLORO**

***Giovana Romeu da Silva Pontes  
Laís de Queiroz Gomes***

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

---

Prof. Alexandre de Castro Leiras, D.Sc.

---

Prof. Alfredo Renault, M. Sc.

---

Prof. José Manuel Gonzalez Tubio Perez, M. Sc.

Orientado por:

---

Prof. Caetano Moraes, Ph.D.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil  
Abril de 2009

Pontes, Giovana Romeu da Silva.

Gomes, Laís de Queiroz.

Análise de risco de uma unidade de armazenamento e distribuição de Cloro / Giovana Romeu da Silva Pontes; Laís de Queiroz Gomes. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ. 2009.

xii, 110 p.; il.

(Projeto de Final de Curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2009.

Orientador: Prof. Caetano Moraes.

1. Análise de risco. 2. Cloro. 3. Acidente. 4. Projeto de Final de Curso. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Caetano Moraes. I. Análise de Risco de uma unidade de armazenamento e distribuição de Cloro.

Dedicamos este projeto aos nossos familiares, amigos e a todos aqueles que acreditaram na realização desta etapa de nossas vidas.

“Sei que a bondade e a fidelidade me acompanharão todos os dias da minha vida,  
e habitarei na casa do SENHOR para todo o sempre.”

Salmo 23, 6.

Agradeço a Deus, por ter me dado saúde, garra e força de vontade para alcançar o que eu julgava ser impossível.

Agradeço ao meu pai, por ter cedido a sua casa a mim e a meus amigos para noites intermináveis de estudo; e por ter sido tão amigo todas as vezes em que eu precisei.

A minha mãe e minha irmã, que sempre se sacrificaram para que nada me faltasse e eu pudesse seguir na busca dos meus sonhos. Serei sempre grata por me amarem e me respeitarem.

A meu avô por ter custeado meus estudos me oferecendo a oportunidade de construir uma base sólida.

A minha avó pelo incentivo, tanto financeiro quanto pessoal. Obrigada por ter sempre acreditado em mim!

A meu marido, parceiro e amigo. Nós sabemos que eu não teria chegado até aqui sem a sua força e o seu estímulo. Eu devo isso a você, meu amor.

Agradeço a minha amiga Laís, por todo o seu carinho e amizade durante esses anos de faculdade. Jamais esquecerei o dia em que te encontrei no corredor e tão generosamente você me apresentou e ofereceu a idéia deste projeto.

Agradeço ao professor Caetano por toda a atenção e dedicação ao nosso trabalho.

Agradeço aos meus amigos e a todos aqueles que entenderam a minha ausência e o quanto a conclusão desta etapa exigiu de mim.

**Giovana Romeu da Silva Pontes**

Agradeço a todos que contribuíram para que eu concluísse esta etapa. Em especial:

A DEUS, por sua inexplicável presença.

A melhor mãe do mundo, a minha, por sempre ter estado comigo: me acordando ou dizendo pra eu dormir, me incentivando, fazendo minha marmita, rindo ou brigando comigo. Mas SEMPRE do meu lado.

Ao meu pai, o melhor, por todas as palavras e sacrifícios incondicionais que fez e faz por mim. Por sempre estar comigo pro que der e vier, sendo meu amigo e meu exemplo.

Ao meu irmão Diógenes que desde sempre acreditou em mim com palavras e custeando meus cursos pré-vestibular e de Alemão.

Ao meu irmão Vinícius por ter sido meu amigo me mostrando como agir em situações difíceis.

Ao meu namorado Bruno pelo seu incentivo, admiração e compreensão.

A minha amiga não só de projeto final, mas de muitas disciplinas, por ter estudado comigo (mesmo já tendo passado na disciplina). Obrigada Giovana pelo apoio em fases boas e ruins, pelas horas de estudo, conversa, incentivo e compreensão. Obrigada pela sua sincera amizade.

As minhas amigas especiais Aline e Júlia que sempre me apoiaram e estiveram comigo, mesmo longe.

Ao professor Caetano por sua atenção e paciência durante a confecção deste trabalho.

A todos os meus amigos e colegas.

**Laís de Queiroz Gomes**

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

## **ANÁLISE DE RISCO DE UMA UNIDADE DE ARMAZENAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DE CLORO**

Giovana Romeu da Silva Pontes  
Laís de Queiroz Gomes

Abril, 2009

Orientador: Prof. Caetano Moraes, Ph.D.

Processos contendo materiais perigosos estão presentes nos mais variados tipos de negócios, sejam eles de grande ou pequeno porte. Tais processos, caracterizados por seus riscos inerentes, apresentam significativa probabilidade de acidentes que envolvem a liberação de produtos tóxicos ou perigosos.

Devido ao aumento de acidentes em indústrias que manuseiam estes tipos de produtos, surgiu a necessidade de realizar estudos de análises de risco para avaliar e identificar os perigos a que o empreendimento e sua vizinhança estão expostos. Com isso a proposta deste trabalho é realizar um estudo de análise de risco para uma unidade de armazenamento e distribuição de cloro localizada no município de Belford Roxo, Rio de Janeiro. Este estudo visa identificar, analisar e quantificar os riscos e consequências de possíveis acidentes envolvendo a liberação da substância cloro.

O cálculo do tempo e da distribuição espacial da concentração do gás cloro na atmosfera, em função da distância do ponto de vazamento, foi realizado utilizando as equações do modelo de Pasquill-Gifford.

Para a identificação das hipóteses acidentais foi utilizada a técnica qualitativa conhecida como APP (Análise Preliminar de Perigo). Foram identificados seis cenários de acidentes, sendo dois com categoria de risco desprezível e quatro com risco moderado. As hipóteses classificadas com risco moderado foram avaliadas quantitativamente através da Análise de Consequência e Vulnerabilidade. Para tal, utiliza-se a equação Probit, que tem como objetivo determinar a probabilidade de morte para uma pessoa exposta a uma determinada concentração do gás durante certo intervalo de tempo. As frequências de ocorrência de cada um dos cenários acidentais foram obtidas através de Árvores de Eventos.

A partir da combinação da frequência de ocorrência de cada evento acidental com o número de mortes pode-se calcular o risco social e individual e estimar a aceitabilidade do risco. Os valores obtidos para o risco social relacionado aos acidentes com vazamento do gás cloro é alto, pois uma parte da curva F-N obtida encontra-se dentro da região de risco inaceitável.

# ÍNDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Capítulo I – Introdução</b>   | <b>1</b>  |
| <b>Capítulo II – Conceitos e Fundamentos</b>                             | <b>12</b> |
| II.1 - Sobre o Cloro   | 12        |
| II.1.1 - Propriedades físico-químicas                                    | 13        |
| II.1.2 - Propriedades toxicológicas                                      | 15        |
| II.2 - Análise de Riscos   | 16        |
| II.2.1 – Histórico   | 16        |
| II.2.2 – Conceito de Análise de Riscos                                   | 17        |
| II.3 – Técnicas de Análises de Riscos                                    | 17        |
| <b>Capítulo III – Descrição da Região e da Instalação de Interesse</b>   | <b>19</b> |
| III.1 – Ocupação da vizinhança   | 19        |
| III.2 – Características meteorológicas                                   | 20        |
| III.3 – Descrição geral das instalações da unidade                       | 21        |
| <b>Capítulo IV – Identificação dos Perigos</b>                           | <b>25</b> |
| IV.1 – HAZOP – Estudo de Riscos e Operabilidade                          | 26        |
| IV.1.1 – Objetivo  | 26        |
| IV.1.2 – Aplicação   | 26        |
| IV.1.3 – Natureza dos resultados   | 30        |
| IV.1.4 – Vantagens e desvantagens  | 30        |
| IV.1.5 – Resultados  | 31        |
| IV.2 – Análise Preliminar de Perigo (APP)                                | 31        |
| IV.2.1 – Objetivo  | 31        |
| IV.2.2 – Aplicação   | 31        |
| IV.2.3 – Natureza dos resultados   | 37        |
| IV.2.4 – Vantagens e desvantagens  | 37        |
| IV.2.5 – Resultados  | 38        |
| <b>Capítulo V – Cálculo das Frequências dos Cenários de Acidentes</b>    | <b>40</b> |
| V.1 – Objetivo   | 40        |
| V.2 – Aplicação  | 40        |
| V.3 – Resultados   | 42        |
| V.3.1 – Frequências  | 42        |
| V.3.2 – Frequências dos efeitos ou cenários accidentais                  | 44        |
| V.3.3 – Descrição das consequências dos eventos base                     | 44        |
| <b>Capítulo VI – Análise de Consequências e de Vulnerabilidade</b>       | <b>45</b> |
| VI.1 – Modelos Fonte   | 45        |
| VI.1.1 – Modelo de Vazamento de Gás através de um Orifício               | 46        |
| VI.1.2 – Modelo de Vazamento de Líquido através de um Orifício           | 47        |
| VI.1.3 – Modelo de Vazamento de Líquido através de um Orifício no Tanque | 48        |
| VI.1.4 – Modelo de Escoamento de Líquido através de Tubulação            | 48        |

|  |            |
|--|------------|
| VI.1.5 – Modelo de Escoamento de Gás através de Tubulação          | 48         |
| VI.1.6 – Modelo de Flash de Líquidos                               | 48         |
| VI.1.7 – Modelo de Evaporação em Poça de Líquido                   | 49         |
| VI.1.8 – Cálculo da Taxa de Vazamento                              | 50         |
| VI.1.8.1 – Cenário 02 – EI-01                                      | 50         |
| VI.1.8.2 – Cenário 03 – EI-02                                      | 50         |
| VI.1.8.3 – Cenário 05 – EI-03                                      | 50         |
| VI.1.8.4 – Cenário 06 – EI-04                                      | 52         |
| VI.2 – Modelos de Dispersão Atmosférica                            | 52         |
| VI.2.1 – Cálculo da Dispersão Atmosférica                          | 60         |
| VI.2.1.1 – Cenário 02 – EI-01                                      | 60         |
| VI.2.1.2 – Cenário 03 – EI-02                                      | 61         |
| VI.2.1.3 – Cenário 05 – EI-03                                      | 65         |
| VI.2.1.4 – Cenário 06 – EI-04                                      | 65         |
| VI.3 – Probit  | 69         |
| VI.3.1 – Cenário 02 – EI-01  | 70         |
| VI.3.2 – Cenário 03 – EI-02  | 71         |
| VI.3.3 – Cenário 05 – EI-03  | 71         |
| VI.3.4 – Cenário 06 – EI-04  | 72         |
| <b>Capítulo VII – Avaliação dos Riscos</b>                         | <b>73</b>  |
| VII.1 – Risco Individual   | 73         |
| VII.1.1 – Cálculo do Risco Individual                              | 75         |
| VII.2 – Risco Social   | 77         |
| VII.2.1 – Cálculo do Risco Social                                  | 79         |
| <b>Capítulo VIII – Conclusões e Sugestões</b>                      | <b>86</b>  |
| VIII.1 – Conclusões  | 86         |
| VIII.2 – Sugestões para trabalhos futuros                          | 87         |
| <b>Referências Bibliográficas</b>                                  | <b>89</b>  |
| <b>Anexo A1 – Glossário</b>  | <b>92</b>  |
| <b>Anexo A2 – Fluxograma da unidade</b>                            | <b>96</b>  |
| <b>Anexo A3 – HAZOP</b>  | <b>97</b>  |
| <b>Anexo A4 – Análise Preliminar de Perigo</b>                     | <b>105</b> |
| <b>Anexo A5 - Árvore de Eventos do Evento Iniciador 01 (EI-01)</b> | <b>107</b> |
| <b>Anexo A6 - Árvore de Eventos do Evento Iniciador 02 (EI-02)</b> | <b>108</b> |
| <b>Anexo A7 - Árvore de Eventos do Evento Iniciador 03 (EI-03)</b> | <b>109</b> |
| <b>Anexo A8 - Árvore de Eventos do Evento Iniciador 04 (EI-04)</b> | <b>110</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.1</b> - Acidente em unidade produtora de caprolactama   | 2  |
| <b>Figura 1.2</b> - Casos de Cloroacne, desenvolvidos após acidente com liberação de dioxina                                    | 3  |
| <b>Figura 1.3</b> - Acidente causado por liberação de GLP   | 4  |
| <b>Figura 1.4</b> - Incêndio decorrente de vazamento de gasolina  | 5  |
| <b>Figura 1.5</b> - Acidente causado por liberação de isocianato metílico   | 6  |
| <b>Figura 1.6</b> - A usina nuclear após o acidente de Chernobyl – URSS, 1986   | 7  |
| <b>Figura 1.7</b> - Foto aérea de antes e depois da explosão em planta de nitrato de amônia – Iowa, 1994                        | 9  |
| <b>Figura 2.1</b> - Triângulo de Bird   | 16 |
| <b>Figura 3.1</b> - Mapa de situação da unidade   | 20 |
| <b>Figura 3.2</b> - Diagrama de blocos dos subsistemas da unidade de armazenamento e distribuição de cloro                      | 22 |
| <b>Figura 4.1</b> - Exemplo de planilha utilizada em HAZOP  | 28 |
| <b>Figura 4.2</b> - Esquema da aplicação do HAZOP   | 30 |
| <b>Figura 4.3</b> - Planilha de Análise Preliminar de Perigo  | 33 |
| <b>Figura 4.4</b> - Matriz de classificação de risco  | 36 |
| <b>Figura 4.5</b> - Legenda da matriz de classificação de risco – Frequência x Severidade                                       | 37 |
| <b>Figura 4.6</b> - Número de cenários classificados em cada categoria de risco   | 38 |
| <b>Figura 5.1</b> - Árvore de Eventos Genérica  | 41 |
| <b>Figura 6.1</b> - Procedimento para Análise de Consequências  | 45 |
| <b>Figura 6.2</b> - Puff formado pela liberação instantânea de material   | 53 |
| <b>Figura 6.3</b> - Liberação contínua de material  | 53 |
| <b>Figura 6.4</b> - Coeficientes de dispersão para o modelo de nuvem em área rural  | 56 |
| <b>Figura 6.5</b> - Coeficientes de dispersão para o modelo de nuvem em área urbana   | 57 |
| <b>Figura 6.6</b> - Coeficientes de dispersão para o modelo de puff em área urbana  | 57 |
| <b>Figura 7.1</b> - Critérios de tolerabilidade de riscos individuais adotados pela FEPAM                                       | 74 |
| <b>Figura 7.2</b> – Curva de Iso-Risco  | 75 |
| <b>Figura 7.3</b> - Curva F-N de tolerabilidade do risco  | 78 |
| <b>Figura 7.4</b> – Gráfico F-N da instalação em comparação com o critério de aceitabilidade de risco social adotado pela FEPAM | 85 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 1.1</b> - Acidente de Louisville, Kentucky, 1965   | 1  |
| <b>Tabela 1.2</b> - Acidente de Flixborough, Inglaterra, 1974  | 2  |
| <b>Tabela 1.3</b> - Acidente de Seveso, Itália, 1976   | 3  |
| <b>Tabela 1.4</b> - Acidente de Cidade do México, México, 1984   | 4  |
| <b>Tabela 1.5</b> - Acidente de Cubatão, São Paulo, 1984   | 5  |
| <b>Tabela 1.6</b> - Acidente de Bhopal, Índia, 1984  | 6  |
| <b>Tabela 1.7</b> - Acidente de Chernobyl, URSS, 1986  | 7  |
| <b>Tabela 1.8</b> - Acidente de Pasadena, Texas, 1989  | 8  |
| <b>Tabela 1.9</b> - Acidente de Sterlington, Louisiana, 1991   | 8  |
| <b>Tabela 1.10</b> - Acidente de Port Neal, Iowa, 1994   | 9  |
| <b>Tabela 1.11</b> - Acidente de Belpre, Ohio, 1994  | 10 |
| <b>Tabela 2.1</b> - Principais propriedades físico-químicas do cloro   | 14 |
| <b>Tabela 2.2</b> - Efeitos da exposição ao cloro  | 15 |
| <b>Tabela 3.1</b> - Características populacionais do entorno   | 19 |
| <b>Tabela 3.2</b> - Frequências relativas de ventos na região  | 21 |
| <b>Tabela 3.3</b> - Alarmes de pressão do SS-2   | 24 |
| <b>Tabela 3.4</b> - Discos de ruptura do SS-2  | 24 |
| <b>Tabela 4.1</b> - Análise comparativa entre APP e HAZOP  | 25 |
| <b>Tabela 4.2</b> - Palavras-guia usadas na execução do HAZOP  | 27 |
| <b>Tabela 4.3</b> - Categorias de frequências dos cenários usados na APP   | 35 |
| <b>Tabela 4.4</b> - Categoria de severidade das consequências dos cenários acidentais                                      | 36 |
| <b>Tabela 4.5</b> - Cenários escolhidos para simulações de consequências   | 39 |
| <b>Tabela 5.1</b> - Frequências de ocorrências anuais  | 42 |
| <b>Tabela 5.2</b> - Frequência do evento iniciador 01 ( <b>EI-01</b> )   | 43 |
| <b>Tabela 5.3</b> - Frequência do evento iniciador 02 ( <b>EI-02</b> )   | 43 |
| <b>Tabela 5.4</b> - Frequência do evento iniciador 03 ( <b>EI-03</b> )   | 44 |
| <b>Tabela 5.5</b> - Frequência do evento iniciador 04 ( <b>EI-04</b> )   | 44 |
| <b>Tabela 6.1</b> - Dados para o cálculo da taxa de vazamento do cenário 02  | 50 |
| <b>Tabela 6.2</b> - Dados para o cálculo da taxa de vazamento do cenário 05  | 51 |
| <b>Tabela 6.3</b> - Classes de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gifford  | 56 |
| <b>Tabela 6.4</b> - Equações dos coeficientes de dispersão de Pasquill-Gifford para nuvem, com distância à fonte em metros | 58 |
| <b>Tabela 6.5</b> - Equações dos coeficientes de dispersão de Pasquill-Gifford para puff, com distância à fonte em metros  | 58 |
| <b>Tabela 6.6</b> - Dados e resultados para o cálculo das concentrações  | 61 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 6.7</b> - Dados e resultados para o cálculo das concentrações                        | 62 |
| <b>Tabela 6.8</b> - Dados e resultados para o cálculo das concentrações                        | 62 |
| <b>Tabela 6.9</b> - Dados e resultados para o cálculo das concentrações                        | 63 |
| <b>Tabela 6.10</b> - Dados e resultados para o cálculo das concentrações                       | 63 |
| <b>Tabela 6.11</b> - Dados e resultados para o cálculo das concentrações                       | 64 |
| <b>Tabela 6.12</b> - Dados e resultados para o cálculo das concentrações                       | 64 |
| <b>Tabela 6.13</b> - Dados e resultados para o cálculo das concentrações                       | 65 |
| <b>Tabela 6.14</b> - Dados e resultados para o cálculo das concentrações                       | 66 |
| <b>Tabela 6.15</b> - Dados e resultados para o cálculo das concentrações                       | 66 |
| <b>Tabela 6.16</b> - Dados e resultados para o cálculo das concentrações                       | 67 |
| <b>Tabela 6.17</b> - Dados e resultados para o cálculo das concentrações                       | 67 |
| <b>Tabela 6.18</b> - Dados e resultados para o cálculo das concentrações                       | 68 |
| <b>Tabela 6.19</b> - Dados e resultados para o cálculo das concentrações                       | 68 |
| <b>Tabela 6.20</b> - Relação entre Probit e percentagem de morte na área afetada               | 70 |
| <b>Tabela 6.21</b> - Parâmetros para a equação Probit relativos ao cloro                       | 70 |
| <b>Tabela 6.22</b> - Probabilidades de fatalidade  | 71 |
| <b>Tabela 6.23</b> - Probabilidades de fatalidade  | 72 |
| <b>Tabela 7.1</b> - Riscos individuais para EI-01  | 76 |
| <b>Tabela 7.2</b> - Riscos individuais para EI-02  | 76 |
| <b>Tabela 7.3</b> - Riscos individuais para EI-04  | 77 |
| <b>Tabela 7.4</b> – Cálculo do número de fatalidades para EI-01 e $u = 1,0 \text{ m/s}$        | 80 |
| <b>Tabela 7.5</b> - Cálculo do número de fatalidades para EI-01 e $u = 3,0 \text{ m/s}$        | 81 |
| <b>Tabela 7.6</b> - Cálculo do número de fatalidades para EI-01 e $u = 5,0 \text{ m/s}$        | 82 |
| <b>Tabela 7.7</b> – Número de fatalidades X frequência de ocorrência                           | 83 |
| <b>Tabela 7.8</b> – Frequência acumulada para os acidentes relacionados com vazamento de cloro | 84 |



## 1 INTRODUÇÃO

Processos contendo materiais perigosos estão presentes nos mais variados tipos de negócios, sejam eles de grande ou pequeno porte. Tais processos, caracterizados por seus riscos inerentes, apresentam significativa probabilidade de acidentes que envolvem a liberação de produtos tóxicos ou perigosos.

A dispersão de gases e vapores (tóxicos e inflamáveis) na atmosfera constitui uma ameaça severa aos trabalhadores das indústrias e os efeitos podem ir além dos limites da empresa, afetando a população próxima das áreas de armazenamento onde estes produtos são controlados (FONTANIVE, 2005).

A exposição a produtos potencialmente tóxicos pode causar sérios danos à saúde humana causando mortandade ou morbidade entre os expostos, ou mesmo enfermidades retardadas. Além disso, pode afetar também os sistemas que compõem o meio ambiente local (PEREIRA, 2003).

Os acidentes graves que ocorrem todos os anos na indústria causam não apenas perdas de vidas como também danos financeiros, alcançando cifras elevadas. Segundo J&H Marsh & McLennan (2003), os 100 maiores prejuízos entre os anos de 1972 a 2001 da indústria química totalizaram 10,8 bilhões de dólares, tendo custado em média 108 milhões de dólares por incidente.

Portanto, faz-se necessário a identificação antecipada de todos os fatores que geram ameaças de acidentes e o aprofundamento dos conhecimentos que permitam a elaboração de mecanismos de prevenção dos mesmos, visando evitar a ocorrência de possíveis perdas.

O breve histórico de acidentes, apresentado a seguir, evidencia a necessidade de gerenciamento de segurança de processos e análises de riscos.

- **Louisville, EUA - 1965**

Tabela 1.1 - Acidente de Louisville, Kentucky, 1965

| Local do acidente     | Ano  | Instalação                   | Força destrutiva    | Perdas                    | Prejuízo (US\$) |
|-----------------------|--|------------------------------|---------------------|---------------------------|-----------------|
| Louisville, Kentucky  | 1965   | Fábrica de produtos químicos | Explosão e incêndio | *12 mortes<br>*61 feridos | 52 milhões      |
| Descrição do acidente | Explosão de duas unidades normais e uma unidade experimental de processamento de vinil acetileno. Foram identificadas temperaturas altas resultantes de falha mecânica ocorrida no compressor de vinil acetileno. As temperaturas elevadas deram início ao processo de decomposição química que se disseminou e atingiu unidades adjacentes. Este trágico evento fez com que mudanças importantes fossem introduzidas em programas da empresa para eliminar incidentes relacionados com processos. |                              |                     |                           |                 |

Fonte: Elaboração própria com base no Manual de Análise de Risco da Petrobras



- **Flixborough, Inglaterra – 1974**

Tabela 1.2 - Acidente de Flixborough, Inglaterra, 1974

| Local do acidente       | Ano  | Instalação                        | Força destrutiva    | Perdas     | Prejuízo (US\$) |
|-------------------------|--|-----------------------------------|---------------------|------------|-----------------|
| Flixborough, Inglaterra | 1974   | Unidade produtora de caprolactama | Explosão e incêndio | *28 mortes | 182 milhões     |
| Descrição do acidente   | Explosão causada pela falha de uma interligação de 20" através de uma tubulação temporária contendo duas juntas de expansão, entre dois reatores, substituindo um reator que havia sido retirado para manutenção. Uma nuvem de vapor de ciclohexano a 10 atm e 150°C foi liberada após o colapso de uma das juntas de expansão; esta nuvem chegou até uma fábrica de hidrogênio situada nas proximidades – a fonte de ignição mais provável. A referida instalação da tubulação temporária não havia sido considerada risco potencial, e sim trabalho rotineiro. Este incidente é um dos mais citados pela imprensa em toda a história, e suas consequências conduziram ao aperfeiçoamento dos conhecimentos relativos a explosões de nuvem de vapor não confinada (UVCE – Unconfined Vapor Cloud Explosions). |                                   |                     |            |                 |

Fonte: Elaboração própria com base em “Large Property Damage Losses in the Hydrocarbon-Chemical Industries” - 20th Ed.

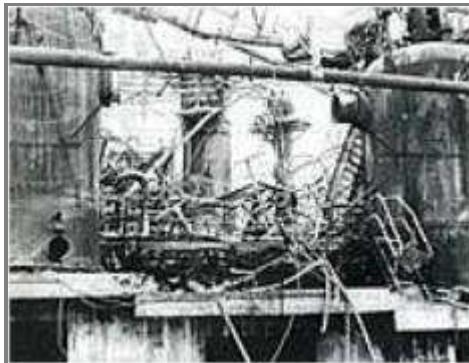


Figura 1.1 - Acidente em unidade produtora de caprolactama  
Fonte: Loss Prevention in the Process Industries, Frank P. Less

- **Seveso, Itália – 1976**

Tabela 1.3 - Acidente de Seveso, Itália, 1976

| Local do acidente            | Ano   | Instalação                       | Força destrutiva     | Perdas  | Prejuízo (US\$)                       |
|------------------------------|---|----------------------------------|----------------------|---|---------------------------------------|
| <b>Seveso, Itália</b>        | 1976  | Fábrica de produtos agroquímicos | Liberação de dioxina | <ul style="list-style-type: none"> <li>*Mortes de animais e vegetação</li> <li>*Pessoas com incidência de câncer acima do normal</li> <li>*Efeitos imediatos à saúde: 193 casos de cloroacne (doença de pele atribuída ao contato com a dioxina)</li> <li>*Efeitos à saúde de longo prazo: ainda monitorados</li> </ul> | Não disponível nas fontes consultadas |
| <b>Descrição do acidente</b> | Desenvolveu-se alta pressão em um reator em batelada, houve liberação de subprodutos em altas temperaturas para a atmosfera através de um disco de ruptura. O conteúdo incluía aproximadamente 2 kg de dioxina. O material causou amplos danos em vegetação, animais e população. O governo italiano declarou estado de emergência, evacuou comunidades rurais situadas na área da fábrica e solicitou assistência internacional para estabilização da área e definição de técnicas para limpeza. |                                  |                      |   |                                       |

Fonte: Elaboração própria com base nos dados da CETESB



Figura 1.2 - Casos de Cloroacne, desenvolvidos após acidente com liberação de dioxina

Fonte: Banco de Imagens CETESB



- **Cidade do México, México – 1984**

Tabela 1.4 - Acidente de Cidade do México, México, 1984

| Local do acidente               | Ano  | Instalação   | Força destrutiva               | Perdas  | Prejuízo (US\$) |
|---------------------------------|--|--|--------------------------------|---|-----------------|
| <b>Cidade do México, México</b> | 1984   | Base de armazenamento e distribuição de gás liquefeito de petróleo (GLP) | Explosão e uma série de BLEVEs | *650 mortes<br>*Mais de 6.000 feridos<br>*Destrução total da base | 29 milhões      |
| <b>Descrição do acidente</b>    | A catástrofe iniciou-se com o vazamento de gás devido à ruptura de uma tubulação de 8" de diâmetro que transportava o GLP. A liberação aconteceu por cerca de 5 a 10 minutos, formando uma imensa nuvem de gás inflamável, a qual foi levada por um vento de destino sudoeste, ajudado pela inclinação do terreno, até encontrar a fonte de ignição e explodir. Neste caso, a fonte de ignição direta foi o "flare" instalado inadequadamente ao nível do solo. A explosão da nuvem atingiu cerca de 10 residências e iniciou o incêndio nas instalações da base. A vizinhança pensou tratar-se de um terremoto devido ao forte barulho da explosão. Um minuto após o primeiro BLEVE, aconteceu o mais violento desta catástrofe, gerando uma bola de fogo com mais de 300 m de diâmetro. Ocorreram mais de 15 explosões, diversos BLEVEs e explosões dos caminhões-tanque e botijões. |  |                                |   |                 |

Fonte: Elaboração própria com base em "Large Property Damage Losses in the Hydrocarbon-Chemical Industries" - 20th Ed.



Figura 1.3 - Acidente causado por liberação de GLP

Fonte: Loss Prevention in the Process Industries

- **Cubatão, Brasil – 1984**

Tabela 1.5 - Acidente de Cubatão, São Paulo, 1984

| Local do acidente     | Ano   | Instalação   | Força destrutiva                 | Perdas  | Prejuízo (US\$)                       |
|-----------------------|---|--|----------------------------------|---|---------------------------------------|
| Vila Socó, São Paulo  | 1984  | Oleodutos da Petrobrás que ligavam a refinaria Presidente Bernardes ao terminal de Alemoa. | Vazamento de gasolina e incêndio | *93 mortes (dado oficial)<br>*500 mortes (dado extraoficial)<br>*Dezenas de feridos<br>*Destrução parcial da vila | Não disponível nas fontes consultadas |
| Descrição do acidente | Um operador alinhou inadequadamente e iniciou a transferência de gasolina para uma tubulação que se encontrava fechada (falha operacional), gerando sobrepressão e ruptura da mesma, o que acarretou em um vazamento de cerca de 700 mil litros de gasolina. A tubulação passava em região alagadiça, em frente a uma vila constituída por palafitas. Muitos moradores, visando conseguir algum dinheiro com a venda de combustível, coletaram e armazenaram parte do produto vazado em suas residências. Com a movimentação das marés, o produto inflamável espalhou-se pela região alagada e cerca de 2 horas após o vazamento, aconteceu a ignição seguida de incêndio. O fogo se alastrou por toda a área alagadiça superficialmente coberta pela gasolina, incendiando as palafitas. |  |                                  |   |                                       |

Fonte: Elaboração própria com base nos dados da CETESB



Figura 1.4 - Incêndio decorrente de vazamento de gasolina

Fonte: Banco de Imagens CETESB

- **Bhopal, Índia - 1984**

Tabela 1.6 - Acidente de Bhopal, Índia, 1984

| Local do acidente            | Ano   | Instalação             | Força destrutiva                 | Perdas  | Prejuízo (US\$)                       |
|------------------------------|---|------------------------|----------------------------------|---|---------------------------------------|
| <b>Bhopal, Índia</b>         | 1984  | Fábrica de inseticidas | Liberação de isocianato metílico | *Aproximadamente 3.000 mortes<br>*Mais de 10.000 pessoas feridas (muitos ficaram cegos) | Não disponível nas fontes consultadas |
| <b>Descrição do acidente</b> | Tanque de armazenagem com pressão excessiva causou liberação de grandes proporções de isocianato metílico, produto químico altamente tóxico. A nuvem de gás atingiu densamente os povoados, tendo ocasionado muitas mortes. Os sistemas de segurança instalados para evitar este tipo de incidente não funcionaram na ocasião da liberação. |                        |                                  |   |                                       |

Fonte: Elaboração própria com base nos dados da CETESB



Figura 1.5 - Acidente causado por liberação de isocianato metílico

Fonte: Banco de Imagens CETESB

- **Chernobyl, Rússia – 1986**

Tabela 1.7 - Acidente de Chernobyl, URSS, 1986

| Local do acidente            | Ano  | Instalação                                | Força destrutiva                           | Perdas   | Prejuízo (US\$)   |
|------------------------------|------|---|--|--|---|
| Chernobyl, Rússia            | 1986 | Reator nuclear com moderadores de grafite | Liberação de produtos de fissão radioativa | *31 mortes (conforme relato)<br>*50.000 pessoas evacuadas permanentemente<br>*777 km <sup>2</sup> inadequados para habitação | Não disponível nas fontes consultadas   |
| <b>Descrição do acidente</b> |      |   |  |  | Durante desativação de reator nuclear de 1.000 MW (megawatts), foi realizado um teste para determinar se o calor residual poderia ser utilizado para geração de energia elétrica. Diversos sistemas de segurança foram desviados para permitir a execução dos testes, bem como muitos bastões de controle e de segurança foram retirados. A reação nuclear tornou-se descontrolada, e ocorreu uma explosão de hidrogênio / monóxido de carbono / ar que rompeu o teto de 3 metros de espessura do vaso de contenção e liberou grande quantidade de material radioativo. |

Fonte: Elaboração própria com base no Manual de Análise de Risco da Petrobras

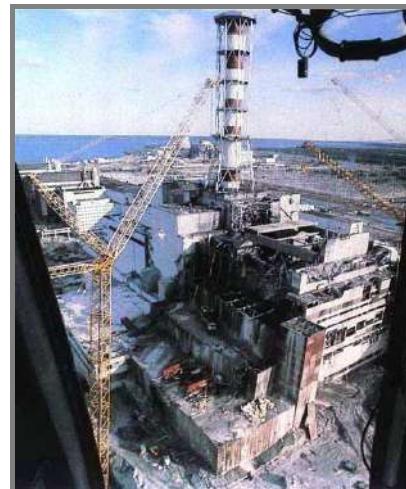
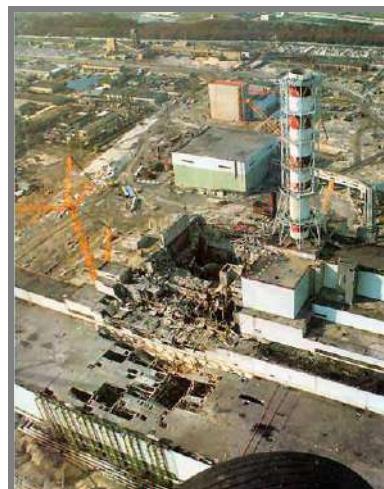


Figura 1.6 - A usina nuclear após o acidente de Chernobyl – URSS, 1986

Fonte: [www.wreckedexotics.com/articles/011.shtml](http://www.wreckedexotics.com/articles/011.shtml) e [www.areaseg.com/chernobil.html](http://www.areaseg.com/chernobil.html)



- **Pasadena, EUA – 1989**

Tabela 1.8 - Acidente de Pasadena, Texas, 1989

| Local do acidente     | Ano  | Instalação             | Força destrutiva   | Perdas                     | Prejuízo (US\$) |
|-----------------------|--|------------------------|--|----------------------------|-----------------|
| Pasadena, Texas       | 1989   | Fábrica de polietileno | Explosão e incêndio de nuvem de etileno e vapor de isobutano | *23 mortes<br>*130 feridos | 869 milhões     |
| Descrição do acidente | Durante operação de limpeza de polietileno, executada na zona de sedimentação de um reator contínuo de polietileno operando com pressão e temperatura elevadas, foi cometido desvio no posicionamento da válvula que isolava o reator da zona de sedimentação. Em menos de 2 minutos escaparam aproximadamente 38,6 toneladas de etileno e isobutano do reator formando uma nuvem de vapor, a qual se inflamou. Aproximadamente 10 minutos depois explodiram dois tanques de isobutano, e incêndios alastraram-se a partir de cada uma destas explosões. |                        |  |                            |                 |

Fonte: Elaboração própria com base em "Large Property Damage Losses in the Hydrocarbon-Chemical Industries" - 20th Ed.

- **Sterlington, EUA – 1991**

Tabela 1.9 - Acidente de Sterlington, Louisiana, 1991

| Local do acidente      | Ano  | Instalação             | Força destrutiva    | Perdas  | Prejuízo (US\$) |
|------------------------|--|------------------------|---------------------|---|-----------------|
| Sterlington, Louisiana | 1991   | Refinaria petroquímica | Incêndio e explosão | *8 mortes<br>*123 feridos<br>*30 famílias temporariamente sem moradia | 129 milhões     |
| Descrição do acidente  | Durante inspeção no compressor de uma unidade de nitroparafina, um pequeno incêndio foi percebido pelos trabalhadores da fábrica. Embora o alarme de incêndio tenha sido imediatamente acionado, cerca de 30 segundos depois ocorreu uma explosão seguida de várias menores. Efeitos da explosão inicial foram percebidos em um raio de até 12,9 km de distância. Além disso, a explosão destruiu completamente uma área da fábrica com tamanho aproximado de um quarteirão. Foi relatado que incêndios subsequentes duraram mais de sete horas. Toda a fábrica foi temporariamente desativada como medida de precaução. |                        |                     |   |                 |

Fonte: Elaboração própria com base em "Large Property Damage Losses in the Hydrocarbon-Chemical Industries" - 20th Ed.

- **Port Neal, EUA – 1994**

Tabela 1.10 - Acidente de Port Neal, Iowa, 1994

| Local do acidente     | Ano  | Instalação                    | Força destrutiva | Perdas                                     | Prejuízo (US\$) |
|-----------------------|--|-------------------------------|------------------|--|-----------------|
| Port Neal, Iowa       | 1994   | Processo de nitrato de amônia | Explosão         | *4 mortes<br>*60 milhões de lucro cessante | 140 milhões     |
| Descrição do acidente | Explosão destruiu edifício de sete pavimentos e criou uma cratera com 9,1 metros de diâmetro. Fragmentos metálicos da explosão perfuraram tanques de armazenagem de amônia e ácido nítrico. O vazamento subsequente de 5.700 toneladas de amônia causou a evacuação de aproximadamente 2.500 pessoas. A explosão danificou três estações de geração elétrica e quebrou janelas até 25,7 km de distância. |                               |                  |  |                 |

Fonte: Elaboração própria com base em “Large Property Damage Losses in the Hydrocarbon-Chemical Industries” - 20th Ed.

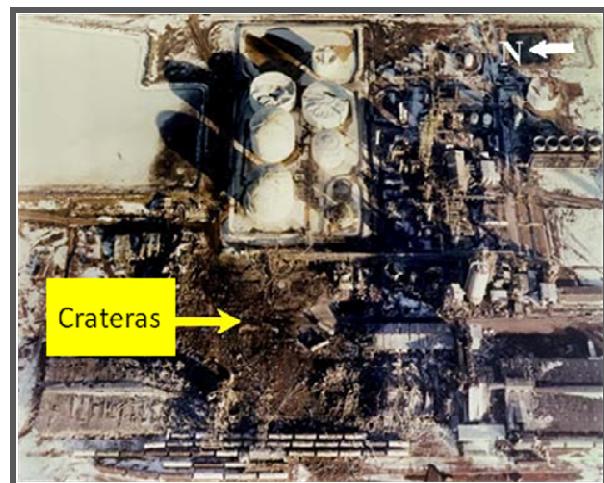


Figura 1.7 - Foto aérea de antes e depois da explosão em planta de nitrato de amônia – Iowa, 1994

Fonte: [www.exponent.com/processes\\_plant\\_explosion/](http://www.exponent.com/processes_plant_explosion/)



- **Belpre, EUA – 1994**

Tabela 1.11 - Acidente de Belpre, Ohio, 1994

| Local do acidente     | Ano   | Instalação                    | Força destrutiva    | Perdas    | Prejuízo (US\$) |
|-----------------------|---|-------------------------------|---------------------|-----------|-----------------|
| Belpre, Ohio          | 1994  | Fábrica de borracha sintética | Explosão e incêndio | *3 mortes | 118 milhões     |
| Descrição do acidente | Explosão ocorrida na área do reator destruiu-o completamente, além da sala de controle e o edifício. Cinco tanques de armazenagem de estireno explodiram, sendo um tanque de aproximadamente 2.000 m <sup>3</sup> . Esforços de combate ao incêndio impediram que outros tanques contendo butadieno fossem também atingidos pelas chamas. |                               |                     |           |                 |

Fonte: Elaboração própria com base em "Large Property Damage Losses in the Hydrocarbon-Chemical Industries" - 20th Ed.

É importante definir de maneira precisa a magnitude e probabilidade de risco que possuem as indústrias já estabelecidas, com o propósito de controlá-lo e mantê-lo dentro de níveis aceitáveis para a segurança da população e do meio ambiente (MONTES, A. L.; BARBARÍN, C. R.; CATILLO, J.M.B.; GRANADOS, O. H., 2002).

A proposta deste trabalho é realizar um estudo de análise de risco a uma unidade de armazenagem e distribuição de cloro. Este estudo visa identificar, analisar e quantificar os riscos e consequências de possíveis acidentes envolvendo os equipamentos e processos desta instalação.

O presente estudo foi dividido em oito capítulos que tratam de aspectos relacionados à Análise de Risco, buscando evidenciar a extrema importância do estudo da segurança de processos para o meio ambiente, a população em geral e a economia.

É apresentada no segundo capítulo uma revisão bibliográfica referente ao conceito de análise de risco, assim como um descriptivo dos métodos mais utilizados na identificação e avaliação dos riscos em potencial. Também são fornecidas as principais características da substância cloro.

No capítulo três é feita uma descrição geral das instalações da unidade em estudo e da ocupação do entorno da unidade. Também são apresentadas as principais características meteorológicas da região.

O quarto capítulo trata da identificação dos perigos através da aplicação das técnicas de Análise de Perigos e Operabilidade (HAZOP) e Análise Preliminar de Perigo (APP).

No capítulo seguinte são calculadas as frequências dos cenários relativos aos acidentes, através da aplicação da técnica de Árvore de Eventos.



O capítulo seis trata da análise de consequências e de vulnerabilidade, onde são descritos e utilizados os Modelos de Taxa de Vazamento, Modelos de Dispersão e o PROBIT.

A Avaliação dos Riscos, Individual e Social, é discutida no sétimo capítulo.

As conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no capítulo oito.

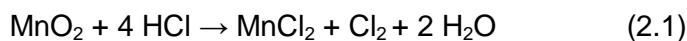


## 2 CONCEITOS E FUNDAMENTOS

Neste capítulo é apresentado um breve histórico sobre a substância CLORO e suas aplicações, e também são listadas algumas das suas propriedades físico-químicas e toxicológicas. Além disso, é descrita a metodologia utilizada em uma Análise de Risco de Processo, bem como, as técnicas aplicadas para sua execução.

### 2.1 Sobre o Cloro

O cloro foi descoberto no ano de 1774 pelo pesquisador sueco Carl Wilhelm Scheele, acreditando que se tratava de um composto contendo oxigênio. Obteve-o a partir da reação de dióxido de manganês com ácido clorídrico (Eq. 2.1).



Em 1810 o químico inglês Humphery Davy demonstrou que se tratava de um elemento químico, e lhe deu o nome de cloro devido à sua coloração amarelo-esverdeada.

Na Alemanha, em 1890, foi fabricado pela primeira vez o cloro eletrolítico, produzido comercialmente pela eletrólise da solução de cloreto de sódio. Até hoje este processo de fabricação é empregado, por se tratar de uma técnica relativamente simples (CETESB, 1974).

O cloro é amplamente distribuído na natureza, embora não em estado puro, já que reage facilmente com a maior parte dos elementos. Apresenta-se sob a forma de cloretos e cloratos, sobretudo como cloreto de sódio nas minas de sal gema e dissolvido na água do mar.

A principal aplicação do cloro é no tratamento de água, devido às suas características desinfetantes, destruindo bactérias prejudiciais e outros microorganismos. O processo de purificação mais amplamente utilizado é a cloração, usada com sucesso no controle das infecções transmitidas pela água por mais de um século. O agente é o ácido hipocloroso,  $\text{HClO}$ , que se produz dissolvendo cloro na água e regulando o pH.

O gás cloro é usado em uma variedade de outras aplicações, como oxidante, desinfetante, no branqueamento durante a produção de papel e também na síntese de numerosos compostos orgânicos e inorgânicos como, por exemplo, cloreto de vinila, tetracloreto de carbono ( $\text{CCl}_4$ ), clorofórmio ( $\text{CHCl}_3$ ) e diferentes halogenetos metálicos.

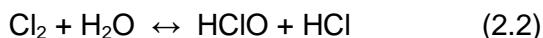
Devido à sua reatividade e facilidade de se ligar com outras substâncias, o cloro se tornou um elemento fundamental na química, com crescente interesse econômico. Produtos farmacêuticos, plásticos, vernizes, equipamentos eletrônicos, vestimentas e peças automobilísticas são exemplos de grupos de produtos que dependem da química do cloro (The Chlorine Institute, 2009).



### 2.1.1 Propriedades físico-químicas

O cloro é um elemento químico, com massa atômica 35,453, localizado na série dos halogênios (grupo 17 ou 7A). Quase sempre se apresenta em sua forma diatômica,  $\text{Cl}_2$ . Em condições normais de temperatura e pressão, é encontrado no estado gasoso. É abundante na natureza e essencial para muitas formas de vida.

Cloro é ligeiramente solúvel em água (8,30 kg/m<sup>3</sup>, a 15,6°C e 1 atm), formando uma solução fraca de ácido clorídrico e ácido hipocloroso (Eq. 2.2).



Na maioria dos compostos que forma apresenta estado de oxidação -1, mas pode combinar-se também com valências de +1, +2, +3, +4, +5 ou +7.

O cloro tem odor característico, penetrante e irritante. O gás apresenta coloração amarelo esverdeada, sendo duas vezes e meia mais pesado do que o ar. O cloro líquido é de cor âmbar (amarelo escuro), e é cerca de uma vez e meia mais pesado do que a água.

No estado gasoso ou líquido não é explosivo nem inflamável, entretanto, por ser um oxidante, é capaz de contribuir para a combustão de certas substâncias. O cloro reage com muitos compostos inorgânicos e orgânicos, geralmente com geração de calor. Algumas reações podem ser extremamente violentas, especialmente aquelas com hidrocarbonetos, alcoóis e éteres.

Embora o cloro seco normalmente não reaja ou corroa alguns metais, como cobre ou aço carbono, ele é fortemente reativo (extremamente corrosivo) quando há umidade presente, principalmente por causa dos ácidos clorídrico e hipocloroso formados pela hidrólise. Devem-se tomar precauções para que as instalações de cloro, e o próprio produto, mantenham-se secos.

Muitos compostos organoclorados criam problemas ambientais devido à sua toxicidade como o hexaclorobenzeno (HCB), o P-diclorodifeniltricloroetano (DDT) e o toxafeno, usados como pesticidas, e ainda os difenilos policlorados (PCBs) e as dioxinas. Compostos como os clorofluorocarbonos (CFC's) contribuem para a destruição da camada de ozônio.

As propriedades físico-químicas apresentadas na Tabela 2.1 são referentes ao cloro puro.



Tabela 2.1 – Principais propriedades físico-químicas do cloro

| Nome  | Cloro   |
|---|---|
| <b>Número CAS</b>   | 7782-50-5   |
| <b>Ponto de Ebulação</b>  | - 33,97°C   |
| <b>Ponto de Fusão</b>   | - 100,98°C  |
| <b>Viscosidade do Gás Saturado</b>  | 0,0125 cp (0,0125 mPa.s) a 0°C;<br>0,0132 cp (0,0132 mPa.s) a 15,6°C          |
| <b>Viscosidade do Líquido</b>   | 0,3863 cp (0,3863 mPa.s) a 0°C;<br>0,3538 cp (0,3538 mPa.s) a 15,6°C          |
| <b>Densidade do Gás nas Condições Padrão</b>                                | 3,213 kg/m <sup>3</sup>   |
| <b>Densidade do Gás Saturado</b>  | <sup>1</sup> A 0°C: 12,23 kg/m <sup>3</sup>                                   |
| <b>Densidade do Líquido Saturado</b>  | <sup>2</sup> 1467 kg/m <sup>3</sup> a 0°C;<br>1422 kg/m <sup>3</sup> a 15,6°C |
| <b>Calor Latente de Vaporização</b>   | 288,1 kJ/kg   |
| <b>Calor Específico do Gás Saturado a Pressão Constante (C<sub>p</sub>)</b> | 0,521 kJ/kg.°K a 0°C;<br>0,564 kJ/kg.°K a 25°C                                |
| <b>Calor Específico do Gás Saturado à Volume Constante (C<sub>v</sub>)</b>  | 0,3721 kJ/kg.°K a 0°C;<br>0,3895 kJ/kg.°K a 25°C                              |
| <b>Calor Específico do Líquido Saturado</b>                                 | 0,948 kJ/kg.°K a 0°C;<br>0,975 kJ/kg.°K a 25°C                                |
| <b>Relação C<sub>p</sub>/C<sub>v</sub></b>                                  | 1,400 para gás saturado a 0°C<br>1,448 para gás saturado a 25°C.              |
| <b>Pressão de Vapor</b>   | 53,51 psi (368,9 kPa) a 0°C;<br>112,95 psi (778,8 kPa) a 25°C                 |
| <b>Relação Volume Líquido/Gás</b>   | 456,5   |

<sup>1</sup> Pressão absoluta a 0°C é de 53,51 psi (368,9 kPa)

<sup>2</sup> A pressão absoluta do cloro líquido a 15,6°C é de 86,58 psi (597,0 kPa)

Fonte: Chlorine Manual, Chlorine Institute, 6<sup>a</sup>. Ed., 1997



## 2.1.2 Propriedades toxicológicas

O cloro gasoso é primariamente um irritante das vias respiratórias. Seu odor característico é percebido pelo olfato humano ainda em baixas concentrações (de 0,2 a 3,0 ppm), gerando um alerta de sua presença no ar. A estes níveis, causa leve irritação nos olhos e nas mucosas do aparelho respiratório, após diversas horas de exposição. À medida que a concentração se eleva os sintomas do indivíduo exposto ao cloro também aumentam.

Acima de 5 ppm, o gás é muito irritante e é pouco provável que qualquer pessoa consiga permanecer no local do vazamento submetido a essas condições. Em casos extremos, a dificuldade em respirar pode progredir a ponto de causar morte por colapso respiratório ou falência pulmonar. Já o cloro líquido em contato com a pele ou olhos pode causar queimaduras químicas e/ou ulcerações por congelamento. Estes efeitos podem tornar-se mais severos até 36 horas após o incidente.

O limite de exposição tolerável ao cloro (PEL - Permissible Exposure Level), estabelecido pela Occupational Safety & Health Administration (OSHA – EUA), é de 1ppm. A Conferência Americana de Higienistas Industriais Governamentais (ACGIH) estabeleceu que o limite de tolerância máxima (Threshold Limit Value – TLV) é de 0,5 ppm em oito horas diárias, 40 horas semanais (The Chlorine Institute, 2009).

No Brasil a legislação determina, através da NR- 15, que o Limite Máximo de Tolerância (LT-MP) para até 48 horas de trabalho por semana é de 0,8 ppm ou 2,3 mg/m<sup>3</sup> e o Valor Máximo (VM) de 2,4 ppm.

A Tabela 2.2 apresenta os principais efeitos que o cloro pode ocasionar no ser humano quando inalado.

Tabela 2.2 - Efeitos da exposição ao cloro

| Concentração (ppm) | Efeitos                                |
|--------------------|--|
| 0,2 – 3,0          | Limite de detecção olfatória           |
| 1,0 – 3,0          | Moderada irritação de membranas        |
| 4,0                | Máxima exposição de uma hora           |
| 5,0 – 15           | Moderada irritação das vias superiores |
| 30                 | Tosse intensa com espasmos             |
| 40 – 60            | Concentração perigosa em 30 minutos    |
| 430                | Fatal após 30 minutos                  |
| 1.000              | Fatal em poucos minutos                |

Fonte: MONTES et al.2002, FONTANIVE, 2005

## 2.2 Análise de Riscos

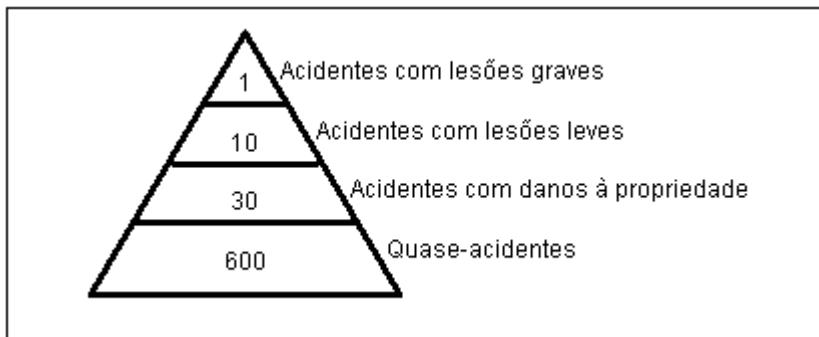
### 2.2.1 Histórico

Na década de 1930, H. W. Heinrich desenvolveu um importante estudo sobre os acidentes ocorridos na indústria norte-americana nos anos 20. Esse trabalho marca o início da diferenciação entre acidente e lesão, mudando o foco do gerenciamento da segurança para a prevenção do acidente e não apenas para a reparação do dano causado ao trabalhador. Heinrich definiu acidente como todo evento não planejado, não controlado e não desejado que interrompa uma atividade ou função.

Em 1966, Frank Bird Jr., após analisar mais de 90.000 casos de ocorrências industriais, publicou o resultado de seu estudo que, com base em dados e projeções estatísticas e financeiras, tinha como finalidade principal reduzir ou eliminar as perdas causadas por acidentes com danos à propriedade, bem como os prejuízos decorrentes das paralisações de produção, sem deixar de contemplar ainda aqueles que apresentaram danos pessoais (SOUZA, 1995).

Esses estudos serviram como base para a filosofia preventiva do "Controle de Perdas" ou "Loss Control". Bird chegou à conclusão que para cada acidente grave (com afastamento) havia cerca de 30 acidentes com prejuízos à propriedade e cerca de 600 incidentes sem perdas pessoais ou materiais. Essa relação é conhecida como triângulo de Bird.

Figura 2.1 - Triângulo de Bird



Fonte: SOUZA, 1995

Em meados dos anos 70, os estudos de Bird foram aperfeiçoados por John A. Fletcher e Hugh M. Douglas. A teoria do controle de perdas foi ampliada, englobando também todos os acidentes passíveis de ocorrência dentro de um sistema, inclusive os relacionados a danos em máquinas, materiais, instalações e meio ambiente. Desta forma, introduziam o conceito de "Controle Total de Perdas" ou "Total Loss Control" (SOUZA, 1995).

Esses modelos de gerenciamento, em conjunto com técnicas de engenharia de confiabilidade, usadas na área militar e aeronáutica, levaram as indústrias petrolíferas, químicas e petroquímicas a adotar a Análise de Riscos de Processo como parte de seus sistemas de segurança. Para isso contribuíram também uma série de acidentes maiores ocorridos nos anos 70 e 80: Seveso, Chernobyl, Cidade do México e Bhopal. Passou-se então a analisar mais criteriosamente os riscos industriais e os métodos para reduzir os mesmos, valendo-se da filosofia de prevenção de perdas para a tomada de decisões técnicas e gerenciais.



## 2.2.2 Conceito de Análise de Riscos

A Análise de Riscos surgiu como instrumento de mitigação e administração de riscos presentes no meio industrial, oferecendo filosofias e técnicas que visam otimizar o uso da tecnologia, a qual sofre avanço acelerado e, não raramente, inconsistente com os padrões mínimos de segurança requeridos em atividades industriais. Sob esta ótica, a prevenção de perdas e, consequentemente, a gerência de riscos, são caracterizadas pelo seu envolvimento com a evolução da tecnologia e com os riscos associados a este desenvolvimento.

A Análise de Riscos de Processo foi estabelecida para maximizar a consciência e o controle de riscos por aqueles que desenvolvem, projetam, operam e mantêm o processo. Esta análise é feita através de um exame sistemático das instalações industriais (pré-existentes ou não), de modo a se identificar os riscos presentes no sistema e tomar ciência de ocorrências potencialmente perigosas e suas possíveis consequências. Seu principal objetivo é promover a construção de um processo decisório de redução de riscos e perdas de um determinado empreendimento, seja esta decisão de caráter interno ou externo à empresa.

Portanto, analisar um risco é identificar, discutir e avaliar as possibilidades de ocorrência de acidentes, na tentativa de se evitar que estes aconteçam e, caso ocorram, identificar as alternativas que tornam mínimos os danos subsequentes a estes acontecimentos. É a possibilidade de se atribuir segurança e confiabilidade aos processos e procedimentos, constituintes do ambiente operacional (SOUZA, 1995).

## 2.3 Técnicas de Análise de Riscos

Prevenir, prever falhas e acidentes, minimizar consequências, auxiliar na elaboração de planos de emergência, estes são alguns dos objetivos da execução de Análise de Riscos em plantas industriais. No entanto, a consagração destes resultados requer a adoção de uma metodologia sistemática e estruturada de identificação e avaliação de riscos, fato este que se verifica através da utilização das técnicas de Análise de Riscos (SOUZA, 1995).

A seguir, seis métodos estão descritos sucintamente.

**APP– Análise Preliminar de Perigo** – trata-se de uma revisão dos principais riscos de uma área, atividade, operação ou equipamento, na qual, para cada risco identificado, são buscadas as causas, os efeitos da materialização do risco, e definidas medidas preventivas ou corretivas. Os riscos são classificados segundo sua severidade. Esta é a técnica mais difundida na Análise de Risco de Processo.

**What if/Checklist – Técnicas “e se” conjugadas com a Lista de Verificação** – esta é uma técnica de uso geral e tão ou mais universal (por sua aplicabilidade e eficácia) que uma APP, e deverá ser considerada como técnica base de ataque na primeira revisão de quase todos os processos. Permite que a equipe debata livremente idéias e sugestões para as situações (e se / what-ifs) que poderiam resultar em eventos perigosos. Após o livre debate de idéias e sugestões, é utilizada a lista de verificação (checklist) para estimular pensamentos relacionados com situações que podem ter sido ignoradas. As técnicas what if e checklist podem ser utilizadas em separado, porém a combinação das duas é recomendada para a obtenção de melhores resultados.



**Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA)** – Esta técnica focaliza a falha de cada um dos componentes de um sistema ou subsistema (bombas, válvulas, controles, vasos, operador, etc.) A equipe avalia os efeitos das falhas dos componentes e prioriza os riscos usando a Matriz de Tolerabilidade de Riscos. Para cada modo de falha de um componente, são revisados os efeitos em outros componentes e no subsistema como um todo, além das possíveis ações de compensação e recomendações para aumento da confiabilidade associada a esse subsistema.

**Estudos de Riscos e Operabilidade (HAZOP)** – Esta técnica examina desvios dos parâmetros operacionais do sistema, e se tais desvios poderão produzir efeito perigoso. Todos os desvios possíveis são estudados com rigor, usando-se palavras-chave para sugerir possíveis desvios para cada parâmetro. A equipe decide se tais desvios poderão resultar em consequências perigosas, pode categorizá-los com a Matriz de Tolerabilidade de Riscos e propor recomendações de melhorias, além de verificar se a reação automática do sistema é capaz de controlar o desvio.

**Análise de Árvore de Falhas (AAF/FTA)** – Esta técnica parte da análise de um evento altamente indesejável pré-selecionado (Evento de topo) e as combinações de sub-eventos são dispostos em diagrama lógico, sendo atribuída (num segundo momento) probabilidade para cada sub-evento ou eventos básicos. A probabilidade de ocorrência do evento principal poderá então ser calculada.

**Análise de Árvore de Eventos (AAE)** – Esta técnica é utilizada na análise de consequências de um evento indesejado. Tem por objetivo identificar as sequências de eventos e os resultados em termos de falhas ou sucessos que possam conduzir a acidentes a partir da análise de um dado evento inicial. Pode ser usada na fase de projeto para avaliação dos sistemas de segurança.

Este trabalho utiliza o **HAZOP** e a **Análise Preliminar de Perigo** para identificação dos perigos. Também é utilizada a Árvore de Eventos para o cálculo das frequências dos cenários de acidentes. Estas técnicas são apresentadas em detalhe nos capítulos subsequentes.



### 3 DESCRIÇÃO DA REGIÃO E DA INSTALAÇÃO DE INTERESSE

Neste capítulo são apresentados os dados gerais sobre a região onde se localizam as instalações da unidade de armazenamento e distribuição de cloro. Estes dados correspondem ao mapa de localização, dados populacionais e dados meteorológicos. Além disso, é feita uma descrição sucinta das principais características técnicas das instalações e sistemas em estudo.

#### 3.1 Ocupação da vizinhança

A região estudada é ocupada por indústrias, residências e pequeno comércio. O mapa de situação está representado na Figura 3.1 e a Tabela 3.1 descreve a vizinhança (ID), a ocupação, a população, a densidade demográfica e a área ocupada. Além das regiões indicadas na figura, há ainda casas ao lado sul (1.647 habitantes) e uma escola a 1,9 km na direção sudoeste (730 pessoas).

Tabela 3.1 – Características populacionais do entorno

| ID | Ocupação                   | População<br>(nº. de habitantes) | Densidade<br>(h/m <sup>2</sup> ) | Área<br>(m <sup>2</sup> ) |
|----|----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| 1  | Casas – Lado Leste         | 1.788                            | 0,01                             | 178.893                   |
| 2  | Bayer – Indústria Química  | 1.500                            | 0,17*10 <sup>-1</sup>            | 86.676                    |
| 3  | Incinerador – Bayer        | 10                               | 0,06*10 <sup>-2</sup>            | 15.032                    |
| 4  | Lado leste – desocupado    | 0                                | 0,00                             | 117.628                   |
| 5  | Lado oeste – área da Bayer | 0                                | 0,00                             | 140.386                   |
| 6  | Lado norte – desocupado    | 0                                | 0,00                             | 147.486                   |
| 7  | Escola 1<br>(1 km)         | 630                              | 0,31                             | 2.000                     |
| 8  | Escola 2<br>(1,5 km)       | 480                              | 0,26                             | 1.800                     |

Fonte: Dados obtidos na área industrial

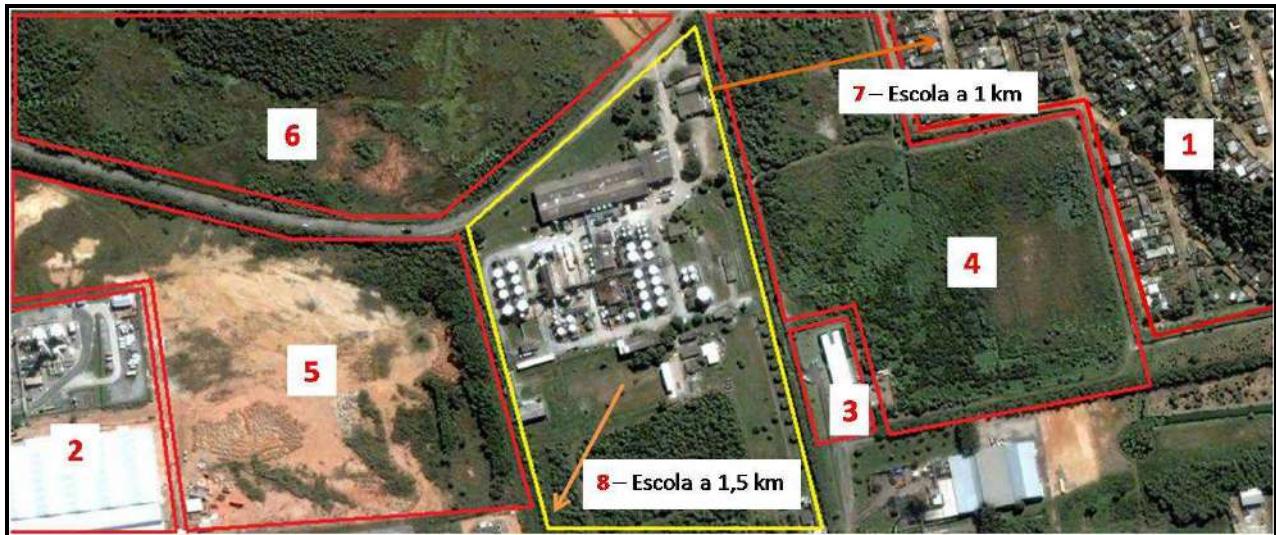


Figura 3.1 – Mapa de situação da unidade

### **3.2 Características meteorológicas**

Os dados meteorológicos relativos à direção e velocidade do vento são apresentados sob a forma de tabela de frequências (Tabela 3.2). Foram consideradas oito direções (Norte, Nordeste, Leste, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste e Noroeste) e os valores de velocidade, obtidos na área em estudo, foram classificados em três faixas:

- Velocidade média 1,0 m/s: 0 - 2,0 m/s
- Velocidade média 3,0 m/s: 2,0 - 4,0 m/s
- Velocidade média 5,0 m/s: > 4,0 m/s

Estas faixas de velocidade são representativas das condições meteorológicas da região e descrevem as diferenças no processo de dispersão da nuvem, cobrindo adequadamente todo o conjunto dos valores de velocidades do vento obtidos no local.



Tabela 3.2 – Frequências percentuais de ventos na região

| Direção/Velocidade dos ventos | 1,0 m/s | 3,0 m/s | 5,0 m/s | Total |
|-------------------------------|---------|---------|---------|-------|
| N                             | 7,81    | 3,71    | 0,55    | 12,07 |
| NE                            | 8,71    | 6,48    | 0,5     | 15,70 |
| E                             | 7,34    | 7,40    | 1,01    | 15,75 |
| SE                            | 4,86    | 5,29    | 7,59    | 17,74 |
| S                             | 3,67    | 4,70    | 6,69    | 15,06 |
| SW                            | 2,31    | 0,97    | 2,08    | 5,36  |
| W                             | 3,27    | 3,36    | 2,70    | 9,33  |
| NW                            | 4,48    | 3,41    | 1,10    | 8,99  |
| Total                         | 42,46   | 35,32   | 22,22   | 100   |

Fonte: Dados obtidos na área industrial

Os valores de latitude e longitude são, respectivamente, 22°54' S e 43°09' W.

Demais parâmetros meteorológicos:

Temperatura do Ar: 298 K.

Temperatura do Solo: 302 K.

Pressão Atmosférica: 1 atm.

Umidade Relativa: 83%.

Classe de Estabilidade Atmosférica: D - Neutra.

Rugosidade do Solo: Área industrial com poucos prédios.

### 3.3 Descrição geral das instalações da unidade

A unidade industrial está localizada em Belford Roxo, na estrada Belford Roxo 1375, com um efetivo de 70 funcionários e 100 empregados terceirizados e destina-se a produção de aditivos químicos. A área industrial é composta basicamente dos seguintes setores:

**Bacias I, II, III e IV** – onde são estocadas matérias-primas, intermediários e produtos acabados. É onde está localizada a unidade de armazenamento e distribuição de cloro.

Prédio de processo – onde estão os reatores utilizados na produção de aditivos.

Prédio de mistura – onde são realizadas as misturas para obtenção de produtos.

Prédio de utilidades – geração de vapor, água de refrigeração, etc.

Prédio de armazenagem – armazenagem de embalagens de produtos acabados e insumos para o processo.

O diagrama P & ID da unidade de armazenamento e distribuição de cloro encontra-se no Anexo A2.

Para auxiliar o entendimento, a unidade foi dividida em subsistemas, conforme apresentado no diagrama de blocos da Figura 3.2.

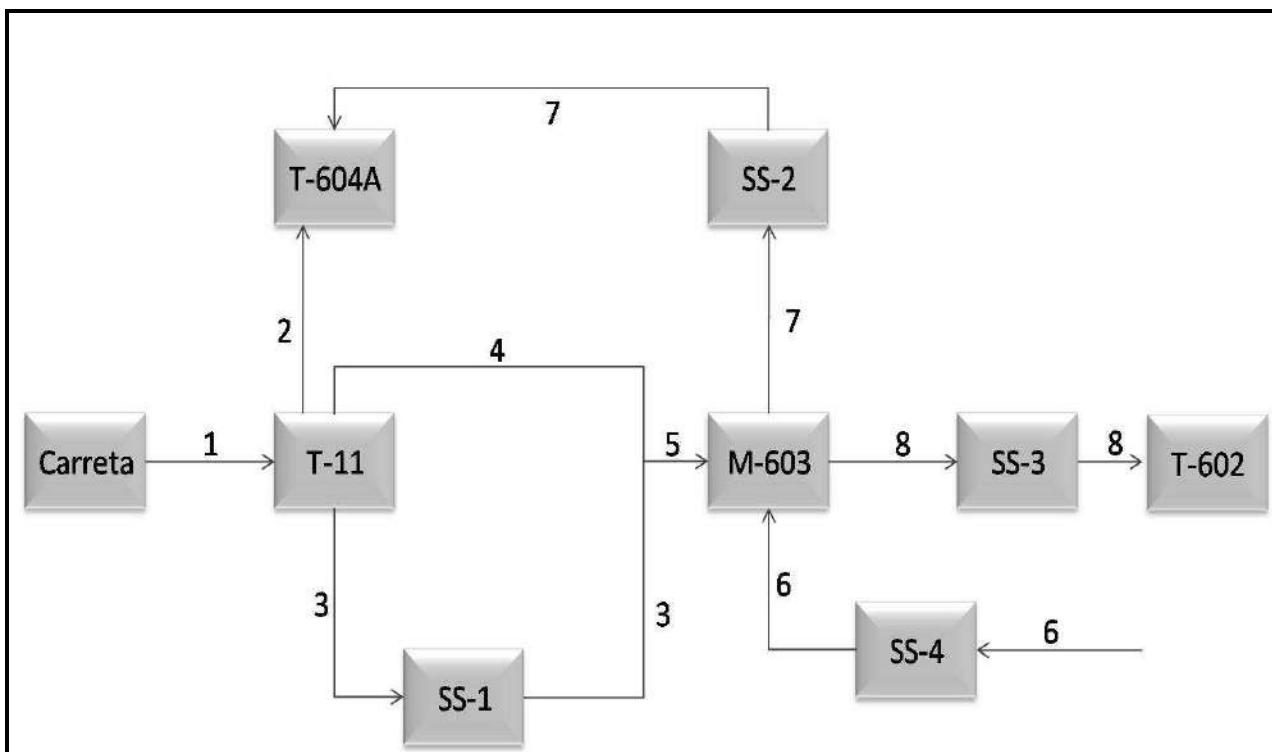


Figura 3.2 – Diagrama de blocos dos subsistemas da unidade de armazenamento e distribuição de cloro

As descrições dos subsistemas e linhas do diagrama de blocos indicado na Figura 3.2 são apresentadas a seguir.

### Carreta – Processo de Descarga

O processo de descarga inicia-se com a conexão (1) da carreta de cloro ao Tanque de Estocagem (T-11) até que a pressão entre os dois seja equalizada. Após, nitrogênio gasoso é pressurizado na carreta, servindo de força motriz para a conclusão da transferência da substância.

### Tanque de Estocagem – T-11

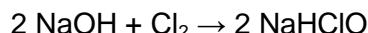
Após a descarga, o cloro fica em equilíbrio com seu vapor, estocado no tanque T-11. As linhas de líquido (3) e vapor (4) permitem a sua passagem pela unidade. No início da operação, fecha-se a linha de líquido (3) permitindo a passagem do cloro gasoso. À medida que sai, mais vapor é



formado e maior será a pressão de vapor ( $P^{vap}$ ) no tanque. Para a admissão de cloro líquido no processo, a linha de gás (4) é fechada. Utiliza-se a pressão do vapor como força motriz desta transferência.

### **Tanque Neutralizador – T-604A**

Para manter a pressão no tanque controlada a válvula PSV-11 é calibrada para suportar até 213 psi. Caso esse limite seja ultrapassado, esta válvula abre e o vapor de cloro segue, através da linha dois (2), para o tanque neutralizador (T-604A), contendo hidróxido de sódio (NaOH) que neutraliza o cloro de acordo com a reação:



### **Sistema de Segurança 1 – SS-1**

Este sistema de segurança é composto por um disco de ruptura (PSE-650) e um tanque de expansão (T-650). O disco de ruptura suporta uma pressão de até 142 psi. Caso essa pressão seja excedida, este disco se rompe e o cloro sofre uma expansão no tanque T-650, fazendo com que sua pressão seja reduzida. O tanque T-650 possui um medidor de pressão e uma válvula de alívio. O SS-1 entra em ação caso a válvula XV-603A esteja fechada e o fluxo de cloro líquido seja mantido. A válvula XV-603A é do tipo on-off e permite ou não a passagem do Cl<sub>2</sub> líquido para o vaporizador. Tanto a linha de líquido quanto a de gás (3 e 4, respectivamente) seguem pela linha cinco (5) até chegar no vaporizador (M-603).

### **Vaporizador - M-603**

O M-603 é um trocador de calor vertical do tipo casco tubo, com feixe de tubos encamisado por onde ocorre a passagem do vapor saturado. O cloro passa pelo casco. A pressão de operação é 8 psi, e a altura em que ele se encontra é de cinco metros acima do solo. Sua função é garantir que o cloro passe para o estado vapor. Caso a vaporização não seja eficiente e cloro líquido se acumule em seu casco, o M-603 possui um alarme de nível (LSH-603) que aciona o *Shut Down* nas válvulas XV-603 e na XV-603A caso o nível seja maior ou igual a 1,3 m.

### **Sistema de Segurança 2 – SS-2**

O sistema de segurança 2 se distribui ao longo da linha sete (7) e é compreendido por alarmes de pressão (Tabela 3.3) que também acionam o intertravamento das válvulas XV-603 e XV-603A nos casos de sobrepressão, dois discos de ruptura (Tabela 3.4) e um tanque de expansão (T-604A). Além disso, existe uma válvula de alívio (PSV-605) que, acima de 150 psi, envia o cloro ao tanque de expansão T-604A.



Tabela 3.3 – Alarmes de pressão do SS-2

| Alarmes de pressão | Característica       | Acionamento                      |
|--------------------|----------------------|----------------------------------|
| PSL-603            | Pressão baixa        | Menor que 55 psi                 |
| PSH-603            | Pressão alta         | Maior que 130 psi                |
| PSHH-603           | Pressão muito alta   | Maior que 50 psi                 |
| PIT-603A           | Pressão alta / baixa | Maior que 125 psi e menor 60 psi |

Tabela 3.4 – Discos de ruptura do SS-2

| Discos de ruptura | Ruptura           |
|-------------------|-------------------|
| PSE-603           | Maior que 173 psi |
| PSE-603A          | Maior que 188 psi |

### Sistema de Segurança 3 – SS-3

A linha oito (8), que contém o sistema de segurança SS-3, leva o cloro vaporizado ao seu destino, no reator de mistura. Este sistema é composto por um alarme de pressão sonoro e luminoso (PIT-603) e da válvula PV-603 responsável pela admissão de cloro no reator de mistura.

### Sistema de Segurança 4 – SS-4

O vapor saturado, que será utilizado no aquecimento do vaporizador, deve chegar até ele, através da linha seis (6), com uma faixa de pressão de 6-8 psi. Para que atinja esta faixa, passa por um sistema de redução de pressão, pois é admitido no processo a 30 psi normalmente. É importante o monitoramento e controle da pressão para que o vapor não atinja um valor muito alto de pressão na chegada ao vaporizador, danificando seu feixe de tubos. Este sistema se inicia com um alarme PSL-603B que é acionado se a pressão estiver menor que 30 psi acionando o intertravamento das válvulas XV-603A e XV-603. Esta medida corretiva é tomada, pois, se o vapor estiver com a pressão menor que 30 psi, provavelmente existe um problema no fornecimento de vapor. A XV-603A também é fechada para evitar o acúmulo de cloro líquido no casco do vaporizador caso ele não esteja aquecido o suficiente. Além disso, no início do processo ela é aberta 30 segundos após a XV-603, para admissão de vapor no vaporizador (M-603). Isto garante que o M-603 esteja aquecido para vaporizar o cloro líquido. Seguindo a linha seis (6) está a PCV-603, redutora de pressão, que deve reduzir para 8 psi a pressão do vapor saturado. Esta válvula possui um indicador de pressão associado que aciona o *Shut Down* na XV-603 e XV-603A, caso a pressão seja menor que 6 psi. O último mecanismo de segurança antes de o vapor chegar ao M-603 é a PSV-M603 que está setada para 10 psi, ou seja, ela abrirá para a redução da pressão. É uma válvula de alívio.



## 4 IDENTIFICAÇÃO DOS PERIGOS

Este capítulo visa à análise qualitativa de riscos da unidade em estudo. Para tal, são utilizadas duas das técnicas brevemente apresentadas no item 2.3 deste trabalho: HAZOP (Estudo de Perigos e Operabilidade) e o APP (Análise Preliminar de Perigo). Estas metodologias são descritas com mais detalhes, passando pelas suas aplicações e objetivos entre outros tópicos.

Embora tenham como objetivo mútuo a identificação de perigos, estas metodologias diferem quanto ao foco. A APP identifica falhas de equipamento e o HAZOP os desvios do processo. A Tabela 4.1 representa uma análise comparativa entre as duas técnicas.

Tabela 4.1 – Análise comparativa entre APP e HAZOP

|                                | APP  | HAZOP   |
|--------------------------------|--|---|
| <b>Metodologia</b>             | Qualitativa  |   |
| <b>Objetivo</b>                | Identificação dos perigos nos equipamentos   | Identificação dos possíveis desvios das condições normais de operação   |
| <b>Aplicação</b>               | Revisão geral de segurança de unidades em operação   |   |
|                                | Recomendações para supostas situações de risco   | Modificação de unidades de processo   |
| <b>Natureza dos Resultados</b> | Fornece uma ordenação qualitativa dos cenários de acidentes identificados (priorização das medidas propostas para a redução dos riscos da unidade analisada) | Identificação de todos os possíveis desvios que possam conduzir a eventos perigosos ou a problemas operacionais com recomendações para redução de risco   |
|                                |  | Uma avaliação das consequências (efeitos) destes desvios sobre o processo   |
|                                | Qualitativos, não fornecendo estimativas numéricas   |   |
|                                | Geram informações úteis para análises subsequentes, principalmente, para Avaliação Quantitativa de Riscos  |   |
| <b>Vantagens</b>               | Informa as causas que ocasionam cada um dos eventos e respectivas consequências  | Sistematicidade, flexibilidade e abrangência para identificação de perigos e problemas operacionais   |
|                                | Obtenção de uma avaliação qualitativa da severidade das consequências e frequências de ocorrência dos cenários e do risco associado                          | Maior entendimento, pelos membros da equipe, do funcionamento da unidade em condições normais e, principalmente, quando da ocorrência de desvios, funcionando a análise de forma análoga a um “simulador” de processo |

Fonte: adaptado de AGUIAR L.A.A. et al, 2001



As aplicações destas técnicas qualitativas de risco ajudam nas análises quantitativas além de orientar o pessoal envolvido no processo quando alguma situação anormal ocorre no andamento das operações.

## 4.1 HAZOP – Estudo de Riscos e Operabilidade

### 4.1.1 Objetivo

O Estudo de Operabilidade e Riscos – HAZOP (HAZARD AND OPERABILITY STUDY) - é uma técnica sistemática e criativa dirigida por palavras-chave para identificação de potenciais falhas. O conceito pressupõe que os sistemas funcionam bem quando estão em operação sob condições de projeto, e que os problemas surgem quando ocorrem desvios em relação a elas.

A metodologia orienta uma equipe multidisciplinar que discute e faz sugestões metódicamente sobre algum projeto de processo específico durante uma série de reuniões de análise. Um estudo eficiente, detalhado e completo sobre as variáveis envolvidas é o objetivo das reuniões. Através desta técnica é possível identificar sistematicamente os caminhos pelos quais os equipamentos constituintes podem falhar ou serem inadequadamente operados, o que levaria a situações de operação indesejadas.

Portanto, o HAZOP identifica tanto problemas que possam comprometer a segurança da instalação como aqueles que possam causar perda de continuidade operacional da instalação ou perda de especificação do produto (AGUIAR, 2005).

### 4.1.2 Aplicação

Pode-se executar o HAZOP tanto em uma planta em fase de projeto quanto numa já em atividade. No primeiro caso, deve-se dispor do seu P&ID (Diagramas de Tubulação e Instrumentação) a fim de que possíveis modificações oriundas da análise possam ser incorporadas ao projeto sem maiores custos. No caso do estudo de uma planta existente, o primeiro passo é verificar se o P&ID está realmente atualizado. A execução de um HAZOP com base em um diagrama incorreto é simplesmente inútil.

Dispondo deste diagrama, o grupo então gera perguntas de maneira sistemática. Este procedimento deve promover um amplo e irrestrito raciocínio lógico visando detectar virtualmente todas as anormalidades concebíveis do processo. As perguntas, embora instigadas por uma lista de palavras-guia (Tabela 4.2), surgem naturalmente através da interação entre os membros da equipe. Portanto, esta técnica de identificação de perigos consiste, fundamentalmente, em uma busca estruturada das causas de possíveis desvios em variáveis de processo, ou seja, na temperatura, pressão, vazão e composição, em diferentes pontos (denominados nós) do sistema, durante a operação do mesmo.

A Tabela 4.2 apresenta as palavras-guia mais utilizadas para o desenvolvimento de um HAZOP, acompanhadas de seus significados.



Tabela 4.2 – Palavras-guia usadas na execução do HAZOP

| Palavras-guia | Definição  |
|---------------|--|
| NENHUM        | Não há fluxo à frente quando deveria haver, por exemplo, “NENHUM fluxo”  |
| MAIS DE       | Mais de qualquer parâmetro físico relevante do que o exigido, por exemplo, “MAIS fluxo (taxa, quantidade)”, “MAIS pressão”   |
| MENOS DE      | Oposto de “MAIS”   |
| INVERSO (A)   | Oposto lógico  |
| PARTE DE      | Composição do sistema diferente daquilo que deveria ser  |
| INCLUSIVE     | Mais coisas presentes do que deveria haver, por exemplo, fases adicionais ou impurezas adicionais.   |
| DIFERENTE DE  | Substituição total de fluido ou material (aquilo que precisa acontecer diferente de operação normal), por exemplo, partida, paralisação, manutenção, previsão para falhas de manutenção, equipamento sobressalente necessário e equipamento omitido. |

Fonte: Adaptado de SOUZA, 2005

No desenvolvimento deste estudo, os seguintes passos podem ser seguidos:

1. Selecionar os segmentos do projeto a serem estudados.
2. Definir os nós.
3. Para cada nó:
  - Definir a finalidade / intenção do projeto (incluir limites de projeto) e desenvolver os desvios importantes.
  - Listar os parâmetros importantes e desenvolver os seus desvios usando as palavras chave.
  - Preencher o registro de exame de cada desvio para todos os parâmetros que forem aplicados aos nós.
    - Listar as consequências dos desvios para o sistema inteiro pressupondo a falha sem a ação das proteções.
    - Listar as possíveis causas dos desvios.
    - Listar as proteções existentes (salva-guardas) / reação automática do sistema contra as causas, desvios e as consequências.
  - Desenvolver recomendações para proteções adicionais se as existentes forem inadequadas.

A Figura 4.1 representa a planilha a ser preenchida no HAZOP.



| <b>HAZOP – Estudo de Riscos e Operabilidade</b> |               |        |        |               |                                    |               |
|---|---------------|--------|--------|---------------|------------------------------------|---------------|
| Unidade:  |               |        |        |               |                                    |               |
| Sistema:  | Equipe:       |        |        | Data:         |                                    |               |
| Localização do Nô:                              |               |        |        |               |                                    | Página:       |
| Variável ou Parâmetro                           | Palavra Chave | Desvio | Causas | Consequências | Proteção Disponível (salva-guarda) | Recomendações |
|   |               |        |        |               |                                    |               |
|   |               |        |        |               |                                    |               |
|   |               |        |        |               |                                    |               |
|   |               |        |        |               |                                    |               |
|   |               |        |        |               |                                    |               |
|   |               |        |        |               |                                    |               |
|   |               |        |        |               |                                    |               |
|   |               |        |        |               |                                    |               |

Figura 4.1 – Exemplo de planilha utilizada em HAZOP

Fonte: Adaptado de SOUZA, 2005



A descrição dos itens a serem preenchidos no HAZOP é apresentada a seguir:

### **Nós de estudo**

São os pontos do processo, localizados através dos fluxogramas da planta, que serão analisados nos casos em que ocorram desvios.

### **1<sup>a</sup> coluna - Parâmetros de processo**

São os fatores ou componentes da intenção de operação (que definem o funcionamento normal da planta), ou seja, são as variáveis físicas do processo e os procedimentos operacionais.

### **2<sup>a</sup> coluna - Palavras-guia ou Palavras-chave**

São palavras simples utilizadas para qualificar os desvios da intenção de operação e para guiar e estimular a equipe. São aplicadas aos parâmetros de processo, em cada nó-de-estudo da planta, a fim de descobrir os desvios passíveis de ocorrência.

### **3<sup>a</sup> coluna – Desvios**

Os desvios são afastamentos das intenções de operação, que são evidenciados pela aplicação sistemática das palavras-guia aos nós-de-estudo (p. ex., mais pressão), ou seja, são distúrbios provocados no equilíbrio do sistema.

### **4<sup>a</sup> coluna – Causas**

São os motivos pelos quais os desvios ocorrem. A partir do momento em que um desvio tenha demonstrado possuir uma causa aceitável, ele pode ser tratado como uma ocorrência significativa e analisado adequadamente. As causas podem advir de falhas do sistema, erro humano, um estado de operação do processo não previsto, distúrbios externos e etc.

### **5<sup>a</sup> coluna – Consequências**

As consequências são os resultados decorrentes de um desvio da intenção de operação em um determinado nó-de-estudo.

### **6<sup>a</sup> coluna – Proteção disponível (salva-guarda)**

Nesta coluna devem ser apontadas as respostas que o sistema possui, em termos de intertravamentos, automação, indicações, alarmes e dispositivos de segurança.

### **7<sup>a</sup> coluna – Recomendações**

São as recomendações referentes às ações a serem implementadas para o gerenciamento dos riscos. Com isso é possível agir direto nas prováveis causas do desvio, evitando assim a perda de tempo na solução do problema, antes do aumento dos danos.

Em síntese, o procedimento para o desenvolvimento do estudo e preenchimento da planilha de HAZOP pode ser observado na Figura 4.2.

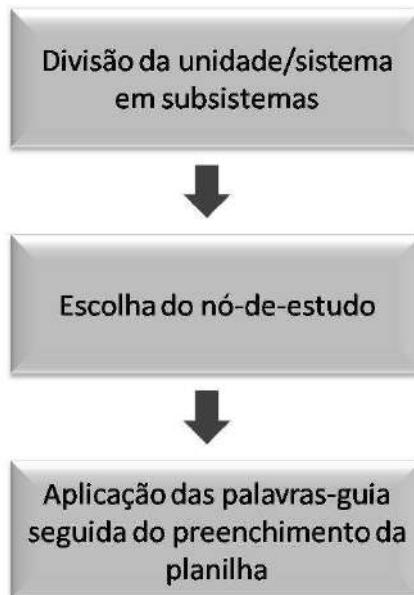


Figura 4.2 – Esquema da aplicação do HAZOP

#### 4.1.3 **Natureza dos resultados**

Os principais resultados fornecidos pelo HAZOP identificam os possíveis desvios que possam conduzir a eventos indesejáveis e avaliam as suas consequências sobre o processo.

O exame dos meios disponíveis para se detectar e corrigir ou mitigar os efeitos de tais desvios podem recomendar alterações no projeto, estabelecimentos ou mudança nos procedimentos de operação, teste e manutenção.

Portanto, os resultados obtidos são puramente qualitativos, não fornecendo estimativas numéricas nem qualquer tipo de classificação em categorias.

#### 4.1.4 **Vantagens e desvantagens**

As principais vantagens da análise por HAZOP estão relacionadas com a sistematicidade, flexibilidade e abrangência para identificação de perigos e problemas operacionais. Além disso, as reuniões promovem a troca de idéias entre os membros da equipe, uniformizando o grau de conhecimento e gerando informações úteis para análises subsequentes (AGUIAR, 2005).

Entretanto, o HAZOP avalia apenas as falhas de processo para determinar as potenciais anormalidades de engenharia, e requer uma equipe multidisciplinar com larga experiência para implementação da técnica: especialistas em projeto, processo, operação do processo, instrumentação, química, segurança e manutenção.



#### 4.1.5 Resultados

O HAZOP para este trabalho foi aplicado ao nó VAPORIZADOR – M-603. Foram incluídas todas as linhas de entrada e saída deste Trocador de Calor. A técnica de HAZOP, além de propor uma instalação mais segura e com impactos ambientais mitigados, proporciona conhecimento técnico e informações sobre o modo operacional da unidade. Porém, não será utilizada na continuidade do estudo quantitativo deste trabalho, servindo apenas como complemento do estudo de APP, que fornecerá então os dados para a análise quantitativa de riscos.

As planilhas que representam o resultado da aplicação do HAZOP estão no Anexo A3.

### 4.2 Análise Preliminar de Perigo (APP)

#### 4.2.1 Objetivo

A Análise Preliminar de Perigo (APP) é uma metodologia indutiva estruturada para identificar os potenciais perigos decorrentes da instalação de novas unidades e sistemas ou da própria operação da planta que opera com materiais perigosos.

Segundo AGUIAR, esta metodologia procura examinar as maneiras pelas quais a energia ou o material de processo pode ser liberado de forma descontrolada, levantando, para cada um dos perigos identificados, as suas causas, os métodos de detecção disponíveis e os efeitos sobre os trabalhadores, a população circunvizinha e sobre o meio ambiente. Após, é feita uma Avaliação Qualitativa dos riscos associados, identificando-se, desta forma, aqueles que requerem priorização. Além disso, são sugeridas medidas preventivas e/ou mitigadoras dos riscos, a fim de eliminar as causas ou reduzir as consequências dos cenários de acidente identificados. Ficam excluídos desta análise os eventos perigosos causados por agentes externos, tais como quedas de aviões ou helicópteros, terremotos e inundações por se tratarem de acontecimentos remotos.

#### 4.2.2 Aplicação

Utilizando como guia a planilha de APP (Figura 4.3), são examinados os perigos de acidentes, suas causas, os métodos de detecção disponíveis e os efeitos sobre as pessoas, instalações e meio ambiente.

No desenvolvimento de uma APP, os seguintes passos podem ser seguidos para auxiliar o preenchimento da planilha.

- **Rever problemas conhecidos**

Revisar a experiência passada em sistemas similares ou análogos, para a determinação de riscos que poderão estar presentes no sistema que está sendo desenvolvido.

- **Revisar a missão**

Ou seja, os objetivos, as exigências de desempenho, as principais funções e procedimentos, onde se darão as operações.



- **Determinar os riscos principais**

Quais serão os riscos principais, com potencialidade para causar direta e imediatamente lesões, perda de função, danos a equipamentos, perda de material.

- **Revisar os meios de eliminação ou controle dos riscos**

Elaborar uma revisão dos meios possíveis procurando as melhores opções compatíveis com as exigências do sistema.

- **Analizar os métodos de restrição de danos**

Devem ser considerados os métodos possíveis mais eficientes na restrição de danos, no caso de perda de controle sobre os riscos.

- **Indicar quem levará a cabo as ações corretivas**

Indicar claramente os responsáveis pelas ações corretivas, designando as atividades que cada um deverá desenvolver.

A Análise Preliminar de Perigos deverá ser sucedida por estudos mais detalhados ou específicos, logo que forem possíveis. Deve ser lembrado que, para sistemas bem conhecidos, nos quais há bastante experiência acumulada em riscos, a APP apenas sistematiza a informação (para benefício gerencial).



| <h2>Análise Preliminar de Perigos</h2> |        |                   |         |              |           |            |                             |         |
|--|--------|-------------------|---------|--------------|-----------|------------|-----------------------------|---------|
| Empreendimento:<br>Subsistema 01:      |        |                   |         | Referências: |           |            | Data:<br>Revisão:           |         |
| Perigos Identificados                  | Causas | Modos de Detecção | Efeitos | Cat. Freq.   | Cat. Sev. | Cat. Risco | Recomendações / Observações | Cenário |
|  |        |                   |         |              |           |            |                             |         |
|  |        |                   |         |              |           |            |                             |         |
|  |        |                   |         |              |           |            |                             |         |
|  |        |                   |         |              |           |            |                             |         |
|  |        |                   |         |              |           |            |                             |         |
|  |        |                   |         |              |           |            |                             |         |
|  |        |                   |         |              |           |            |                             |         |
|  |        |                   |         |              |           |            |                             |         |

Figura 4.3 – Planilha de Análise Preliminar de Perigo

Fonte: Santana et al., 2009



As descrições de cada coluna são apresentadas a seguir.

### **1<sup>a</sup> coluna – Perigo**

Esta coluna contém os perigos identificados para o módulo de análise em estudo. Sucintamente, os perigos são eventos acidentais que têm potencial para causar danos às instalações, aos operadores, ao público ou ao meio ambiente. Portanto, os perigos, de uma forma geral, referem-se a eventos tais como liberação de material inflamável e tóxico.

### **2<sup>a</sup> coluna – Causa**

As causas de cada perigo são descrevidas nesta coluna. Estas causas podem envolver tanto falhas intrínsecas de equipamentos (vazamentos, rupturas, falhas de instrumentação, etc.), bem como erros humanos de operação e manutenção.

### **3<sup>a</sup> coluna – Modo de detecção**

Os modos disponíveis na instalação para a detecção do perigo identificado na primeira coluna foram relacionados nesta coluna. A detecção da ocorrência do perigo tanto pode ser realizada através de instrumentação (alarmes de pressão, de temperatura, etc.), como através de percepção humana (visual, odor, etc.).

### **4<sup>a</sup> coluna – Efeito**

Os possíveis efeitos danosos de cada perigo identificado foram listados nesta coluna. Os principais efeitos dos acidentes envolvendo substâncias inflamáveis e tóxicas incluem:

- Incêndio em nuvem
- Explosão de nuvem
- Incêndio em poça
- Nuvem tóxica

### **5<sup>a</sup> coluna – Categoria de frequência do cenário**

De acordo com a metodologia de APP adotada neste trabalho, os cenários de acidentes foram classificados em categorias de frequência, as quais fornecem uma indicação qualitativa da frequência esperada de ocorrência para cada um dos cenários identificados, conforme apresentado na Tabela 4.3.



Tabela 4.3 – Categorias de frequências dos cenários usados na APP

| Categoria | Denominação         | Faixa de frequência (/ano) | Descrição  |
|-----------|---------------------|----------------------------|--|
| A         | Extremamente remoto | $<10^{-4}$                 | Extremamente remoto, mas possível<br>Não há notícia de ocorrência anterior<br>Exige falha de múltiplos sistemas (redundantes) de proteção, associadas ou não a procedimentos<br>Intervalo entre ocorrências acima de 35 anos   |
| B         | Remoto              | $10^{-3}$ a $10^{-4}$      | Evento remoto, mas ocorre eventualmente<br>Pode ocorrer sob certas circunstâncias excepcionais<br>Há registro de ocorrência na Indústria<br>Exige falhas múltiplas de componentes de um sistema de proteção ou várias camadas de proteção<br>As ocorrências são esperadas entre 15 e 35 anos |
| C         | Improvável          | $10^{-2}$ a $10^{-3}$      | Pouco provável que ocorra durante a vida útil da instalação  |
| D         | Provável            | $10^{-1}$ a $10^{-2}$      | Pode ocorrer até uma vez durante a vida útil da instalação   |
| E         | Frequente           | $>10^{-1}$                 | Evento provável, recorrente<br>Ocorre com frequência no ciclo da vida da unidade<br>Pode ocorrer mais de uma vez ao ano na unidade   |

Fonte: Adaptado do Manual de Análise de Riscos Industriais – FEPAM, 2001

#### 6ª coluna – Categoria de severidade

Também de acordo com a metodologia de APP adotada neste trabalho, os cenários de acidentes foram classificados em categorias de severidade, as quais fornecem uma indicação qualitativa do grau de severidade das consequências de cada um dos cenários identificados, dentro e fora da fábrica. As categorias de severidade utilizadas encontram-se na Tabela 4.4.



Tabela 4.4 - Categoria de severidade das consequências dos cenários acidentais

| Severidade (Potencial das Consequências) | Denominação  | Danos a pessoas                                 | Danos materiais ou econômicos | Danos ao meio-ambiente           |
|--|--------------|---|-------------------------------|----------------------------------|
| I  | Desprezível  | Lesão leve sem afastamento                      | Danos leves                   | Efeitos mínimos                  |
| II                                       | Marginal     | Lesão temporária com afastamento                | Danos moderados               | Efeitos compensáveis e moderados |
| III                                      | Crítica      | Lesão permanente ou doença ocupacional moderada | Danos substanciais            | Efeitos substanciais localizados |
| IV                                       | Catastrófica | Lesão permanente ou doença grave ou fatalidade  | Danos catastróficos           | Efeitos catastróficos            |

Fonte: Adaptado do Manual de Análise de Riscos Industriais – FEPAM, 2001

#### 7<sup>a</sup> coluna – Categoria de risco

Combinando as categorias de frequência com as de severidade obtém-se a Matriz de Riscos, conforme ilustrado na Figura 4.4, a qual fornece uma indicação qualitativa do nível de risco de cada cenário identificado na análise.

|     | A | B | C | D | E |
|-----|---|---|---|---|---|
| IV  |   |   |   |   |   |
| III |   |   |   |   |   |
| II  |   |   |   |   |   |
| I   |   |   |   |   |   |

Figura 4.4 – Matriz de classificação de risco

Fonte: Adaptado do Manual de Análise de Riscos Industriais – FEPAM, 2001



Figura 4.5 - Legenda da matriz de classificação de risco – Frequência x Severidade

Fonte: Adaptado do Manual de Análise de Riscos Industriais – FEPAM, 2001

#### 8<sup>a</sup> coluna – Medidas/Observações

Estas colunas contêm as medidas que devem ser tomadas para diminuir a frequência ou severidade do acidente ou quaisquer observações pertinentes ao cenário de acidente em estudo. A letra **E – existente** nesta coluna indica que as medidas já foram tomadas.

#### 9<sup>a</sup> coluna – Identificação do cenário de acidente

Esta coluna contém um número de identificação do cenário de acidente. É preenchida sequencialmente para facilitar a consulta a qualquer cenário de interesse.

#### 4.2.3 Natureza dos Resultados

Na APP são levantadas as causas que podem promover a ocorrência de cada um dos eventos e as suas respectivas consequências, sendo, então, feita uma avaliação qualitativa da frequência de ocorrência do cenário de acidentes, da severidade das consequências e do risco associado. Portanto, os resultados obtidos são qualitativos, não fornecendo estimativas numéricas.

Normalmente uma APP fornece também uma ordenação qualitativa dos cenários de acidentes identificados, a qual pode ser utilizada como um primeiro elemento na priorização das medidas propostas para redução dos riscos da instalação/ sistema analisado.

#### 4.2.4 Vantagens e desvantagens

Técnica mais abrangente que *checklist*, informando as causas que ocasionaram a ocorrência de cada um dos eventos e as suas respectivas consequências, obtenção de uma avaliação qualitativa da severidade das consequências (Tabela 4.4) e frequência (Tabela 4.3) de ocorrência do cenário de acidente e do risco associado: MATRIZ DE RISCO (Figura 4.4).

Apesar dos proveitos desta metodologia, ela requer um maior tempo para a execução de todo processo até o relatório final, necessitando de uma equipe com grande experiência em várias áreas de atuação como: processo, projeto, manutenção e segurança.



#### 4.2.5 Resultados

A planilha resultante da aplicação desta técnica encontra-se no Anexo A4. Para a unidade em questão, são identificados como eventos indesejáveis a pequena e a grande liberação da substância tóxica “cloro”.

Os cenários obtidos são classificados de acordo com o risco indicando quantos são enquadrados em cada uma das categorias (Figura 4.6). Verifica-se que quatro cenários pertencem à categoria de risco moderado, dois na categoria desprezível e nenhum cenário nas categorias menor, sério e crítico.

|     | A | B | C | D | E |
|-----|---|---|---|---|---|
| IV  |   | 4 |   |   |   |
| III |   |   |   |   |   |
| II  |   | 2 |   |   |   |
| I   |   |   |   |   |   |



Figura 4.6 - Número de cenários classificados em cada categoria de risco

A Tabela 4.5 apresenta os cenários que serão objetos da análise quantitativa, via Árvore de Eventos (Capítulo 5), considerando a configuração do sistema estudado. Cada cenário está relacionado a um evento iniciador desta análise.

Os cenários classificados na categoria de risco moderado foram escolhidos para este estudo por serem responsáveis pelas maiores perdas, e que têm potencial para gerar danos à população exposta dentro e fora dos limites da unidade industrial analisada.



Tabela 4.5 – Cenários escolhidos para simulações de consequências

| Eventos Iniciadores (EI)   | Número do Cenário |
|--|-------------------|
| <b>EI-01</b> - Grande liberação da substância tóxica cloro, devido à ruptura no trecho de tubulação entre a carreta de cloro e o tanque de cloro T-11. | 02                |
| <b>EI-02</b> - Grande liberação de substância tóxica cloro, devido à ruptura do tanque de cloro da carreta.  | 03                |
| <b>EI-03</b> - Grande liberação de substância tóxica cloro, devido a um orifício no vaporizador de cloro, M-603.                                       | 05                |
| <b>EI-04</b> - Grande liberação de substância tóxica cloro devido à ruptura no tanque de estocagem de cloro T-11.                                      | 06                |



## 5 CÁLCULO DAS FREQUÊNCIAS DOS CENÁRIOS DE ACIDENTES

Para o cálculo das frequências dos cenários de acidentes, será utilizada a metodologia de Árvore de Eventos. A técnica é descrita neste capítulo e então aplicada para a unidade em questão.

### 5.1 *Objetivo*

A Análise de Árvore de Eventos é uma técnica para avaliação dos eventos acidentais potenciais resultantes de falha de um sistema específico de equipamento ou erro humano, conhecido como evento inicial. A Árvore de Eventos considera a resposta do operador, do sistema de segurança e até mesmo do ambiente ao evento inicial, na determinação dos eventos acidentais potenciais (PEREIRA, 2003).

O objetivo de uma Árvore de Eventos é o de apresentar, de forma sistemática, todos os cenários de ocorrência possíveis, considerando, desta forma, as diferentes possibilidades de evolução do acidente deflagrado por um evento iniciador e permitindo o cálculo das frequências de ocorrência dos cenários de interesse.

Os resultados, a partir da aplicação dessa técnica, geram um conjunto cronológico de falhas ou erros que podem levar a um acidente. A técnica parte do princípio de que um evento negativo já identificado possa ocorrer e procura prever as sequências de eventos seguintes, através do sucesso ou da falha dos sistemas de segurança existentes, permitindo, quando necessário, quantificar o potencial do evento inicial e antecipar ações e mecanismos de controle e segurança.

O método fornece informação de como uma falha pode ocorrer e a probabilidade de ocorrência da mesma. Se há dados apropriados disponíveis, o procedimento pode ser utilizado de uma forma quantitativa, atribuindo-se valores numéricos para os vários eventos. Isto é empregado efetivamente para que seja determinada a probabilidade de certa sequência de eventos e para a identificação das melhorias a serem introduzidas no processo (CROWL&LOUVAR, 2002).

### 5.2 *Aplicação*

O procedimento geral para a elaboração da Árvore de Eventos, segundo CCPS (1985), envolve quatro etapas:

1. Identificação do evento iniciador;
2. Identificação dos itens do cabeçalho que irão compor a Árvore de Eventos;
3. Construção da Árvore de Eventos;
4. Descrição das consequências do evento iniciador.

A primeira etapa prevê a identificação do evento iniciador do acidente, evento este atribuído à falha de um processo ou um erro humano, que possa resultar numa série de eventos subsequentes.

A segunda etapa prevê a descrição dos itens do cabeçalho da planilha. Devem-se determinar previamente todas as funções passíveis de alterar o rumo de desenvolvimento do evento



iniciador. Além disso, é útil considerar a ordem cronológica dos eventos intermediários que possam ocorrer em função dos sistemas de controle e prevenção existentes.

Na terceira etapa está prevista a elaboração da Árvore de Eventos. Esta metodologia usa uma aproximação indutiva que segue uma representação diante da lógica. Geralmente, as Árvores de Eventos fluem da esquerda para a direita. Na margem esquerda da estrutura é identificado o evento iniciador. As demais colunas, dispostas ao longo do cabeçalho da planilha, são denominadas seções de eventos e correspondem aos diferentes eventos subsequentes que podem acontecer. A árvore se ramifica até que as consequências finais (resultados) sejam alcançadas. Para cada item do cabeçalho haverá somente duas possibilidades a serem consideradas: **SIM**, isto é, o sistema funciona e o evento poderá ou não derivar para uma segunda coluna, ou **NÃO**, ocorre a falha do sistema previsto e o evento caminhará para a próxima seção. A análise se repete para cada uma das colunas identificadas. A quantificação da Árvore de Eventos é usada para predizer a frequência de cada resultado.

Finalmente, a quarta etapa do procedimento previsto pelo CCPS (1985) é a descrição das consequências do evento. Essas consequências poderão representar uma variedade de problemas produzidos pelo evento iniciador.

A Figura 5.1 mostra uma Árvore de Eventos genérica para o vazamento de uma substância tóxica.

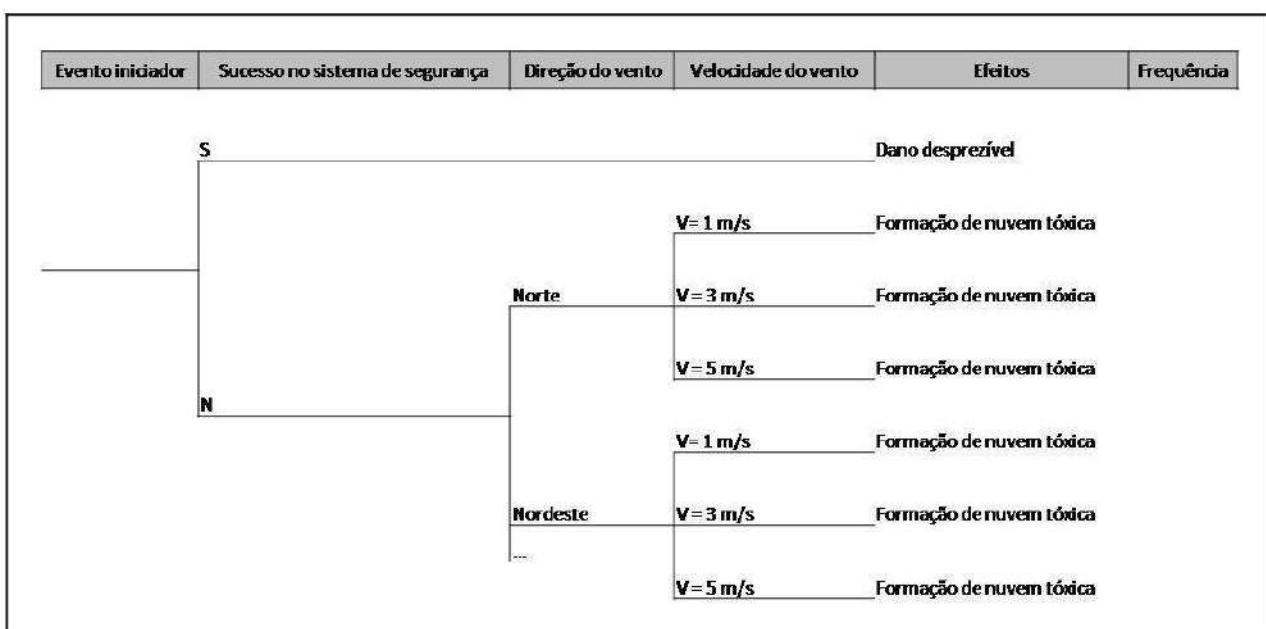


Figura 5.1 – Árvore de Eventos Genérica

Para completar o entendimento da Árvore de Eventos faz-se necessária a descrição das seções de eventos.

### Evento iniciador

Corresponde aos cenários classificados na categoria de risco moderado, conforme Tabela 4.5.



## Sucesso no sistema de segurança

Corresponde ao sistema de segurança disponível para evitar o progresso do evento iniciador.

## Direção e velocidade do vento

Corresponde à fração do tempo em que o vento sopra em cada direção e a fração em que o vento está em cada uma das três faixas de velocidade consideradas. Estas informações foram obtidas a partir dos dados meteorológicos da região, conforme Tabela 3.2.

## Efeitos

Referem-se aos cenários acidentais resultantes da evolução do evento iniciador.

## 5.3 Resultados

### 5.3.1 Frequências

A frequência para cada evento iniciador é calculada somando-se as frequências de cada uma das causas associadas ao mesmo, além de se considerar o tempo real de operação, uma vez que os processos não são contínuos.

Já a frequência de cada causa é obtida, para a maioria dos casos, multiplicando-se o número de componentes da instalação analisada pela frequência de ruptura dos mesmos, tendo como base a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Frequências de ocorrências anuais

| Componente                                  | Frequência anual para grande vazamento |
|---|--|
| Bomba (selo mecânico)                       | $2,0 \times 10^{-5}$                   |
| Filtro                                      | $1,0 \times 10^{-5}$                   |
| Flanges / conexões para instrumentação      | $1,0 \times 10^{-5}$                   |
| Trocador de Calor                           | $2,0 \times 10^{-5}$                   |
| Tubulação até 2" (por metro)                | $5,0 \times 10^{-7}$                   |
| Tubulação (2" a 6" por metro)               | $3,0 \times 10^{-7}$                   |
| Tubulação > 6" (por metro)                  | $1,0 \times 10^{-7}$                   |
| Tanque/Vaso de Pressão (ruptura intrínseca) | $7,0 \times 10^{-6}$                   |
| Válvula (automática / manual)               | $3,0 \times 10^{-5}$                   |
| Válvula de Retenção                         | $2,0 \times 10^{-5}$                   |
| Visor de Nível                              | $1,0 \times 10^{-3}$                   |

Fonte: Dados de projeto da unidade analisada



Segundo SANTANA et al., a frequência de ocorrência de falha de componentes é função de fatores que incluem:

- Tipo de equipamento e fabricante;
- Condições de processo;
- Práticas de manutenção e inspeção;
- Erro humano.

As Tabelas 5.2 a 5.5 apresentam o cálculo das frequências para os eventos iniciadores selecionados na APP.

Uma vez somadas as frequências de ruptura de cada causa, multiplica-se estes valores pelas demais probabilidades de cada tabela, encontrando-se então as frequências totais para cada evento iniciador.

Tabela 5.2 – Frequência do evento iniciador 01 (EI-01)

| Causa  | Número de componentes | Frequência / ano      |
|--|-----------------------|-----------------------|
| Linha de 1 ½"  | 20 m                  | $1,00 \times 10^{-5}$ |
| Válvula  | 03                    | $9,00 \times 10^{-5}$ |
| Flange   | 03                    | $3,00 \times 10^{-5}$ |
| Frequência de ruptura por ano  |                       | $1,30 \times 10^{-4}$ |
| Probabilidade de ocorrer ruptura durante carregamento do tanque (1 vez por mês com 12 horas de duração cada) |                       | $1,64 \times 10^{-2}$ |
| Probabilidade de falha da válvula de excesso de fluxo em fechar no momento da ruptura da linha               |                       | $3,40 \times 10^{-1}$ |
| <b>TOTAL</b>   |                       | $7,24 \times 10^{-7}$ |

Fonte: Dados de projeto da unidade analisada

Tabela 5.3 – Frequência do evento iniciador 02 (EI-02)

| Causa   | Número de componentes | Frequência / ano      |
|---|-----------------------|-----------------------|
| Tanque  | 1                     | $7,00 \times 10^{-6}$ |
| Probabilidade de ocorrer ruptura durante uma operação de abastecimento do tanque (1 vez por mês com 12 horas de duração cada) |                       | $1,64 \times 10^{-2}$ |
| <b>TOTAL</b>  |                       | $1,14 \times 10^{-7}$ |

Fonte: Dados de projeto da unidade analisada



Tabela 5.4 - Frequência do evento iniciador 03 (EI-03)

| Causa  | Número de componentes | Frequência / ano      |
|--|-----------------------|-----------------------|
| Linha de 1 ½", 3"  | 50 m                  | $1,50 \times 10^{-5}$ |
| Válvula  | 12                    | $3,60 \times 10^{-4}$ |
| Vaporizador  | 01                    | $2,00 \times 10^{-5}$ |
| Flange   | 04                    | $4,00 \times 10^{-5}$ |
| Frequência de ruptura por ano  |                       | $4,35 \times 10^{-4}$ |
| Probabilidade de ocorrer ruptura durante uma operação de Cloração (16 bateladas por mês com 8 horas de duração cada) |                       | $1,75 \times 10^{-1}$ |
| Probabilidade de falha da válvula de excesso de fluxo em fechar no momento da ruptura da linha                       |                       | $3,40 \times 10^{-1}$ |
| <b>TOTAL</b>   |                       | $2,59 \times 10^{-5}$ |

Fonte: Dados de projeto da unidade analisada

Tabela 5.5 – Frequência do evento iniciador 04 (EI-04)

| Causa           | Número de componentes | Frequência / ano      |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|
| Tanque de cloro | 1                     | $7,00 \times 10^{-6}$ |
| <b>TOTAL</b>    |                       | $7,00 \times 10^{-6}$ |

Fonte: Dados de projeto da unidade analisada

### 5.3.2 Frequências dos efeitos ou cenários acidentais

Após a construção das Árvores de Eventos para cada evento iniciador, e da obtenção das frequências dos eventos iniciadores (Tabelas 5.2 a 5.5), a frequência de cada efeito (cenário acidental) é obtida multiplicando-se o valor da frequência do evento iniciador pelas probabilidades das seções de evento da árvore (direção do vento, velocidade do vento, etc.).

A frequência esperada de ocorrência do cenário acidental é referida a certo intervalo de tempo. Neste estudo os dados obtidos estão em base anual. Os resultados da aplicação desta técnica encontram-se nos anexos A5 a A8.

### 5.3.3 Descrição das consequências dos eventos base

No caso da substância cloro, não inflamável, os cenários de acidente correspondem à formação de nuvens tóxicas. No capítulo seis é tratado o caso da dispersão dos gases e de seus efeitos.



## 6 ANÁLISE DE CONSEQUÊNCIAS E DE VULNERABILIDADE

A liberação de uma substância tóxica num determinado cenário acidental forma nuvens de gases que são capazes de causar danos ao homem, ao ambiente e a propriedade, nas áreas atingidas pelo efeito. É possível determinar a taxa de perda de material, uma vez conhecido o tipo de incidente que gerou o vazamento.

Para a determinação do nível de concentração num determinado ponto, é necessário analisar a dispersão da nuvem, isto é, interpretar o seu comportamento no espaço e no tempo.

A Figura 6.1 ilustra sistematicamente o procedimento de análise de consequências.



Figura 6.1 - Procedimento para Análise de Consequências

Uma vez conhecidas as concentrações tóxicas fornecidas pelo modelo de dispersão, torna-se possível estimar seu impacto ou efeito através da análise de vulnerabilidade. Tal análise tem como objetivo determinar a probabilidade de fatalidades em uma determinada região em consequência da dose tóxica máxima inalada por uma pessoa.

A análise de consequências e vulnerabilidade deste estudo é aplicada aos cenários selecionados no Capítulo 4, através da técnica de Análise Preliminar de Perigos (APP). São usados os modelos propostos por Daniel A.Crowl e Joseph F. Louvar.

### 6.1 Modelos Fonte

Modelos fonte são construídos a partir das equações fundamentais ou empíricas, representativas dos processos físico-químicos que ocorrem durante o vazamento de materiais. O modelo fonte fornece:

- a descrição da taxa de descarga;
- a quantidade total descarregada;
- o tempo total de descarga.

Para a seleção do modelo adequado, deve-se caracterizar o tipo de vazamento, de acordo com suas características termodinâmicas. Para tal, parte-se da Equação de Balanço da Energia Mecânica (Eq. 6.1).

$$\int \frac{dp}{\rho} + \Delta \left( \frac{\bar{u}^2}{2ag_c} \right) + \frac{g_c}{g_c} \Delta z + F - \frac{W_s}{m} = 0 \quad (6.1)$$



Onde:

$P$  é a pressão,

$\rho$  é a densidade do fluido,

$\bar{u}$  é a velocidade instantânea média do fluido,

$g_c$  é a constante gravitacional,

$\alpha$  é o fator adimensional de correção do perfil de velocidade com os seguintes valores:

$\alpha=0,5$  para escoamento laminar,  $\alpha=1,0$  para plug flow, e  $\alpha\rightarrow 1,0$  para escoamento turbulento,

$g$  é a aceleração da gravidade,

$z$  é a altura acima do referencial,

$F$  é o termo de perda por atrito,

$W_s$  é o trabalho de eixo e

$m$  é a taxa mássica de vazamento.

Os principais casos são apresentados a seguir.

### 6.1.1 **Modelo de Vazamento de Gás através de um Orifício**

No caso de vazamento de gás por um orifício, o valor da taxa de vazamento se faz pela distinção entre o fluxo sônico e subsônico, que é determinado pela razão crítica de pressão, definida pela equação 6.2. Esta equação é baseada no comportamento do gás ideal.

$$\left(\frac{P_{CRÍTICA}}{P_o}\right) = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (6.2)$$

Onde:

$\gamma$  é a relação  $C_p/C_v$ .

$P_o$  refere-se à pressão interna (no tanque)

$P_{CRÍTICA}$  é a pressão que resulta num fluxo máximo através do orifício

Quando a velocidade de saída do gás for próxima à velocidade do som naquele ambiente, o escoamento encontra-se em condições críticas. Se a velocidade do gás for menor que a do som o fluxo é subsônico e correspondente às seguintes condições:

$$\left(\frac{P}{P_o}\right) \geq \left(\frac{P_{CRÍTICA}}{P_o}\right)$$

Quando a velocidade do gás for sônica,

$$\left(\frac{P}{P_o}\right) < \left(\frac{P_{CRÍTICA}}{P_o}\right)$$

$P_o$  refere-se à pressão interna (no tanque) e  $P$  à pressão externa (atmosférica).

A equação 6.3 calcula a taxa de descarga instantânea do gás sobre condições de escoamento subsônico. O modelo assume que o processo é adiabático e os efeitos de fricção de parede são desprezíveis.



$$Q_m = C_o A P_o \sqrt{\frac{2g_c M}{R_g T_o} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[ \left(\frac{P}{P_o}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P}{P_o}\right)^{\frac{(\gamma+1)}{\gamma}} \right]} \quad (6.3)$$

Onde:

$Q_m$  é a taxa de descarga

$C_o$  é o coeficiente de descarga

$A$  é a área da abertura do orifício

$\gamma$  é a relação de calores específicos

$T_o$  é a temperatura da fonte

$P_o$  é a pressão interna

$P$  é a pressão ambiente

$M$  é o peso molecular do vapor ou gás que escapa

$R_g$  é a constante dos gases ideais

$g_c$  é a constante gravitacional

Para condições de escoamento crítico (sônico), a taxa de fluxo de massa do gás através do orifício é calculada através da equação 6.4.

$$Q_m = C_o A P_o \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R_g T_o} \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{(\gamma+1)}{\gamma-1}}} \quad (6.4)$$

### 6.1.2 Modelo de Vazamento de Líquido através de um Orifício

Quando um orifício é desenvolvido numa tubulação que transporta líquido, a taxa de descarga mássica é determinada usando a equação:

$$Q_m = \rho \bar{u} A = A C_o \sqrt{2 \rho g_c P_o} \quad (6.5)$$

Onde:

$Q_m$  é a taxa de descarga

$C_o$  é o coeficiente de descarga

$A$  é a área da abertura do orifício

$P_o$  é a pressão interna

$\rho$  é a densidade do líquido

$g_c$  é a constante gravitacional

$\bar{u}$  é a velocidade instantânea média do fluido

Para este limitado vazamento num orifício, assume-se uma pressão manométrica constante,  $P_o$ , dentro da unidade de processamento. A pressão externa é atmosférica, logo  $\Delta P = P_o$ . O coeficiente de descarga,  $C_o$ , é função do número de Reynolds e do diâmetro do orifício.



### 6.1.3 Modelo de Vazamento de Líquido através de um Orifício no Tanque

Este caso pode ser representado pela equação:

$$Q_m = \rho A C_o \sqrt{2 \left( \frac{g_c P_o}{\rho} + gh_L \right)} \quad (6.6)$$

Onde:

$Q_m$  é a taxa de descarga

$\rho$  é a densidade

$A$  é a área da abertura do orifício

$C_o$  é o coeficiente de descarga

$g_c$  é a constante gravitacional

$P_o$  é a pressão interna

$g$  é a aceleração da gravidade

$h_L$  é a altura do líquido acima do ponto de vazamento

Um orifício é desenvolvido a uma altura  $h$  abaixo do nível do fluido. A pressão manométrica no tanque é  $P_o$  e a pressão externa (manométrica) é atmosférica, ou seja, zero. À medida que o tanque esvazia, a altura do líquido diminui e a velocidade e a taxa mássica diminuem.

### 6.1.4 Modelo de Escoamento de Líquido através de Tubulação

Esse modelo é uma aplicação direta da equação 6.1. O gradiente de pressão através da tubulação é a força motriz do movimento do líquido. Forças de atrito entre o fluido e a parede da tubulação convertem parte da energia cinética em térmica, resultando num decréscimo da velocidade e da pressão. O termo  $F$  (perda por atrito) representa essa diminuição e também a perda de energia causada por obstáculos, isto é, válvulas, joelhos, orifícios e entradas e saídas da tubulação.

### 6.1.5 Modelo de Escoamento de Gás através de Tubulação

O escoamento de gases através de tubulação é modelado usando dois comportamentos: adiabático e isotérmico. O caso adiabático corresponde ao escoamento rápido através de um tubo isolado. O isotérmico corresponde ao escoamento através de uma tubulação não isolada mantida a uma temperatura constante, uma tubulação submersa em água é um exemplo. O comportamento real encontra-se entre esses dois casos. Infelizmente, o caso real é difícil de modelar e não há equações generalizadas e úteis disponíveis.

### 6.1.6 Modelo de Flash de Líquidos

Líquidos armazenados sobre pressão acima do seu ponto normal de ebulição apresentam problemas de flash. Se o ambiente que contém o líquido desenvolve um orifício, este irá flashear parcialmente, algumas vezes de forma explosiva. O flash ocorre tão rápido que o processo é assumido como adiabático.

Líquidos “flasheados” escapando através de orifícios e tubulações requerem considerações especiais, pois condições de escoamento bifásico podem estar presentes.

A equação 6.7 será válida apenas para líquidos armazenados numa pressão maior que a pressão de saturação do vapor.



$$Q_m = AC_o \sqrt{2\rho_f g_c (P - P^{sat})} \quad (6.7)$$

Onde:

$Q_m$  é a taxa de descarga

$\rho_f$  é a densidade do líquido

$A$  é a área da abertura do orifício

$C_o$  é o coeficiente de descarga

$g_c$  é a constante gravitacional

$P$  é a pressão dentro do tanque

$P^{sat}$  é a pressão de saturação do vapor do líquido “flasheado” a temperatura ambiente

Para os casos onde o líquido é estocado a uma pressão igual a sua pressão de vapor, a equação 6.8 se aplica.

$$Q_m = \frac{\Delta H_v A}{v_{fg}} \sqrt{\frac{g_c}{TC_p}} \quad (6.8)$$

Onde:

$Q_m$  é a taxa de descarga

$A$  é a área da abertura do orifício

$g_c$  é a constante gravitacional

$\Delta H_v$  a entalpia de vaporização do líquido

$v_{fg}$  a diferença entre os volumes específicos do líquido e do vapor

$T$  a temperatura ambiente

$C_p$  a capacidade calorífica

### 6.1.7 Modelo de Evaporação em Poça de Líquido

Poças de líquidos que evaporam são modeladas por métodos que dependem da volatilidade, da temperatura de ebulação do líquido e da relação com a temperatura ambiente.

A taxa de evaporação dependerá do tamanho da poça, da troca térmica entre o ar e o solo, da velocidade do vento, do tipo de solo e da volatilidade do produto. A equação 6.9 representa a taxa mássica de evaporação de líquido em poça.

$$Q_m = \frac{MKAP^{sat}}{R_g T_L} \quad (6.9)$$

Em que:

$Q_m$  é a taxa de descarga

$M$  é o peso molecular do material puro

$K$  é o coeficiente de transferência de massa

$A$  é a área exposta ao ambiente

$P^{sat}$  é a pressão de vapor de saturação do líquido

$T_L$  é a temperatura do líquido

$R_g$  é a constante dos gases ideais



### 6.1.8 Cálculo da Taxa de Vazamento

#### 6.1.8.1 Cenário 02 – EI-01

Grande liberação da substância tóxica cloro, devido à ruptura no trecho de tubulação entre a carreta de cloro e o tanque de cloro T-11. Para este cenário torna-se adequada a aplicação do Modelo 6.1.2 – Vazamento de líquido através de um orifício.

Tabela 6.1 - Dados para o cálculo da taxa de vazamento do cenário 02

|  |                                 |
|--|---------------------------------|
| $P_o$ - pressão interna                      | $6,76 \times 10^5$ Pa           |
| <sup>1</sup> $C_o$ - coeficiente de descarga | 1,00                            |
| <sup>2</sup> $\rho$ – densidade do líquido   | $1.386 \text{ kg/m}^3$          |
| $d$ - diâmetro da linha                      | $3,81 \times 10^{-2} \text{ m}$ |
| $g_c$ - constante gravitacional              | $1 \text{ (kg m/s}^2\text{)/N}$ |

<sup>1</sup> Quando o coeficiente de descarga é desconhecido, usa-se o valor 1,0 para maximizar os cálculos de escoamento. Encontram-se disponíveis mais detalhes sobre o coeficiente de descarga em: Robert H. Perry and Don W. Green, Perry's Chemical Engineers Handbook, 7th Ed. (New York: McGrawHill, 1997), PP.10-16.

<sup>2</sup> Densidade do líquido a temperatura ambiente (298 K)

- Cálculo da Área:

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$
$$A = 1,14 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

- Cálculo da taxa de vazamento:

$$Q_m = \rho \bar{u} A = A C_o \sqrt{2 \rho g_c P_o} \quad (6.5)$$

$$Q_m = 49,35 \text{ kg/s}$$

O cálculo da taxa de vazamento fornece o valor de 49,35 quilogramas de cloro líquido lançados por segundo na atmosfera.

#### 6.1.8.2 Cenário 03 – EI-02

Grande liberação de substância tóxica cloro, devido à ruptura do tanque de cloro da carreta. Para este cenário, a quantidade de material é liberada instantaneamente e corresponde à massa total armazenada no tanque da carreta, cuja capacidade é de 18.000 kg (dados de projeto). Esta quantidade liberada é denominada  $Q_m^*$ .

$$Q_m^* = 18.000 \text{ kg}$$

#### 6.1.8.3 Cenário 05 – EI-03

Grande liberação de substância tóxica cloro, devido à ruptura no trecho de tubulação entre o tanque T-11 e o tanque T-602, ou no vaporizador de cloro, M-603. Tomando-se como elemento



central deste cenário o trocador de calor M-603, que tem como objetivo a total vaporização do cloro antes da chegada ao processo, torna-se adequada a aplicação do Modelo 6.1.1 – vazamento de gás através de um orifício.

Tabela 6.2 - Dados para o cálculo da taxa de vazamento do cenário 05

|  |   |
|--|---|
| <sup>1</sup> $P_o$ - pressão interna                   | 1,56x10 <sup>5</sup> Pa                           |
| $P$ - pressão ambiente                                 | 10 <sup>5</sup> Pa                                |
| <sup>2</sup> $\gamma$ - relação de calores específicos | 1,33  |
| <sup>3</sup> $C_o$ - coeficiente de descarga           | 1,00  |
| $d$ - diâmetro do orifício                             | 1/4" = 0,635x10 <sup>-2</sup> m                   |
| $R_g$ - constante dos gases ideais                     | 8,3143x10 <sup>3</sup> Pa m <sup>3</sup> /kgmol K |
| $M$ - massa molecular do vapor ou gás que escapa       | 71 g/gmol   |
| <sup>4</sup> $T_o$ - temperatura da fonte              | 385,92 K  |
| $g_c$ - constante gravitacional                        | 1 (kg m/s <sup>2</sup> )/N                        |

<sup>1</sup> Pressão de operação do trocador de calor M-603.

<sup>2</sup> Fonte: Crowl, D.A.; Louvar, J.F. Chemical Process Safety, Tabela 4-3 p.134

<sup>3</sup> Quando o coeficiente de descarga é desconhecido, usa-se o valor 1,0 para maximizar os cálculos de escoamento. Encontram-se disponíveis mais detalhes sobre o coeficiente de descarga em: Robert H. Perry and Don W. Green, Perry's Chemical Engineers Handbook, 7th Ed. (New York: McGrawHill, 1997), PP.10-16.

<sup>4</sup> Fonte: J.M.Smith, H.C.Van Ness e M.M.Abbott, Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química, 5<sup>a</sup>. Ed. (LTC editora, 2000), PP. 648, apêndice F. Desprezando as perdas do vaporizador, a temperatura de operação será aproximadamente igual a temperatura do vapor saturado que entra a 22,7 psia., consultada na Tabela do apêndice F.

- Cálculo da Pressão Crítica:

$$\left(\frac{P_{CRÍTICA}}{P_o}\right) = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right)} \quad (6.2)$$

$$P_{CRÍTICA} = 0,84 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Como

$$\left(\frac{P}{P_o}\right) \geq \left(\frac{P_{CRÍTICA}}{P_o}\right)$$

conclui-se que se trata de um escoamento subsônico, onde a equação 6.3 se aplica.



- Cálculo da Área:

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$A = 3,17 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

- Cálculo da taxa de vazamento:

$$Q_m = C_o A P_o \sqrt{\frac{2g_c M}{R_g T_o} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[ \left( \frac{P}{P_o} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{P}{P_o} \right)^{\frac{(\gamma+1)}{\gamma}} \right]} \quad (6.3)$$

$$Q_m = 1,528 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$$

O cálculo da taxa de vazamento fornece o valor de 0,015 quilogramas de gás cloro lançados por segundo na atmosfera.

#### 6.1.8.4 Cenário 06 – EI-04

Grande liberação de substância tóxica cloro devido à ruptura no tanque de estocagem de cloro T-11. Para este cenário, a quantidade de material é liberada instantaneamente e corresponde à massa total armazenada no tanque de estocagem T-11, cuja capacidade é de 26.000 kg (dados de projeto).

$$Q_m^* = 26.000 \text{ kg}$$

## 6.2 Modelos de Dispersão Atmosférica

O modelo de dispersão atmosférica possibilita estabelecer uma relação entre os níveis de emissão dos poluentes na fonte com as concentrações dos mesmos no ar, bem como, a determinação de pontos críticos de poluição (MITKIEWICZ & MELO, 2002).

A abordagem teórica para dispersão de poluentes no ar utiliza modelos matemáticos que simulam a liberação do material, descrevendo seu gradiente de concentração a partir de dados da fonte emissora, das características do material que está sendo transportado e das condições meteorológicas. Estes modelos buscam representar o comportamento do poluente, fazendo uma estimativa do alcance da nuvem por ele formada.

O transporte de uma substância química, após sua liberação na atmosfera, é conduzido pelas correntes aéreas na forma de uma nuvem ou de um puff (liberação instantânea). Esta formação está relacionada com as características da liberação do efluente disperso (VAZ, 2008).

Os modelos de puff e nuvem são comumente adotados para descrever a dispersão de vapores. O primeiro é utilizado para determinar a concentração temporal de uma quantidade fixa de material liberado instantaneamente, exemplificado pela súbita ruptura de um vaso de estocagem. Já o modelo de nuvem descreve a concentração estacionária do material liberado continuamente de uma fonte, como em uma chaminé. As diferenças na forma de dispersão entre os dois modelos são apresentadas nas Figuras 6.2 e 6.3.

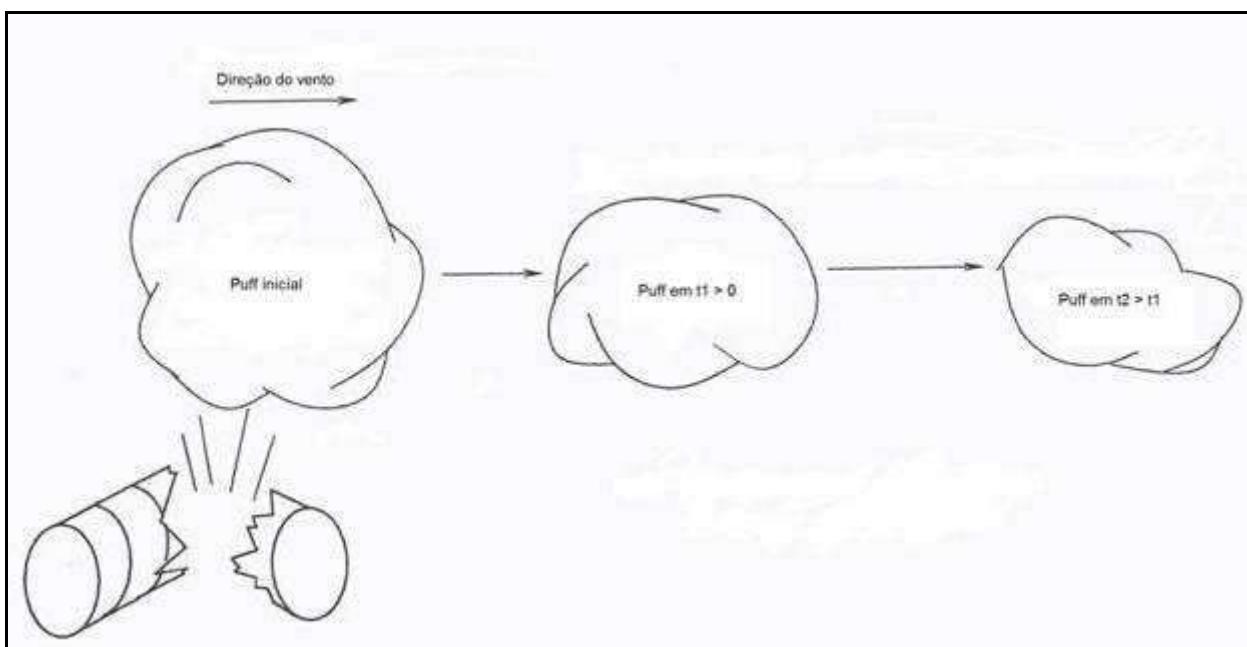


Figura 6.2 – Puff formado pela liberação instantânea de material

Fonte: CROWL & LOUVAR, 2002

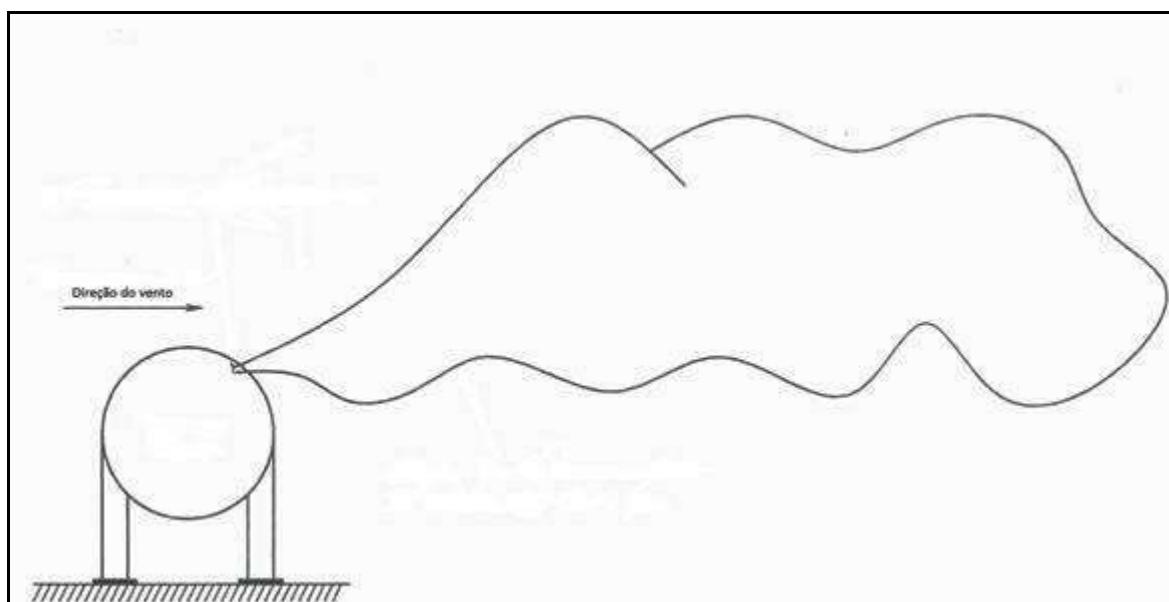


Figura 6.3 – Liberação contínua de material

Fonte: CROWL & LOUVAR, 2002

A máxima concentração de substância química acontece no ponto de vazamento (que pode não estar no nível do solo), diminuindo à medida que ocorre a dispersão da mistura tóxica com o ar. Esta concentração é afetada por uma variedade de parâmetros, tais como:

- Velocidade do vento;
- Estabilidade atmosférica;
- Condições de relevo (construções, rios, árvores);
- Altura do vazamento.



Para a determinação da concentração de material liberado a partir de um vazamento, parte-se da equação de advecção (Eq. 6.10). Assume-se um sistema sem reação e sem difusão molecular, ou seja, a variação de concentração só será dada pela velocidade do vento e não pela difusão entre as moléculas.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (u_j C)}{\partial x_j} = 0 \quad (6.10)$$

Onde:

$C$  é a concentração

$t$  é o tempo

$u_j$  é a velocidade do vento

$x_j$  é a coordenada direcional

$j$  representa o somatório nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$

Se a velocidade do vento na equação 6.10 fosse tomada como a velocidade média, encontraria-se que o material se dispersa mais rapidamente do que o predito. Isto é devido à turbulência no campo de velocidades. Caso se pudesse especificar a velocidade do vento de forma exata, em função da posição e do tempo, incluindo-se os efeitos devido à turbulência, a concentração predita pela equação 6.10 seria a correta. No entanto, não existem modelos apropriados para descrever a turbulência. Como aproximação, considera-se a velocidade do vento representada por uma velocidade média e por uma flutuação estocástica resultante da turbulência, de acordo com a seguinte expressão:

$$u_j = \langle u_j \rangle + u'_j$$

Onde:

$u_j$  é a velocidade do vento

$\langle u_j \rangle$  é a velocidade média do vento

$u'_j$  é a velocidade estocástica do vento

Segue que a concentração de material disperso,  $C$ , também flutua devido ao campo de velocidades. A concentração estocástica é função da turbulência do sistema, logo:

$$C = \langle C \rangle + C'$$

Onde:

$C$  é a concentração

$\langle C \rangle$  é a concentração média

$C'$  é a concentração estocástica

Devido às flutuações em ambos  $C$  e  $u_j$  estarem em torno dos valores médios, segue-se que as médias destas flutuações são nulas:  $\langle u'_j \rangle = 0$  e  $\langle C' \rangle = 0$ .

Para se descrever o fluxo turbulento, uma equação adicional é necessária. A abordagem mais usual é definir uma difusividade turbulenta,  $K_j$ , conforme a equação 6.11.

$$\langle u'_j C' \rangle = -K_j \frac{\partial \langle C \rangle}{\partial x_j} \quad (6.11)$$



Substitui-se a equação 6.11 e as novas expressões para  $u_j$  e  $C$  na equação 6.10. Tomando-se a média da concentração em relação ao tempo e assumindo atmosfera incompressível, obtém-se, após algumas passagens matemáticas, a equação 6.12.

$$\frac{\partial \langle C \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle C \rangle}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( K_j \frac{\partial \langle C \rangle}{\partial x_j} \right) \quad (6.12)$$

Esta equação juntamente com as hipóteses iniciais forma a base fundamental para a modelagem da dispersão. Todavia, sua aplicação depende da especificação de um valor para a difusividade turbulenta,  $K_j$ . Na maioria das vezes, o  $K_j$  muda com a posição, o tempo, a velocidade do vento e as condições climáticas. Do ponto de vista teórico, a abordagem da difusividade turbulenta é útil, mas não é conveniente do ponto de vista experimental.

SUTTON (1953) resolveu esta dificuldade propondo a definição de um coeficiente de dispersão  $\sigma_x$ , descrito na equação 6.13, com relações similares para  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ .

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{2} \langle C \rangle^2 (ut)^{2-n} \quad (6.13)$$

Onde  $u$  representa a velocidade do vento na direção do eixo dos  $x$ ,  $t$  o tempo,  $\langle C \rangle$  a concentração média de material liberado e  $n$  um parâmetro,  $0 < n < 1$ , que depende das condições atmosféricas.

Os coeficientes de dispersão representam os desvios padrão de concentração nas direções do vento  $x$  (perpendicular);  $y$  (horizontal);  $z$  (vertical).

Tais condições são categorizadas de acordo com seis classes diferentes de estabilidade, a saber:

- A – Extremamente instável
- B – Moderadamente instável
- C – Levemente instável
- D – Neutra
- E – Levemente estável
- F – Moderadamente estável

Estas classes dependem da velocidade do vento e da intensidade da radiação solar, conforme mostrado na Tabela 6.3.



Tabela 6.3 - Classes de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gifford

| Velocidade<br>do vento<br>superficial<br>a 10m (m/s) | Entrada de Radiação Solar <sup>1</sup> |          |       | Condições Noturnas <sup>2</sup>             |                                   |
|--|--|----------|-------|---|-----------------------------------|
|  | Forte                                  | Moderada | Fraca | Encoberto<br>ou >4/8 de<br>nuvens<br>baixas | $\leq 3/8$ de<br>nuvens<br>baixas |
|  |  |          |       |   |                                   |
| < 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                                 |

<sup>1</sup> Radiação solar forte corresponde ao meio dia de um dia ensolarado no meio do verão da Inglaterra. Radiação solar fraca corresponde a condições similares, mas no meio do inverno.

<sup>2</sup> Condições noturnas correspondem ao período de uma hora antes do nascer do sol e uma hora após o pôr do sol.

Fonte: CROWL & LOUVAR, 2002.

Os coeficientes  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  para fonte contínua e instantânea foram desenvolvidos por Gifford e são apresentados nas Figuras de 6.4 a 6.6, e as correlações correspondentes são apresentadas nas Tabelas 6.4 e 6.5. Não são fornecidos valores de  $\sigma_x$ , uma vez que é razoável admitir-se que  $\sigma_x = \sigma_y$ .

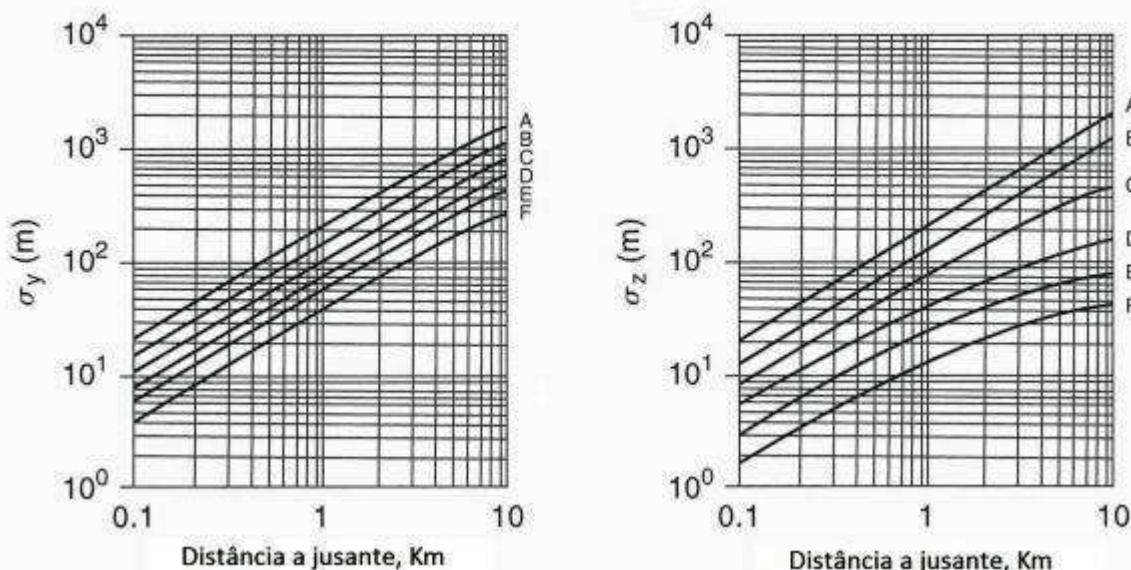


Figura 6.4 – Coeficientes de dispersão para o modelo de nuvem em área rural  
Fonte: CROWL & LOUVAR, 2002

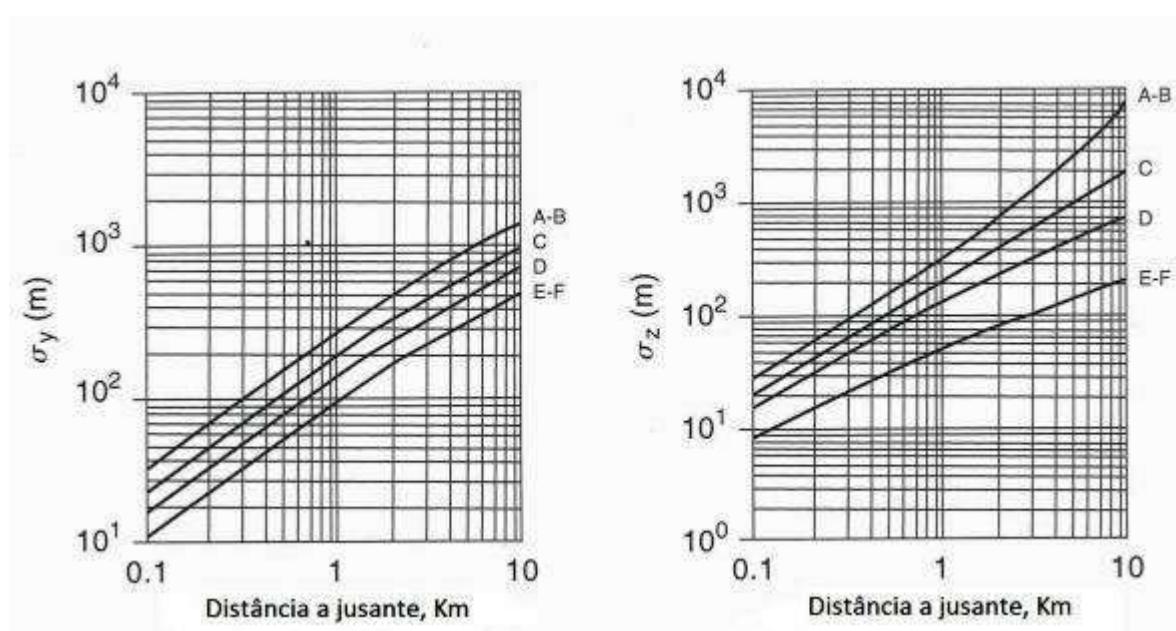


Figura 6.5 – Coeficientes de dispersão para o modelo de nuvem em área urbana  
Fonte: CROWL & LOUVAR, 2002

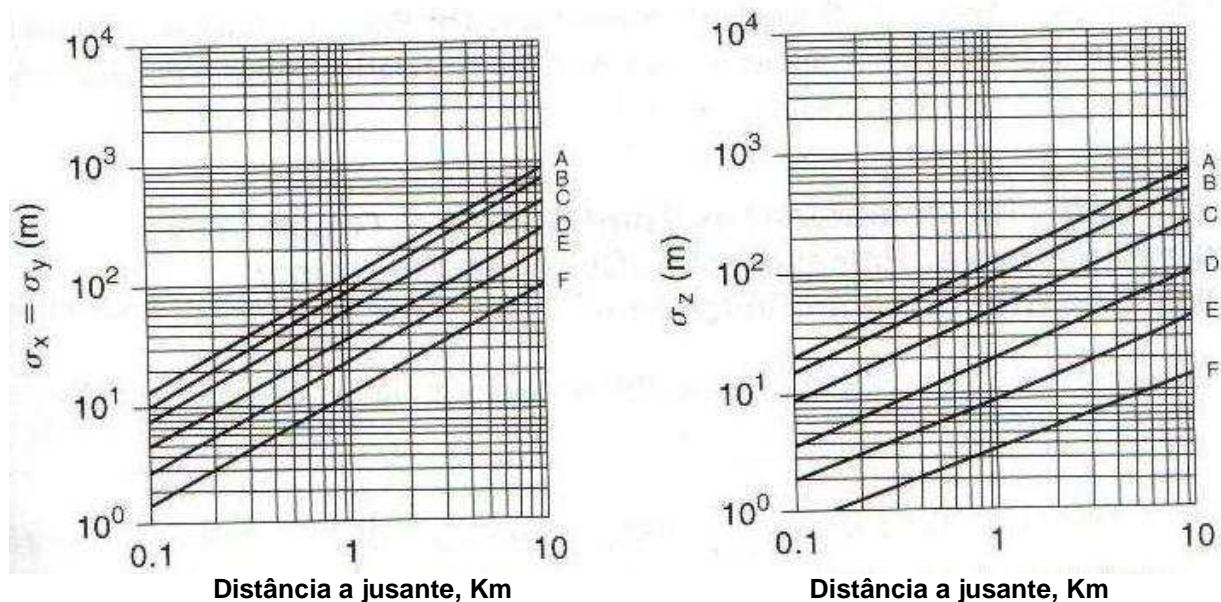


Figura 6.6 – Coeficientes de dispersão para o modelo de puff em área urbana  
Fonte: CROWL & LOUVAR, 2002



Tabela 6.4 – Equações dos coeficientes de dispersão de Pasquill-Gifford para nuvem, com distância à fonte em metros

| Classes de Estabilidade de Pasquill-Gifford | $\sigma_y$ (m)            | $\sigma_z$ (m)            |
|---|---------------------------|---------------------------|
| <b>Área Rural</b>                           |                           |                           |
| A   | $0,22x(1+0,0001x)^{-1/2}$ | $0,20x$                   |
| B   | $0,16x(1+0,0001x)^{-1/2}$ | $0,12x$                   |
| C   | $0,11x(1+0,0001x)^{-1/2}$ | $0,08x(1+0,0002x)^{-1/2}$ |
| D   | $0,08x(1+0,0001x)^{-1/2}$ | $0,06x(1+0,0015x)^{-1/2}$ |
| E   | $0,06x(1+0,0001x)^{-1/2}$ | $0,03x(1+0,0003x)^{-1}$   |
| F   | $0,04x(1+0,0001x)^{-1/2}$ | $0,016x(1+0,0003x)^{-1}$  |
| <b>Área Urbana</b>                          |                           |                           |
| A – B                                       | $0,32x(1+0,0004x)^{-1/2}$ | $0,24x(1+0,0001x)^{+1/2}$ |
| C   | $0,22x(1+0,0004x)^{-1/2}$ | $0,20x$                   |
| D   | $0,16x(1+0,0004x)^{-1/2}$ | $0,14x(1+0,0003x)^{-1/2}$ |
| E – F                                       | $0,11x(1+0,0004x)^{-1/2}$ | $0,08x(1+0,0015x)^{-1/2}$ |

Fonte: CROWL & LOUVAR, 2002

Tabela 6.5 – Equações dos coeficientes de dispersão de Pasquill-Gifford para puff, com distância à fonte em metros

| Classes de Estabilidade de Pasquill-Gifford | $\sigma_y$ ou $\sigma_x$ (m) | $\sigma_z$ (m) |
|---|------------------------------|----------------|
| A   | $0,18x^{0,92}$               | $0,60x^{0,75}$ |
| B   | $0,14x^{0,92}$               | $0,53x^{0,73}$ |
| C   | $0,10x^{0,92}$               | $0,34x^{0,71}$ |
| D   | $0,06x^{0,92}$               | $0,15x^{0,70}$ |
| E   | $0,04x^{0,92}$               | $0,10x^{0,65}$ |
| F   | $0,02x^{0,89}$               | $0,05x^{0,61}$ |

Fonte: CROWL & LOUVAR, 2002

Para as condições descritas nos cenários selecionados na técnica de Análise Preliminar de Perigo (APP), tem-se que os cenários 02 e 05 correspondem a liberações do tipo nuvem; e os cenários 03 e 06 do tipo puff. Para cada um dos casos a expressão da concentração média foi



deduzida, juntamente com as correlações para coeficientes de dispersão, dando origem as equações denominadas modelo de Pasquill-Gifford (CROWL&LOUVAR, 2002).

A Eq. 6.14, que corresponde aos cenários 02 e 05, é representativa de uma liberação do tipo nuvem.

$$\langle C \rangle (x, y, z) = \frac{Q_m}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H_r}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H_r}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (6.14)$$

Onde:

$Q_m$  é a taxa mássica de vazamento

$H_r$  representa a altura efetiva de liberação de material para a atmosfera

$u$  é a velocidade do vento

$\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  são os coeficientes de dispersão nas direções do vento

$x$ ,  $y$  e  $z$  representam as direções do vento.

A aplicação prática da equação 6.14 nos cenários em estudo fornece a concentração da substância cloro a uma dada distância da fonte.

A equação 6.15, que corresponde aos cenários 03 e 06, é representativa de uma liberação do tipo puff. Neste caso, a concentração de poluentes evolui no tempo e no espaço. O movimento do puff é calculado em cada intervalo de tempo, movendo-se o seu centro de massa de acordo com o vento presente naquele ponto e naquele instante.

$$\begin{aligned} \langle C \rangle (x, y, z, t) = & \frac{Q_m^*}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H_r}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H_r}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \\ & \times \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-ut}{\sigma_x}\right)^2\right] \end{aligned} \quad (6.15)$$

Onde:

$Q_m^*$  é a quantidade total liberada

$H_r$  representa a altura efetiva de liberação de material para a atmosfera

$u$  é a velocidade do vento

$\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  são os coeficientes de dispersão nas direções do vento

$x$ ,  $y$  e  $z$  representam as direções do vento

$t$  é o tempo desde a ocorrência do puff

Esta equação considera que o sistema de coordenadas está fixado no ponto de vazamento. Sua aplicação prática nos cenários identificados fornece a concentração da substância cloro a uma dada distância da fonte, decorrido determinado tempo desde a ocorrência do puff.

Para ambos os casos, são feitas as seguintes considerações:

### **Taxa mássica de vazamento**

As taxas mássicas de vazamento consideradas são as calculadas no item 6.1.8 deste capítulo.



## Área urbana

O empreendimento está localizado numa região ocupada por indústrias, residências e pequeno comércio.

### Classe de estabilidade atmosférica

De acordo com o modelo de Pasquill-Gifford, a classe de estabilidade atmosférica para a região é neutra, ou seja, Classe **D**.

### Direção da dispersão

Unidirecional em x.

### Velocidades do vento

Foram consideradas as três velocidades médias do vento características da região.

### Altura da fonte

A fonte de liberação de cloro no cenário 02 encontra-se ao nível do solo. Nos cenários 03 e 06, a altura da fonte está a três metros de altura e no cenário 05 está a cinco metros, que corresponde à posição do trocador de calor M-603.

### 6.2.1 Cálculo da Dispersão Atmosférica

A partir dos cálculos de dispersão atmosférica para cada cenário analisado, é possível avaliar se a vizinhança localizada ao redor do empreendimento está exposta a uma concentração que cause danos a sua saúde. Para tal, utiliza-se como referência o valor do IDLH - do inglês "Immediately Dangerous to Life and Health" (Imediatamente perigoso para vida e saúde) que representa a máxima concentração de substância no ar à qual pode se expor uma pessoa por 30 minutos sem danos irreversíveis. Valores de concentrações (IDLH) para substâncias são estabelecidos pelo NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health - USA). Para o cloro, o IDLH estabelecido é de 10 ppm ou  $30 \times 10^{-6}$  kg/m<sup>3</sup>.

#### 6.2.1.1 Cenário 02 – EI-01

Foram estabelecidos três pontos específicos de interesse: o raio da fábrica, 275 m, o raio que engloba a população do entorno bem como fábricas vizinhas, 680 m, e o raio da escola mais próxima, 1.000 m. Os dados e os resultados da aplicação da Eq. 6.14 para este cenário estão mostrados na Tabela 6.6.



Tabela 6.6 - Dados e resultados para o cálculo das concentrações

| $Q_m$ (Kg/s) | $u$ (m/s) | $x$ (m) | $y$ (m) | $z$ (m) | $H_r$ (m) | $\langle C \rangle$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $\langle C \rangle$ (ppm) |
|--------------|-----------|---------|---------|---------|-----------|--|---------------------------|
| 49,35        | 1,0       | 275     | 0,0     | 0,0     | 0,0       | $1,01 \times 10^{-2}$                    | 3.478                     |
|              |           | 680     |         |         |           | $1,87 \times 10^{-3}$                    | 644                       |
|              |           | 1.000   |         |         |           | $9,46 \times 10^{-4}$                    | 326                       |
| 49,35        | 3,0       | 275     | 0,0     | 0,0     | 0,0       | $3,38 \times 10^{-3}$                    | 1.164                     |
|              |           | 680     |         |         |           | $6,25 \times 10^{-4}$                    | 215                       |
|              |           | 1.000   |         |         |           | $3,15 \times 10^{-4}$                    | 108                       |
| 49,35        | 5,0       | 275     | 0,0     | 0,0     | 0,0       | $2,03 \times 10^{-3}$                    | 699                       |
|              |           | 680     |         |         |           | $3,75 \times 10^{-4}$                    | 129                       |
|              |           | 1.000   |         |         |           | $1,89 \times 10^{-4}$                    | 65                        |

Todas as concentrações encontradas, para as diferentes velocidades de vento consideradas, encontram-se bastante acima do valor do IDLH.

### 6.2.1.2 Cenário 03 – EI-02

Para o caso de dispersão do tipo puff, torna-se necessária uma abordagem diferenciada, uma vez que a nuvem de poluente muda de posição de acordo com o tempo. Portanto foram considerados dois intervalos de tempo e, para cada um deles, calculou-se a concentração em diversas distâncias da fonte do incidente, de modo a identificar a localização do puff em cada tempo. Os dados e os resultados da aplicação da Eq. 6.15 para este cenário estão mostrados nas Tabelas 6.7 a 6.12.



- Intervalo de tempo desde a ocorrência do puff: 60 segundos.

$u = 1,0 \text{ m/s}$

Tabela 6.7 - Dados e resultados para o cálculo das concentrações

| $Q_m^*$ (Kg) | $x$ (m) | $y$ (m) | $z$ (m) | $H_r$ (m) | $< C >$ ( $\text{kg/m}^3$ ) | $< C >$ (ppm)     |
|--------------|---------|---------|---------|-----------|-----------------------------|-------------------|
| 18.000       | 30      | 0,0     | 0,0     | 3,0       | 0,00                        | 0,00              |
|              | 40      |         |         |           | 0,00                        | 0,00              |
|              | 50      |         |         |           | $2,70 \times 10^{-3}$       | 940               |
|              | 60      |         |         |           | 67,40                       | <b>23.212.420</b> |
|              | 70      |         |         |           | $1,92 \times 10^{-1}$       | 66.231            |
|              | 80      |         |         |           | $1,00 \times 10^{-6}$       | 3,48              |
|              | 90      |         |         |           | 0,00                        | 0,00              |
|              | 100     |         |         |           | 0,00                        | 0,00              |

Para esta velocidade de vento, decorridos 60 segundos do incidente, a localização mais provável do puff é a uma distância de 60 metros da fonte. Observa-se, ainda, que nestas condições o alcance máximo do material disperso em forma de puff é de cerca de 80 metros.

$u = 3,0 \text{ m/s}$

Tabela 6.8 - Dados e resultados para o cálculo das concentrações

| $Q_m^*$ (Kg) | $x$ (m) | $y$ (m) | $z$ (m) | $H_r$ (m) | $< C >$ ( $\text{kg/m}^3$ ) | $< C >$ (ppm)    |
|--------------|---------|---------|---------|-----------|-----------------------------|------------------|
| 18.000       | 50      | 0,0     | 0,0     | 3,0       | 0,00                        | 0,00             |
|              | 100     |         |         |           | 0,00                        | 0,00             |
|              | 150     |         |         |           | $4,39 \times 10^{-5}$       | 15               |
|              | 180     |         |         |           | 6,88                        | <b>2.370.435</b> |
|              | 190     |         |         |           | 2,49                        | 856.527          |
|              | 200     |         |         |           | 0,21                        | 72.251           |
|              | 220     |         |         |           | $8,03 \times 10^{-5}$       | 27,67            |
|              | 240     |         |         |           | 0,00                        | 0,00             |

Para esta velocidade de vento, decorridos 60 segundos do incidente, a localização mais provável do puff é a uma distância de 180 metros da fonte. Observa-se, ainda, que nestas condições o alcance máximo do material disperso em forma de puff é de cerca de 220 metros.

**u = 5,0 m/s**

Tabela 6.9 - Dados e resultados para o cálculo das concentrações

| $Q_m^*$ (Kg) | x (m)      | y (m) | z (m) | $H_r$ (m) | $< C >$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $< C >$ (ppm)  |
|--------------|------------|-------|-------|-----------|------------------------------|----------------|
| 18.000       | 100        | 0,0   | 0,0   | 3,0       | 0,00                         | 0,00           |
|              | 150        |       |       |           | 0,00                         | 0,00           |
|              | 280        |       |       |           | 0,42                         | 143.615        |
|              | <b>300</b> |       |       |           | 2,02                         | <b>695.373</b> |
|              | 320        |       |       |           | 0,44                         | 151.567        |
|              | 350        |       |       |           | $9,96 \cdot 10^{-4}$         | 343            |
|              | 380        |       |       |           | $1,37 \cdot 10^{-7}$         | 0,05           |
|              | 400        |       |       |           | 0,00                         | 0,00           |

Para esta velocidade de vento, decorridos 60 segundos do incidente, a localização mais provável do puff é a uma distância de 300 metros da fonte. Observa-se, ainda, que nestas condições o alcance máximo do material disperso em forma de puff é de cerca de 380 metros.

- Intervalo de tempo desde a ocorrência do puff: 300 segundos.**

**u = 1,0m/s**

Tabela 6.10 - Dados e resultados para o cálculo das concentrações

| $Q_m^*$ (Kg) | x (m)      | y (m) | z (m) | $H_r$ (m) | $< C >$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $< C >$ (ppm)  |
|--------------|------------|-------|-------|-----------|------------------------------|----------------|
| 18.000       | 230        | 0,0   | 0,0   | 3,0       | 0,00                         | 0,00           |
|              | 250        |       |       |           | $4,60 \cdot 10^{-6}$         | 1,58           |
|              | 280        |       |       |           | 0,42                         | 143.615        |
|              | <b>300</b> |       |       |           | 2,02                         | <b>695.373</b> |
|              | 320        |       |       |           | 0,44                         | 151.567        |
|              | 340        |       |       |           | 0,01                         | 3.867          |
|              | 360        |       |       |           | $6,50 \cdot 10^{-5}$         | 22,40          |
|              | 380        |       |       |           | 0,00                         | 0,00           |

Para esta velocidade de vento, decorridos 300 segundos do incidente, a localização mais provável do puff é a uma distância de 300 metros da fonte. Observa-se, ainda, que nestas condições o alcance máximo do material disperso em forma de puff é de cerca de 360 metros.



**u = 3,0m/s**

Tabela 6.11 - Dados e resultados para o cálculo das concentrações

| $Q_m^*$ (Kg) | x (m)      | y (m) | z (m) | $H_r$ (m) | $< C >$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $< C >$ (ppm) |
|--------------|------------|-------|-------|-----------|------------------------------|---------------|
| 18.000       | 700        | 0,0   | 0,0   | 3,0       | 0,00                         | 0,00          |
|              | 800        |       |       |           | $3,15 \cdot 10^{-4}$         | 109           |
|              | 850        |       |       |           | $3,67 \cdot 10^{-2}$         | 12.646        |
|              | 880        |       |       |           | 0,11                         | 38.543        |
|              | <b>900</b> |       |       |           | 0,13                         | <b>45.035</b> |
|              | 930        |       |       |           | 0,08                         | 26.934        |
|              | 1.000      |       |       |           | $1,50 \cdot 10^{-3}$         | 521           |
|              | 1.100      |       |       |           | $6,06 \cdot 10^{-8}$         | 0,02          |

Para esta velocidade de vento, decorridos 300 segundos do incidente, a localização mais provável do puff é a uma distância de 900 metros da fonte. Observa-se, ainda, que nestas condições o alcance máximo do material disperso em forma de puff é de cerca de 1.100 metros.

**u = 5,0 m/s**

Tabela 6.12 - Dados e resultados para o cálculo das concentrações

| $Q_m^*$ (Kg) | x (m)        | y (m) | z (m) | $H_r$ (m) | $< C >$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $< C >$ (ppm) |
|--------------|--------------|-------|-------|-----------|------------------------------|---------------|
| 18.000       | 1.200        | 0,0   | 0,0   | 3,0       | 0,00                         | 0,00          |
|              | 1.300        |       |       |           | $1,65 \cdot 10^{-6}$         | 0,60          |
|              | 1.400        |       |       |           | $4,48 \cdot 10^{-3}$         | 1.543         |
|              | 1.450        |       |       |           | $2,30 \cdot 10^{-2}$         | 7.921         |
|              | <b>1.500</b> |       |       |           | $3,60 \cdot 10^{-2}$         | <b>12.396</b> |
|              | 1.550        |       |       |           | $2,07 \cdot 10^{-2}$         | 7.144         |
|              | 1.600        |       |       |           | $5,20 \cdot 10^{-3}$         | 1.800         |
|              | 1.800        |       |       |           | $6,30 \cdot 10^{-8}$         | 0,02          |

Para esta velocidade de vento, decorridos 300 segundos do incidente, a localização mais provável do puff é a uma distância de 1.500 metros da fonte. Observa-se, ainda, que nestas condições o alcance máximo do material disperso em forma de puff é de cerca de 1.800 metros.

Também para este cenário, todas as concentrações encontradas, para as diferentes velocidades de vento e nos dois intervalos de tempo considerados, encontram-se bastante acima do valor do IDLH.



### 6.2.1.3 Cenário 05 – EI-03

Os dados e os resultados da Eq. 6.14 para este cenário estão mostrados na Tabela 6.13.

Tabela 6.13 – Dados e resultados para o cálculo das concentrações

| $Q_m$ (Kg/s)          | $u$ (m/s) | $x$ (m) | $y$ (m) | $z$ (m) | $H_r$ (m) | $\langle C \rangle$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $\langle C \rangle$ (ppm) |
|-----------------------|-----------|---------|---------|---------|-----------|--|---------------------------|
| $1,58 \times 10^{-2}$ | 1,0       | 275     | 0,0     | 0,0     | 5,0       | $3,35 \times 10^{-6}$                    | 1,15                      |
|                       |           | 680     |         |         |           | $6,10 \times 10^{-7}$                    | 0,21                      |
|                       |           | 1000    |         |         |           | $3,05 \times 10^{-7}$                    | $1,05 \times 10^{-1}$     |
| $1,58 \times 10^{-2}$ | 3,0       | 275     | 0,0     | 0,0     | 5,0       | $1,12 \times 10^{-6}$                    | $3,86 \times 10^{-1}$     |
|                       |           | 680     |         |         |           | $2,03 \times 10^{-7}$                    | $7,00 \times 10^{-2}$     |
|                       |           | 1000    |         |         |           | $1,02 \times 10^{-7}$                    | $3,50 \times 10^{-2}$     |
| $1,58 \times 10^{-2}$ | 5,0       | 275     | 0,0     | 0,0     | 5,0       | $6,71 \times 10^{-7}$                    | $2,31 \times 10^{-1}$     |
|                       |           | 680     |         |         |           | $1,22 \times 10^{-7}$                    | $4,20 \times 10^{-2}$     |
|                       |           | 1000    |         |         |           | $6,12 \times 10^{-8}$                    | $2,10 \times 10^{-2}$     |

Os resultados da Tabela 6.13 mostram que o efetivo da fábrica e a vizinhança localizada ao redor do empreendimento está exposta a uma concentração bastante inferior ao valor do IDLH. Portanto o vazamento hipotético de cloro pelo trocador de calor M-603 permite a exposição de uma pessoa durante trinta minutos sem que haja danos irreversíveis a sua saúde.

### 6.2.1.4 Cenário 06 – EI-04

Para este caso, onde a dispersão também é do tipo puff, foram considerados dois intervalos de tempo e, para cada um deles, calculou-se a concentração em diferentes distâncias da fonte do incidente, de modo a identificar a localização do puff em cada tempo. Os dados e os resultados da aplicação da Eq. 6.15 para este cenário estão mostrados nas Tabelas 6.14 a 6.19.



- Intervalo de tempo desde a ocorrência do puff: 60 segundos.

$u = 1,0 \text{ m/s}$

Tabela 6.14 - Dados e resultados para o cálculo das concentrações

| $Q_m^*$ (Kg) | $x$ (m)   | $y$ (m) | $z$ (m) | $H_r$ (m) | $\langle C \rangle$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $\langle C \rangle$ (ppm) |
|--------------|-----------|---------|---------|-----------|--|---------------------------|
| 26.000       | 40        | 0,0     | 0,0     | 3,0       | 0,00                                     | 0,00                      |
|              | 50        |         |         |           | $3,90 \times 10^{-3}$                    | 1.358                     |
|              | 55        |         |         |           | 12,63                                    | 4.349.456                 |
|              | <b>60</b> |         |         |           | 97,40                                    | <b>33.529.051</b>         |
|              | 65        |         |         |           | 17,14                                    | 5.901.014                 |
|              | 70        |         |         |           | 0,28                                     | 95.667                    |
|              | 80        |         |         |           | $1,50 \times 10^{-6}$                    | 0,50                      |
|              | 90        |         |         |           | 0,00                                     | 0,00                      |

Para esta velocidade de vento, decorridos 60 segundos do incidente, a localização mais provável do puff é a uma distância de 60 metros da fonte. Observa-se, ainda, que nestas condições o alcance máximo do material disperso em forma de puff é de cerca de 80 metros.

$u = 3,0 \text{ m/s}$

Tabela 6.15 - Dados e resultados para o cálculo das concentrações

| $Q_m^*$ (Kg) | $x$ (m)    | $y$ (m) | $z$ (m) | $H_r$ (m) | $\langle C \rangle$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $\langle C \rangle$ (ppm) |
|--------------|------------|---------|---------|-----------|--|---------------------------|
| 26.000       | 140        | 0,0     | 0,0     | 3,0       | 0,00                                     | 0,00                      |
|              | 150        |         |         |           | $6,34 \times 10^{-5}$                    | 22                        |
|              | 160        |         |         |           | $9,86 \times 10^{-2}$                    | 33.940                    |
|              | 170        |         |         |           | 3,81                                     | 1.311.708                 |
|              | <b>180</b> |         |         |           | 9,94                                     | <b>3.423.963</b>          |
|              | 190        |         |         |           | 3,59                                     | 1.237.206                 |
|              | 200        |         |         |           | 0,30                                     | 104.364                   |
|              | 230        |         |         |           | $8,71 \times 10^{-7}$                    | 0,30                      |

Para esta velocidade de vento, decorridos 60 segundos do incidente, a localização mais provável do puff é a uma distância de 180 metros da fonte. Observa-se, ainda, que nestas condições o alcance máximo do material disperso em forma de puff é de cerca de 230 metros.

**u = 5,0 m/s**

Tabela 6.16 - Dados e resultados para o cálculo das concentrações

| $Q_m^*$ (Kg) | x (m)      | y (m) | z (m) | $H_r$ (m) | $< C >$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $< C >$ (ppm)    |
|--------------|------------|-------|-------|-----------|------------------------------|------------------|
| 26.000       | 250        | 0,0   | 0,0   | 3,0       | $6,60 \cdot 10^{-6}$         | 2,28             |
|              | 280        |       |       |           | 0,60                         | 207.444          |
|              | 290        |       |       |           | 2,10                         | 724.767          |
|              | <b>300</b> |       |       |           | 2,92                         | <b>1.004.428</b> |
|              | 310        |       |       |           | 1,87                         | 645.525          |
|              | 320        |       |       |           | 0,64                         | 218.930          |
|              | 340        |       |       |           | $1,60 \cdot 10^{-2}$         | 5.586            |
|              | 380        |       |       |           | $1,98 \cdot 10^{-7}$         | 0,07             |

Para esta velocidade de vento, decorridos 60 segundos do incidente, a localização mais provável do puff é a uma distância de 300 metros da fonte. Observa-se, ainda, que nestas condições o alcance máximo do material disperso em forma de puff é de cerca de 380 metros.

- **Intervalo de tempo desde a ocorrência do puff: 300 segundos.**

**u = 1,0 m/s**

Tabela 6.17 - Dados e resultados para o cálculo das concentrações

| $Q_m^*$ (Kg) | x (m)      | y (m) | z (m) | $H_r$ (m) | $< C >$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $< C >$ (ppm)    |
|--------------|------------|-------|-------|-----------|------------------------------|------------------|
| 26.000       | 250        | 0,0   | 0,0   | 3,0       | $6,61 \cdot 10^{-6}$         | 2,28             |
|              | 280        |       |       |           | 0,60                         | 207.444          |
|              | 290        |       |       |           | 2,10                         | 724.767          |
|              | <b>300</b> |       |       |           | 2,92                         | <b>1.004.428</b> |
|              | 310        |       |       |           | 1,87                         | 645.525          |
|              | 320        |       |       |           | 0,64                         | 218.930          |
|              | 350        |       |       |           | $1,44 \cdot 10^{-3}$         | 495              |
|              | 380        |       |       |           | $1,00 \cdot 10^{-7}$         | 0,07             |

Para esta velocidade de vento, decorridos 300 segundos do incidente, a localização mais provável do puff é a uma distância de 300 metros da fonte. Observa-se, ainda, que nestas condições o alcance máximo do material disperso em forma de puff é de cerca de 380 metros.



**u = 3,0 m/s**

Tabela 6.18 - Dados e resultados para o cálculo das concentrações

| $Q_m^*$ (Kg) | x (m)      | y (m) | z (m) | $H_r$ (m) | $\langle C \rangle$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $\langle C \rangle$ (ppm) |
|--------------|------------|-------|-------|-----------|--|---------------------------|
| 26.000       | 700        | 0,0   | 0,0   | 3,0       | 0,00                                     | 0,00                      |
|              | 800        |       |       |           | $4,56 \times 10^{-4}$                    | 157                       |
|              | 850        |       |       |           | 0,05                                     | 18.266                    |
|              | 880        |       |       |           | 0,16                                     | 55.674                    |
|              | <b>900</b> |       |       |           | 0,19                                     | <b>65.050</b>             |
|              | 930        |       |       |           | 0,11                                     | 38.904                    |
|              | 950        |       |       |           | $5,21 \times 10^{-2}$                    | 17.931                    |
|              | 1.100      |       |       |           | $8,75 \times 10^{-8}$                    | 0,03                      |

Para esta velocidade de vento, decorridos 300 segundos do incidente, a localização mais provável do puff é a uma distância de 900 metros da fonte. Observa-se, ainda, que nestas condições o alcance máximo do material disperso em forma de puff é de cerca de 1.100 metros.

**u = 5,0 m/s**

Tabela 6.19 - Dados e resultados para o cálculo das concentrações

| $Q_m^*$ (Kg) | x (m)        | y (m) | z (m) | $H_r$ (m) | $\langle C \rangle$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $\langle C \rangle$ (ppm) |
|--------------|--------------|-------|-------|-----------|--|---------------------------|
| 26.000       | 1.200        | 0,0   | 0,0   | 3,0       | 0,00                                     | 0,00                      |
|              | 1.300        |       |       |           | $2,40 \times 10^{-6}$                    | 0,82                      |
|              | 1.400        |       |       |           | $6,50 \times 10^{-3}$                    | 2.228                     |
|              | <b>1.500</b> |       |       |           | $5,20 \times 10^{-2}$                    | <b>17.906</b>             |
|              | 1.550        |       |       |           | $3,00 \times 10^{-2}$                    | 10.319                    |
|              | 1.600        |       |       |           | $7,55 \times 10^{-3}$                    | 2.600                     |
|              | 1.700        |       |       |           | $6,80 \times 10^{-5}$                    | 23                        |
|              | 1.800        |       |       |           | 0,00                                     | 0,00                      |

Para esta velocidade de vento, decorridos 300 segundos do incidente, a localização mais provável do puff é a uma distância de 1.500 metros da fonte. Observa-se, ainda, que nestas condições o alcance máximo do material disperso em forma de puff é de cerca de 1.700 metros.

Para este cenário, todas as concentrações encontradas, para as diferentes velocidades de vento e nos dois intervalos de tempo considerados, encontram-se bastante acima do valor do IDLH.



### 6.3 Probit

A análise de vulnerabilidade para substâncias tóxicas tem como objetivo determinar a probabilidade de fatalidades em uma determinada região em consequência da dose máxima inalada por uma pessoa.

Com a distribuição espacial da concentração e o seu tempo de variação numa determinada área, é possível calcular a dose que o indivíduo recebe, devido à exposição do gás tóxico num determinado ponto de interesse (FONTANIVE, 2005).

Para avaliação dos danos causados por liberações acidentais, utilizam-se as equações de Probit (6.16 e 6.17), que permitem relacionar a intensidade do efeito físico com o nível de dano esperado.

$$Y = K_1 + K_2 \ln V \quad (6.16)$$

Onde:

$Y$  é a variável Probit, que está relacionada com a percentagem de morte na área afetada pelo acidente.

$V$  é a variável causativa (sobrepressão, impulso, intensidade do fluxo térmico x tempo de exposição ou concentração x tempo de exposição).

$K_1$  e  $K_2$  são parâmetros específicos para cada tipo de dano e de substância. Os coeficientes  $K_1$  (parâmetro de localização) e  $K_2$  (parâmetro de inclinação) são determinados a partir de dados empíricos.

A percentagem de morte na área afetada pelo acidente corresponde à função de distribuição acumulada de  $Y$ , sendo definida pela equação 6.17.

$$P = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (6.17)$$

Esta correspondência matemática é mais fácil de ser usada na forma de uma tabela, conforme mostrado na Tabela 6.20, na qual a primeira linha e a primeira coluna indicam a percentagem de morte na área afetada correspondente aos valores de probabilidades (Probit) constantes das demais linhas e colunas.



Tabela 6.20 – Relação entre Probit e percentagem de morte na área afetada

| %         | 0    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>0</b>  | 0,00 | 2,67 | 2,95 | 3,12 | 3,25 | 3,36 | 3,45 | 3,52 | 3,59 | 3,66 |
| <b>10</b> | 3,72 | 3,77 | 3,82 | 3,87 | 3,92 | 3,96 | 4,01 | 4,05 | 4,08 | 4,12 |
| <b>20</b> | 4,16 | 4,19 | 4,23 | 4,26 | 4,29 | 4,33 | 4,36 | 4,39 | 4,42 | 4,45 |
| <b>30</b> | 4,48 | 4,50 | 4,53 | 4,56 | 4,59 | 4,61 | 4,64 | 4,67 | 4,69 | 4,72 |
| <b>40</b> | 4,75 | 4,77 | 4,80 | 4,82 | 4,85 | 4,87 | 4,90 | 4,92 | 4,95 | 4,97 |
| <b>50</b> | 5,00 | 5,03 | 5,05 | 5,08 | 5,10 | 5,13 | 5,15 | 5,18 | 5,20 | 5,23 |
| <b>60</b> | 5,25 | 5,28 | 5,31 | 5,33 | 5,36 | 5,39 | 5,41 | 5,44 | 5,47 | 5,50 |
| <b>70</b> | 5,52 | 5,55 | 5,58 | 5,61 | 5,64 | 5,67 | 5,71 | 5,74 | 5,77 | 5,81 |
| <b>80</b> | 5,84 | 5,88 | 5,92 | 5,95 | 5,99 | 6,04 | 6,08 | 6,13 | 6,18 | 6,23 |
| <b>90</b> | 6,28 | 6,34 | 6,41 | 6,48 | 6,55 | 6,64 | 6,75 | 6,88 | 7,05 | 7,33 |
| <b>%</b>  | 0,00 | 0,10 | 0,20 | 0,30 | 0,40 | 0,50 | 0,60 | 0,70 | 0,80 | 0,90 |
| <b>99</b> | 7,33 | 7,37 | 7,41 | 7,46 | 7,51 | 7,58 | 7,65 | 7,75 | 7,88 | 8,09 |

Fonte: CROWL &amp; LOUVAR, 2002

Os parâmetros da equação de Probit para a substância cloro são mostrados na Tabela 6.21.

Tabela 6.21: Parâmetros para a equação Probit relativos ao cloro

| Tipo de dano          | Variável causativa | Parâmetros Probit |       |
|-----------------------|--------------------|-------------------|-------|
|                       |                    | $K_1$             | $K_2$ |
| Morte por intoxicação | $\Sigma C^2 T$     | -8,29             | 0,92  |

Fonte: CROWL &amp; LOUVAR, 2005

Onde:

C= concentração (ppm)

T= intervalo de tempo (min)

Assim, pode-se determinar, a partir dos cálculos de dispersão da nuvem tóxica e do tempo de vazamento, a probabilidade de fatalidade nos raios analisados no item 6.2.1.

### 6.3.1 Cenário 02 – EI-01

O intervalo de tempo máximo de vazamento de cloro adotado neste trabalho foi de 12 minutos, estabelecido a partir do período necessário para o operador vestir os equipamentos de proteção individual e interromper o vazamento de gás. Este dado foi obtido com a ajuda dos colaboradores da fábrica. Na prática o vazamento ocorre até o momento em que a pressão de



vapor do cloro se iguala à pressão atmosférica, quando o vazamento termina (caso nenhum evento ocorra para que haja interrupção desse incidente).

A Tabela 6.22 apresenta as probabilidades de fatalidade calculadas através da equação do Probit (eq. 6.16) para as condições apresentadas.

Tabela 6.22 – Probabilidades de fatalidade

| $u$ (m/s) | $x$ (m) | $\langle C \rangle$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $\langle C \rangle$ (ppm) | Probit | Probabilidade de Fatalidade (%) |
|-----------|---------|--|---------------------------|--------|---------------------------------|
| 1,0       | 275     | $1,01 \times 10^{-2}$                    | 3.478                     | 9,00   | 100                             |
|           | 680     | $1,87 \times 10^{-3}$                    | 644                       | 5,89   | 81                              |
|           | 1.000   | $9,46 \times 10^{-4}$                    | 326                       | 4,64   | 36                              |
| 3,0       | 275     | $3,38 \times 10^{-3}$                    | 1.164                     | 6,99   | 98                              |
|           | 680     | $6,25 \times 10^{-4}$                    | 215                       | 3,88   | 13                              |
|           | 1.000   | $3,15 \times 10^{-4}$                    | 108                       | 2,61   | 0                               |
| 5,0       | 275     | $2,03 \times 10^{-3}$                    | 699                       | 6,05   | 85                              |
|           | 680     | $3,75 \times 10^{-4}$                    | 129                       | 2,94   | 2                               |
|           | 1.000   | $1,89 \times 10^{-4}$                    | 65                        | 1,68   | 0                               |

Para os dados analisados, só não ocorre probabilidade de fatalidade nas velocidades de vento 3,0 e 5,0 m/s, para um raio de 1.000m.

### 6.3.2 Cenário 03 – EI-02

Os cenários com dispersão do tipo puff apresentaram concentrações muito superiores ao valor correspondente à dose fatal (1.000 ppm), já em poucos minutos. Logo a probabilidade de fatalidade nestes casos é de 100%.

### 6.3.3 Cenário 05 – EI-03

A Tabela 6.23 apresenta as probabilidades de fatalidade calculadas através da equação do Probit (eq. 6.16) para as condições apresentadas. O intervalo de tempo de vazamento de cloro adotado foi de 12 minutos.



Tabela 6.23 – Probabilidades de fatalidade

| $u$ (m/s) | $x$ (m) | $< C >$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $< C >$ (ppm)         | Probit | Probabilidade de Fatalidade (%) |
|-----------|---------|------------------------------|-----------------------|--------|---------------------------------|
| 1,0       | 275     | $3,35 \times 10^{-6}$        | 1,15                  | -5,75  | 0                               |
|           | 680     | $6,10 \times 10^{-7}$        | 0,21                  | -8,87  | 0                               |
|           | 1.000   | $3,05 \times 10^{-7}$        | $1,05 \times 10^{-1}$ | -10,15 | 0                               |
| 3,0       | 275     | $1,12 \times 10^{-6}$        | $3,86 \times 10^{-1}$ | -7,76  | 0                               |
|           | 680     | $2,03 \times 10^{-7}$        | $7,00 \times 10^{-2}$ | -10,90 | 0                               |
|           | 1.000   | $1,02 \times 10^{-7}$        | $3,50 \times 10^{-2}$ | -12,17 | 0                               |
| 5,0       | 275     | $6,71 \times 10^{-7}$        | $2,31 \times 10^{-1}$ | -8,70  | 0                               |
|           | 680     | $1,22 \times 10^{-7}$        | $4,20 \times 10^{-2}$ | -11,84 | 0                               |
|           | 1.000   | $6,12 \times 10^{-8}$        | $2,10 \times 10^{-2}$ | -13,11 | 0                               |

Todas as concentrações referentes aos pontos de interesse apresentaram valores de Probit negativos. Isto acarreta que não há probabilidade de fatalidade para o vazamento hipotético no trocador de calor M-603.

#### 6.3.4 Cenário 06 – EI-04

Os cenários com dispersão do tipo puff apresentaram concentrações muito superiores ao valor correspondente à dose fatal (1.000 ppm), já em poucos minutos. Logo a probabilidade de fatalidade nestes casos é de 100%.



## 7 AVALIAÇÃO DOS RISCOS

Os riscos provenientes de acidentes em uma instalação industrial são classificados em dois tipos: risco individual e risco social. O primeiro é a medida do risco para um indivíduo em particular, enquanto que o risco social é a medida do risco para a sociedade como um todo (GADD et al., 2003). O objetivo deste capítulo é definir mais detalhadamente, calcular e avaliar os riscos individual e social relacionados à operação da instalação analisada.

### 7.1 Risco Individual

Segundo a FEPAM, “risco individual é a frequência esperada anual de que um indivíduo situado em uma determinada posição nas proximidades de uma instalação industrial seja vítima fatal em decorrência de um acidente na referida instalação”.

Para SANTANA et al, o risco individual também está associado a um indivíduo que, situado nas imediações de uma instalação perigosa, venha a sofrer danos ao longo do ano, em decorrência de acidentes nos sistemas analisados. Os níveis de dano dependem das aplicações particulares, mas seguramente estão relacionados a perda de vida, ferimentos mais ou menos graves, perda econômica, incômodo, interrupção das atividades, etc.

Portanto, o risco individual indica o potencial de dano para cada pessoa da comunidade exposta, considerando a natureza do acidente que pode ocorrer e o período de tempo em que o dano pode acontecer, e seu valor varia em função da posição do indivíduo em relação às fontes de risco existentes. Considera-se a morte como o pior nível de danos, logo se pode dizer que o risco individual é a probabilidade que o indivíduo tem de perder a vida após um determinado acidente (FONTANIVE, 2005).

A representação matemática do risco individual é efetuada a partir do cálculo da contribuição de cada cenário acidental num determinado ponto no entorno da instalação. Para tal, o risco individual total em um ponto  $(x, y)$  é determinado a partir da seguinte equação:

$$RI_{x,y} = \sum_{i=1}^n RI_{x,y,i} = \sum_{i=1}^n (f_i \cdot p_{x,y,i}) \quad (7.1)$$

Onde:

$RI_{x,y}$  = risco individual total no ponto  $(x,y)$ ,  $[ano^{-1}]$ ;

$n$  = número total de cenários acidentais considerados na análise;

$RI_{x,y,i}$  = risco individual no ponto  $(x,y)$  associado ao cenário acidental  $i$ ,  $[ano^{-1}]$ ;

$f_i$  = frequência de ocorrência do cenário acidental  $i$ ,  $[ano^{-1}]$ ;

$p_{x,y,i}$  = probabilidade de que o cenário acidental  $i$  resulte em fatalidade no ponto  $(x,y)$ .

A decisão sobre a aceitabilidade ou não dos riscos existentes são baseados nos critérios de tolerabilidade representados por níveis ou em intervalos de valores estipulados pelas agências reguladoras e órgão ambiental.

Os critérios de tolerabilidade de riscos utilizados neste trabalho são os mesmos adotados pela FEPAM, e que vêm sendo empregados internacionalmente. Estes critérios foram estabelecidos com vistas à proteção dos indivíduos de comunidades situadas nas proximidades de instalações industriais e também à proteção de pontos sensíveis do meio ambiente externos ao empreendimento. Eles se baseiam no estabelecimento de dois níveis de risco:



- um nível alto, acima do qual os riscos são considerados “intoleráveis” (denominado limite de intolerabilidade), e

- um nível baixo, abaixo do qual os riscos são considerados “perfeitamente toleráveis” (denominado limite de tolerabilidade trivial).

Para os valores de risco compreendidos entre os dois limites indicados acima, os resultados são julgados considerando-se o enfoque ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*), que significa que, em princípio, os riscos devem ser reduzidos, mas as medidas de redução devem ser implementadas se os seus custos não forem excessivamente altos quando comparados aos benefícios resultantes das respectivas implementações.

Do ponto de vista prático, significa que os responsáveis pelo empreendimento devem, pelo menos, discutir a possibilidade de adotar medidas adicionais de redução de risco, como por exemplo, a introdução de modificações nas instalações e/ou operações. Caso estas medidas não sejam econômica e tecnicamente viáveis, e portanto não venham a ser adotadas, deve-se indicar as razões que as tornam impraticáveis ou ineficientes.

No Critério de Risco utilizado pela FEPAM, os valores de risco individual superiores a  $10^{-5}$ /ano são considerados intoleráveis e os valores abaixo de  $10^{-6}$ /ano são considerados toleráveis, conforme ilustrado na Figura 7.1.

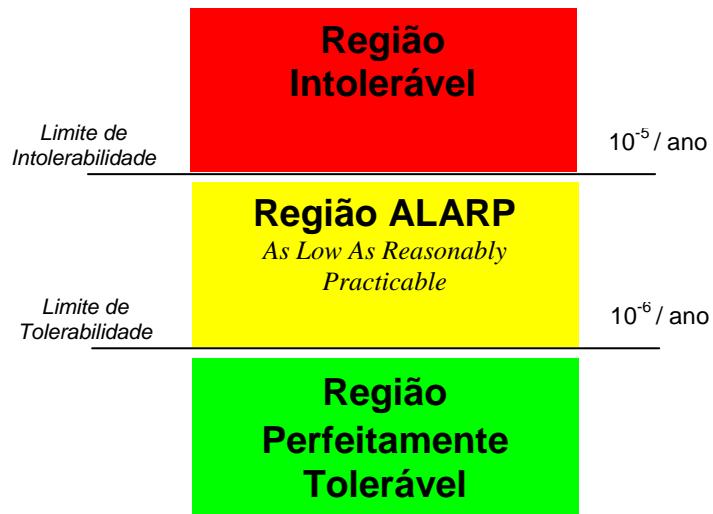


Figura 7.1 - Critérios de tolerabilidade de riscos individuais adotados pela FEPAM  
Fonte: Manual de Análise de Riscos Industriais – FEPAM, 2001

Os riscos individuais de uma instalação são, em geral, expressos através dos chamados “contornos de risco individual” ou “contornos de iso-risco”. Essas curvas ligam os pontos de mesmo nível de risco individual, fornecendo uma indicação gráfica destes níveis nas proximidades de uma dada instalação. O contorno de determinado nível apresenta a frequência esperada de um evento capaz de causar dano num local específico. Conhecendo-se a distribuição populacional na região, pode-se, então, determinar se algum grupo em particular está submetido a níveis inaceitáveis de risco individual.

A Figura 7.2 apresenta um exemplo de curva de iso-risco para uma região hipotética, onde o risco individual é apresentado por meio de diversos contornos de risco plotados na zona de efeito de um acidente.



Figura 7.2 – Curva de Iso-Risco

Fonte: CETESB

### 7.1.1 Cálculo do Risco Individual

No capítulo 4, através da Análise Preliminar de Perigo, os cenários de categoria de risco moderado foram selecionados e então relacionados a um evento iniciador correspondente. Estes eventos iniciadores, mediante aplicação da técnica de Árvore de Eventos (Cap.5), deram origem a 24 cenários accidentais (efeitos), cada qual com sua frequência de ocorrência anual. Estas frequências, juntamente com as probabilidades de morte calculadas através da equação do Probit (Cap.6), são utilizadas para o cálculo do risco individual. Para tal, aplica-se a equação 7.1.

Os resultados do risco individual para cada evento iniciador em relação a uma determinada distância são apresentados nas tabelas 7.1 a 7.3.

#### Evento iniciador 01 (EI-01)

Os riscos individuais associados ao evento estudado são representados na Tabela 7.1.



Tabela 7.1 – Riscos individuais para EI-01

| <b>x (m)</b> | <b>Probabilidade de Fatalidade</b> | <b>Risco Individual (ano<sup>-1</sup>)</b> |
|--------------|------------------------------------|--|
| 275          | 1,00                               | $6,94 \times 10^{-7}$                      |
| 680          | 0,81                               | $2,97 \times 10^{-7}$                      |
| 1.000        | 0,36                               | $1,10 \times 10^{-7}$                      |

A partir da Tabela 7.1 pode-se verificar que os valores de risco individual estão em torno de  $10^{-7}$ /ano, tanto dentro dos limites da fábrica quanto para a ocupação sensível próxima a unidade. Logo o risco individual é considerado tolerável segundo os critérios adotados pela FEPAM para a população envolta da unidade.

### Evento iniciador 02 (EI-02)

Os riscos individuais associados a este evento foram calculados para os valores de x correspondentes à localização da nuvem nos intervalos de tempo considerados. Os valores dos riscos individuais para cada x variam com o tempo. A Tabela 7.2 apresenta os riscos individuais calculados.

Tabela 7.2 – Riscos individuais para EI-02

| <b>x (m)</b> | <b>t (min)</b> | <b>Probabilidade de Fatalidade</b> | <b>Risco Individual (ano<sup>-1</sup>)</b> |
|--------------|----------------|------------------------------------|--|
| 60           | 1,00           | 1,00                               | $4,80 \times 10^{-8}$                      |
|              | 5,00           | 0,00                               | 0,00                                       |
| 180          | 1,00           | 1,00                               | $4,02 \times 10^{-8}$                      |
|              | 5,00           | 0,00                               | 0,00                                       |
| 300          | 1,00           | 1,00                               | $2,53 \times 10^{-8}$                      |
|              | 5,00           | 1,00                               | $4,80 \times 10^{-8}$                      |
| 900          | 1,00           | 0,00                               | 0,00                                       |
|              | 5,00           | 1,00                               | $4,02 \times 10^{-8}$                      |
| 1.500        | 1,00           | 0,00                               | 0,00                                       |
|              | 5,00           | 1,00                               | $2,53 \times 10^{-8}$                      |

A partir da Tabela 7.2 pode-se verificar que os valores de risco individual estão em torno de  $10^{-8}$ /ano, tanto dentro dos limites da fábrica quanto para a ocupação sensível próxima a unidade. Logo o risco individual é considerado tolerável segundo os critérios adotados pela FEPAM para a população envolta da unidade.



### Evento iniciador 03 (EI-03)

Os valores dos riscos individuais associados a este evento são todos iguais a zero, uma vez que não há probabilidade de fatalidade neste caso.

### Evento iniciador 04 (EI-04)

Os riscos individuais associados a este evento foram calculados para os valores de  $x$  correspondentes à localização da nuvem nos intervalos de tempo considerados. Os valores dos riscos individuais para cada  $x$  variam com o tempo. A Tabela 7.3 apresenta os riscos individuais calculados.

Tabela 7.3 – Riscos individuais para EI-04

| $x$ (m) | t (min) | Probabilidade de Fatalidade | Risco Individual (ano <sup>-1</sup> ) |
|---------|---------|-----------------------------|---------------------------------------|
| 60      | 1,00    | 1,00                        | $2,97 \times 10^{-6}$                 |
|         | 5,00    | 0,00                        | 0,00                                  |
| 180     | 1,00    | 1,00                        | $2,47 \times 10^{-6}$                 |
|         | 5,00    | 0,00                        | 0,00                                  |
| 300     | 1,00    | 1,00                        | $1,55 \times 10^{-6}$                 |
|         | 5,00    | 1,00                        | $2,97 \times 10^{-6}$                 |
| 900     | 1,00    | 0,00                        | 0,00                                  |
|         | 5,00    | 1,00                        | $2,47 \times 10^{-6}$                 |
| 1.500   | 1,00    | 0,00                        | 0,00                                  |
|         | 5,00    | 1,00                        | $1,55 \times 10^{-6}$                 |

A partir da Tabela 7.3 pode-se verificar que os valores de risco individual estão em torno de  $10^{-6}$ /ano, tanto dentro dos limites da fábrica quanto para a ocupação sensível próxima a unidade. Logo o risco individual encontra-se dentro da região ALARP segundo os critérios adotados pela FEPAM.

## 7.2 Risco Social

O risco social associado a uma instalação ou atividade é o número de mortes esperadas por ano em decorrência de acidentes com origem na instalação/atividade, usualmente expresso em mortes/ano (FEPAM).

O risco social indica a probabilidade de fatalidade de um determinado grupo de indivíduos em face da ocorrência de um acidente considerando a área circunvizinha à instalação. Em outras palavras, o risco social representa o risco para uma comunidade presente na zona de influência de um acidente. O risco associado a um evento perigoso resulta em dois fatores: frequência de ocorrência de acidentes e suas consequências (FONTANIVE, 2005; SANTANA et al., 2009).



Para se estimar o risco social num estudo de análise de risco é preciso obter algumas informações sobre a área em estudo, pois só assim é possível calcular o número de fatalidades e a frequência com que esta comunidade está exposta a um ou mais acidentes. Os levantamentos de informações sobre a área em estudo são:

- Tipo de população (área urbana ou rural, presença de hospitais ou escolas na vizinhança, indústrias, estabelecimento comercial, etc.);
- Distribuição populacional.

O cálculo do risco social é representado por uma função matemática que relaciona a frequência de ocorrência dos eventos às suas consequências, resultado expresso em número de mortes por ano (LEAL e FACCHIN, 2003).

A expressão matemática apresentada abaixo serve para representar o risco (DUARTE, 2002).

$$r = \sum_{i=1}^{i=n} f_i * x_i$$

Onde:

$r$  = risco;

$x_i$  = número de vítimas esperadas, num acidente específico;

$f_i$  = frequência esperada para esse acidente e;

$n$  = número de acidentes potenciais da planta.

O risco social é normalmente representado através de Curvas F-N, onde F é a frequência acumulada ou ocorrências acidentais e N, o número de fatalidades. As curvas F-N, também chamadas de Curvas de Distribuição Acumulada Complementar, representam a frequência esperada de acidentes na instalação com N ou mais vítimas fatais. A curva é construída por um determinado número de mortes e somada a frequência de todos os cenários que causaram N ou mais mortes. A grande vantagem dessas curvas é que elas mostram graficamente todo o espectro de risco da instalação, indicando explicitamente o potencial de acidentes de grande magnitude da instalação analisada (FEPAM; FONTANIVE).

Os critérios de aceitabilidade de riscos sociais adotados pela FEPAM, sob a forma tradicional de gráficos F-N estão indicados na Figura 7.3.

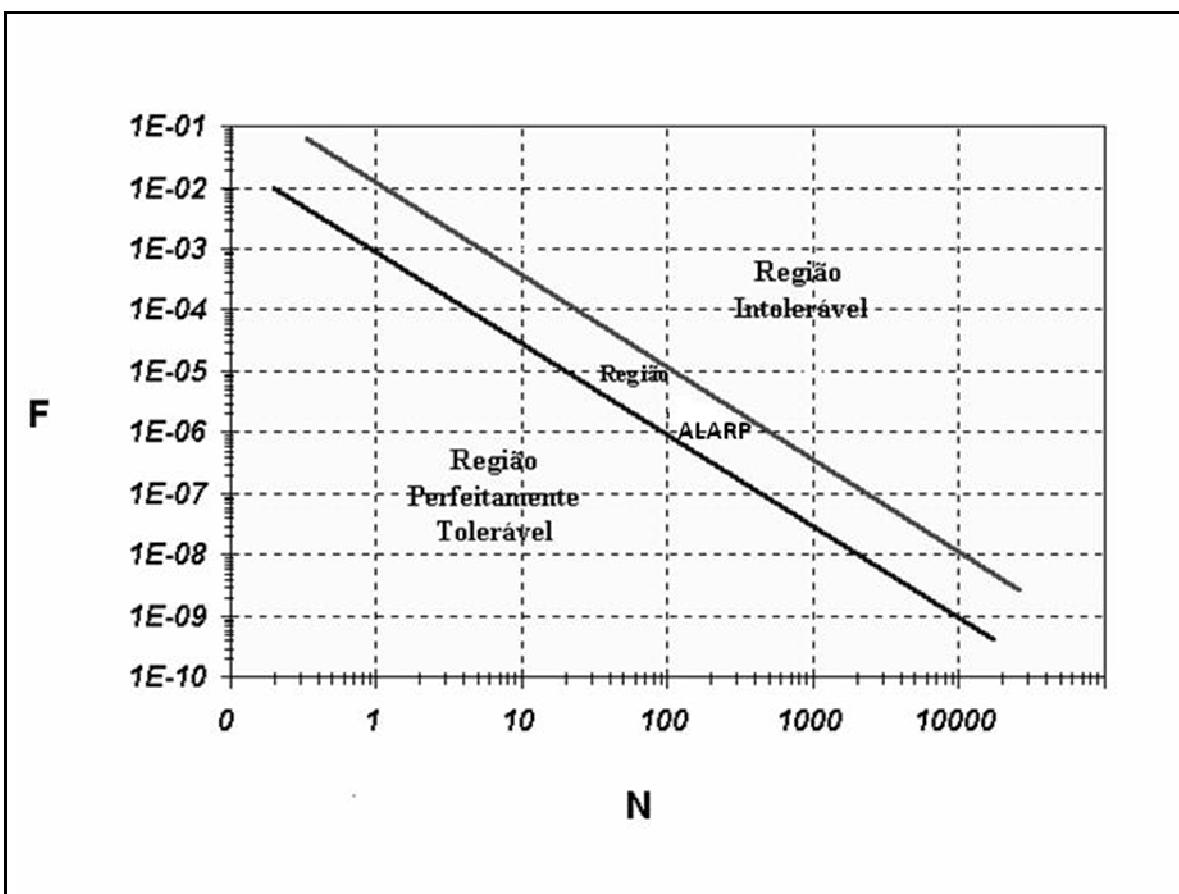


Figura 7.3 – Curva F-N de tolerabilidade do risco

Fonte: Manual de Análise de Riscos Industriais da FEPAM, 2001

Estes critérios, assim como para o risco individual, também se baseiam no estabelecimento de dois níveis de risco:

- Um nível superior, acima do qual os riscos são considerados Intoleráveis – reta com coeficiente angular igual a menos 1, que passa pelos pontos  $N = 1$  fatalidade e,  $F = 10^{-2}$  ano $^{-1}$  e  $N = 10.000$  fatalidades e  $F = 10^{-8}$  ano $^{-1}$ ;
- Um nível inferior, abaixo do qual os riscos são considerados Toleráveis – reta com coeficiente angular igual a menos 1, que passa pelos pontos  $N = 1$  fatalidade e,  $F = 10^{-3}$  ano $^{-1}$  e  $N = 10.000$  fatalidades e  $F = 10^{-9}$  ano $^{-1}$ .

Os valores de risco situados na faixa intermediária também são denominados Região ALARP (As Low As Reasonably Practicable).

### 7.2.1 Cálculo do Risco Social

O cálculo do risco social é associado à frequência de ocorrência anual e à severidade do acidente expresso pelo número de fatalidades. O número de fatalidades foi obtido multiplicando-se os valores de probabilidade de fatalidade encontrados na Seção 6.3 pelo número de pessoas expostas em cada área analisada. Os resultados são apresentados nas tabelas 7.4 a 7.6.



### Evento iniciador 01 (EI-01)

$u = 1,0 \text{ m/s}$

Tabela 7.4 – Cálculo do número de fatalidades para EI-01 e  $u = 1,0 \text{ m/s}$

| Direção  | Distância (m) | População | Probabilidade de Fatalidade | Fatalidades (ano <sup>-1</sup> ) |
|----------|---------------|-----------|-----------------------------|----------------------------------|
| Nordeste | 680           | 1.034     | 0,81                        | 838                              |
|          | 1.000         | 1.736     | 0,36                        | 625                              |
| Leste    | 680           | 777       | 0,81                        | 630                              |
|          | 1.000         | 305       | 0,36                        | 110                              |
| Sudeste  | 680           | 2.094     | 0,81                        | 1.696                            |
|          | 1.000         | 2.278     | 0,36                        | 820                              |
| Sul      | 680           | 964       | 0,81                        | 781                              |
|          | 1.000         | 1.431     | 0,36                        | 515                              |
| Sudoeste | 680           | 673       | 0,81                        | 545                              |
|          | 1.000         | -         | 0,36                        | 0                                |
| Oeste    | -             | -         | -                           | -                                |
| Noroeste | -             | -         | -                           | -                                |
| Norte    | -             | -         | -                           | -                                |

O número total de fatalidades neste caso é 6.650.



**u = 3,0 m/s**

Tabela 7.5 - Cálculo do número de fatalidades para EI-01 e u = 3,0 m/s

| <b>Direção</b> | <b>Distância (m)</b> | <b>População</b> | <b>Probabilidade de Fatalidade</b> | <b>Fatalidades (ano<sup>-1</sup>)</b> |
|----------------|----------------------|------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Nordeste       | 680                  | 1.034            | 0,13                               | 135                                   |
|                | 1.000                | 1.736            | 0,00                               | 0                                     |
| Leste          | 680                  | 777              | 0,13                               | 101                                   |
|                | 1.000                | 305              | 0,00                               | 0                                     |
| Sudeste        | 680                  | 2.094            | 0,13                               | 273                                   |
|                | 1.000                | 2.278            | 0,00                               | 0                                     |
| Sul            | 680                  | 964              | 0,13                               | 126                                   |
|                | 1.000                | 1.431            | 0,00                               | 0                                     |
| Sudoeste       | 680                  | 673              | 0,13                               | 88                                    |
|                | 1.000                | -                | 0,00                               | 0                                     |
| Oeste          | -                    | -                | -                                  | -                                     |
| Noroeste       | -                    | -                | -                                  | -                                     |
| Norte          | -                    | -                | -                                  | -                                     |

O número total de fatalidades neste caso é 723.



$$u = 5,0 \text{ m/s}$$

Tabela 7.6 - Cálculo do número de fatalidades para EI-01 e  $u = 5,0 \text{ m/s}$ 

| Direção  | Distância (m) | População | Probabilidade de Fatalidade | Fatalidades (ano <sup>-1</sup> ) |
|----------|---------------|-----------|-----------------------------|----------------------------------|
| Nordeste | 680           | 1.034     | 0,02                        | 21                               |
|          | 1.000         | 1.736     | 0,00                        | 0                                |
| Leste    | 680           | 777       | 0,02                        | 16                               |
|          | 1.000         | 305       | 0,00                        | 0                                |
| Sudeste  | 680           | 2.094     | 0,02                        | 42                               |
|          | 1.000         | 2.278     | 0,00                        | 0                                |
| Sul      | 680           | 964       | 0,02                        | 20                               |
|          | 1.000         | 1.431     | 0,00                        | 0                                |
| Sudoeste | 680           | 673       | 0,02                        | 14                               |
|          | 1.000         | -         | -                           | -                                |
| Oeste    | -             | -         | -                           | -                                |
| Noroeste | -             | -         | -                           | -                                |
| Norte    | -             | -         | -                           | -                                |

O número total de fatalidades neste caso é 113.

#### Evento iniciador 02 (EI-02)

Considerando que no caso do puff, em apenas cinco minutos de sua ocorrência, seu alcance já atinge toda a população circunvizinha a doses de cloro muito acima da fatal (1.000 ppm), pode-se considerar que o número de fatalidades é a quantidade total da população em dado ponto. Como os dados populacionais disponíveis são de um raio de até 1 km de distância da instalação em estudo, considera-se a população existente neste raio. Logo, o número de fatalidades neste caso é de 11.292 (número correspondente ao somatório, em todas as direções, da densidade populacional num raio de 1 km da fábrica).

#### Evento iniciador 03 (EI-03)

Como as probabilidades de fatalidade encontradas para este evento iniciador foram todas iguais a zero, tem-se que não há fatalidades neste caso.

#### Evento iniciador 04 (EI-04)

Assim como no evento iniciador 02, o número de fatalidades é de 11.292 (número correspondente ao somatório, em todas as direções, da densidade populacional num raio de 1 km da fábrica).



A Tabela 7.7 relaciona os números de fatalidades calculados com as frequências de ocorrência para cada evento acidental estudado, obtidas no Capítulo 5 através de Árvores de Eventos.

Tabela 7.7 – Número de fatalidades X frequência de ocorrência

| Evento | Velocidade do Vento | Direção do Vento | Número de Fatalidades | Frequência (ocorr./ano) |
|--------|---------------------|------------------|-----------------------|-------------------------|
| EI-01  | u = 1,0 m/s         | Norte            | 0                     | 5,65*10 <sup>-8</sup>   |
|        |                     | Nordeste         | 1.463                 | 6,30*10 <sup>-8</sup>   |
|        |                     | Leste            | 740                   | 5,31*10 <sup>-8</sup>   |
|        |                     | Sudeste          | 2.516                 | 3,51*10 <sup>-8</sup>   |
|        |                     | Sul              | 1.296                 | 2,65*10 <sup>-8</sup>   |
|        |                     | Sudoeste         | 545                   | 1,67*10 <sup>-8</sup>   |
|        |                     | Oeste            | 0                     | 2,36*10 <sup>-8</sup>   |
|        |                     | Noroeste         | 0                     | 3,24*10 <sup>-8</sup>   |
|        | u = 3,0 m/s         | Norte            | 0                     | 2,68*10 <sup>-8</sup>   |
|        |                     | Nordeste         | 135                   | 4,69*10 <sup>-8</sup>   |
|        |                     | Leste            | 101                   | 5,35*10 <sup>-8</sup>   |
|        |                     | Sudeste          | 273                   | 3,83*10 <sup>-8</sup>   |
|        |                     | Sul              | 126                   | 3,40*10 <sup>-8</sup>   |
|        |                     | Sudoeste         | 88                    | 7,02*10 <sup>-9</sup>   |
|        |                     | Oeste            | 0                     | 2,43*10 <sup>-8</sup>   |
|        |                     | Noroeste         | 0                     | 2,46*10 <sup>-8</sup>   |
|        | u = 5,0 m/s         | Norte            | 0                     | 3,98*10 <sup>-9</sup>   |
|        |                     | Nordeste         | 21                    | 3,62*10 <sup>-9</sup>   |
|        |                     | Leste            | 16                    | 7,31*10 <sup>-9</sup>   |
|        |                     | Sudeste          | 42                    | 5,49*10 <sup>-8</sup>   |
|        |                     | Sul              | 20                    | 4,84*10 <sup>-8</sup>   |
|        |                     | Sudoeste         | 14                    | 1,50*10 <sup>-8</sup>   |
|        |                     | Oeste            | 0                     | 1,95*10 <sup>-8</sup>   |
|        |                     | Noroeste         | 0                     | 7,96*10 <sup>-9</sup>   |
| EI-02  | -                   | -                | 11.292                | 1,14*10 <sup>-7</sup>   |
| EI-03  | -                   | -                | 0                     | 2,59*10 <sup>-5</sup>   |
| EI-04  | -                   | -                | 11.292                | 7,00*10 <sup>-6</sup>   |



A Tabela 7.8 mostra a somatória da frequência (ocorrência/ano) para determinadas faixas de número de fatalidades. Através desses dados foram calculadas as frequências acumuladas em função do número de fatalidades. Com os resultados obtidos pode-se analisar o comportamento do risco social através da curva F-N, apresentada na Figura 7.4.

Tabela 7.8 – Frequência acumulada para os acidentes relacionados com vazamento de cloro

| <b>Número estimado de fatalidades (N)</b> | <b>Frequência F (ano<sup>-1</sup>)</b> | <b>Frequência acumulada (ano<sup>-1</sup>)</b> |
|---|--|--|
| 11.000-13.000                             | $7,11 \times 10^{-6}$                  | $7,11 \times 10^{-6}$                          |
| 10.000-11.000                             | 0                                      | $7,11 \times 10^{-6}$                          |
| 5.000-10.000                              | 0                                      | $7,11 \times 10^{-6}$                          |
| 2.500-3.000                               | $3,51 \times 10^{-8}$                  | $7,14 \times 10^{-6}$                          |
| 2.000-2.500                               | 0                                      | $7,14 \times 10^{-6}$                          |
| 1.800-2.000                               | 0                                      | $7,14 \times 10^{-6}$                          |
| 1.600-1.800                               | 0                                      | $7,14 \times 10^{-6}$                          |
| 1.400-1.600                               | $6,30 \times 10^{-8}$                  | $7,21 \times 10^{-6}$                          |
| 1.200-1.400                               | $2,65 \times 10^{-8}$                  | $7,23 \times 10^{-6}$                          |
| 1.000-1.200                               | 0                                      | $7,23 \times 10^{-6}$                          |
| 800-1.000                                 | 0                                      | $7,23 \times 10^{-6}$                          |
| 600-800                                   | $5,31 \times 10^{-8}$                  | $7,28 \times 10^{-6}$                          |
| 400-600                                   | $1,67 \times 10^{-8}$                  | $7,30 \times 10^{-6}$                          |
| 300-400                                   | 0                                      | $7,30 \times 10^{-6}$                          |
| 200-300                                   | $3,83 \times 10^{-8}$                  | $7,34 \times 10^{-6}$                          |
| 100-200                                   | $1,34 \times 10^{-7}$                  | $7,47 \times 10^{-6}$                          |
| 50-100                                    | $7,02 \times 10^{-9}$                  | $7,48 \times 10^{-6}$                          |
| 30-50                                     | $5,49 \times 10^{-8}$                  | $7,53 \times 10^{-6}$                          |
| 20-30                                     | $3,62 \times 10^{-9}$                  | $7,54 \times 10^{-6}$                          |
| 10-20                                     | $7,07 \times 10^{-9}$                  | $7,61 \times 10^{-6}$                          |
| N≤10                                      | 0                                      | $3,37 \times 10^{-5}$                          |

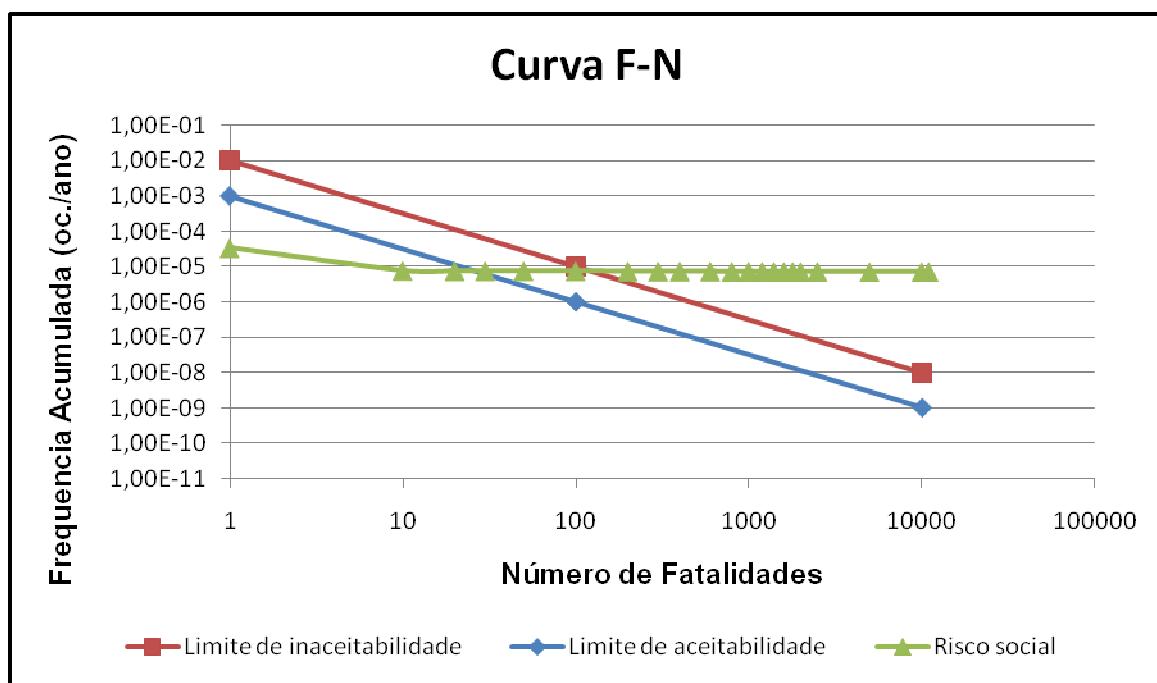


Figura 7.4 - Gráfico F-N da instalação em comparação com o critério de aceitabilidade de risco social adotado pela FEPAM

O comportamento da curva F-N, demonstrada pela Figura 7.4, mostra que os valores obtidos para o risco social relacionado aos acidentes com vazamento do gás cloro é alto, pois uma parte da curva se encontra dentro da região inaceitável. Os riscos para esta instalação devem ser reduzidos e somente toleráveis nas condições que este empreendimento tenha um plano de ação emergencial e um grupo de pessoas que avalie e gerencie os riscos existentes na instalação.



## 8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 8.1 Conclusões

A partir da simulação de cenários hipotéticos de vazamentos acidentais de cloro na unidade analisada, pode-se calcular, através de modelos teóricos, a concentração da substância cloro dentro e fora dos limites das instalações. Os valores encontrados para os cenários caracterizados por dispersões do tipo puff apresentaram números elevadíssimos, com concentrações extremamente superiores ao valor do IDLH para o cloro. Pode-se verificar também que, para um intervalo de tempo bastante curto, como o de cinco minutos, por exemplo, o puff já alcança não apenas os trabalhadores da fábrica como também a população circunvizinha. Já, para os cenários do tipo nuvem, os resultados diferiram em cada caso; mostrando que no vazamento de líquido devido ao rompimento de uma tubulação, as concentrações de cloro determinadas, apresentaram-se acima do IDLH, e para o vazamento através de um orifício no vaporizador, as concentrações de cloro foram tão baixas que não chegaram a atingir sequer o limite de percepção olfatória (menor que 3 ppm).

Analizando-se os resultados dos cenários estudados pode-se concluir que dentro e fora dos limites das instalações, a concentração do cloro poderá ser maior que o valor do IDLH. A partir dessa constatação é recomendado alertar a vizinhança e desenvolver planos específicos para evacuação da população e controle do tráfego na região.

As diferenças nas concentrações encontradas em cada cenário estudado relacionam-se a uma série de fatores, que devem ser analisados caso a caso. Na dispersão tipo puff, as concentrações tão elevadas devem-se ao fato de que ocorre a liberação instantânea de todo o material que se encontrava dentro do recipiente, ou seja, trata-se do vazamento de quantidades bastante significativas de cloro, da ordem de milhares de toneladas liberadas de uma só vez na atmosfera.

No caso da nuvem, as diferenças de concentrações se devem pelas diferentes taxas de liberação de material. No cenário de vazamento pela ruptura de tubulação, o diâmetro do orifício passa a ser o próprio diâmetro da tubulação, e a pressão interna é quase sete vezes maior do que a externa, resultando numa liberação de cerca de 50 quilogramas de cloro por segundo na atmosfera. Para o período de tempo de vazamento considerado neste caso, os resultados da simulação indicam que serão lançados, aproximadamente, 36.000 quilogramas de cloro no meio ambiente.

Já no caso do orifício no vaporizador M-603, tem-se que as pressões, interna e externa, são bastante próximas, e o furo é de apenas  $\frac{1}{4}$  de polegada. Isso acarreta num vazamento de apenas  $1,528 \times 10^{-2}$  quilogramas de cloro por segundo, não causando, portanto danos à população exposta.

Em todos os casos analisados, no entanto, pode-se verificar a influência da velocidade do vento na dispersão do poluente, uma vez que as concentrações diminuem com o aumento da velocidade do vento e com a distância à fonte do vazamento.

Com relação à ocorrência de fatalidade decorrente do vazamento de cloro nas instalações investigadas, pode-se concluir que, para os casos de puff, a probabilidade de fatalidade nas regiões por ele alcançadas é de 100%, uma vez que as concentrações calculadas são até 23.000 vezes superiores à concentração considerada fatal (1.000 ppm). Já para os casos de dispersão do tipo nuvem, levando-se em conta as três direções do vento características da região, verificou-se que a probabilidade de fatalidade é maior nas regiões mais próximas das



instalações e diminui significativamente ao longo da distância. No primeiro caso (cenário 02), a 275 metros do ponto de vazamento, a probabilidade de morte varia na faixa de 100% a 85%, a 680 metros de 81% a 2% e a 1.000 metros é praticamente nula. Portanto, para esse caso pode-se concluir que os pontos específicos analisados, como escolas e áreas residenciais, são vulneráveis, uma vez que o nível de exposição dos indivíduos ao gás cloro será significativo e existe a probabilidade de fatalidade. Para o cenário 05, como as concentrações não atingiram valores que causassem danos à população, não há probabilidade de fatalidade.

O cálculo do risco individual das instalações de cloro permitiu concluir que existe risco à população e ao meio ambiente, principalmente, na região próxima das instalações de cloro. Segundo o padrão da FEPAM, os riscos variam da faixa aceitável até a faixa conhecida como ALARP, onde a adoção de medidas adicionais de redução de risco deve ser efetuada, desde que sejam economicamente viáveis.

Considerando as condições meteorológicas para a dispersão do gás cloro e a densidade populacional da vizinhança, pode-se realizar o cálculo do risco social para o empreendimento, através da construção da curva F-N. Segundo o padrão da FEPAM, os valores obtidos para o risco social relacionado aos acidentes com vazamento do gás cloro é alto, pois uma parte da curva obtida se encontra dentro da região de risco inaceitável.

Neste sentido, pode-se concluir que é necessário realizar um estudo mais detalhado, para estimar de forma realista as probabilidades de falha dos equipamentos de segurança das instalações de cloro, uma vez que existem riscos significativos associados às instalações do produto, que devem ser gerenciados de forma adequada para reduzir as consequências dos possíveis acidentes que venham a ocorrer.

Finalmente, pode-se concluir que os resultados obtidos nesse trabalho são satisfatórios e úteis, principalmente para a unidade analisada, uma vez que permitiram identificar os riscos e estimar as consequências de possíveis cenários acidentais que podem ocorrer em suas instalações.

## **8.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Considerando o desenvolvimento e resultados desse trabalho seguem algumas recomendações para futuros trabalhos nessa área do conhecimento.

Inicialmente, recomenda-se ampliar o conjunto de cenários estudados através da investigação de diferentes situações de vazamento do produto, como por exemplo, válvulas, flanges, válvulas de alívio, entre outros. Situações de estabilidade atmosférica extremas, como inversão térmica, também devem ser investigadas.

Para reduzir a incerteza do cálculo do risco individual e social realizado nesse trabalho, recomenda-se desenvolver um estudo mais detalhado, como por exemplo, análise de falhas dos equipamentos de proteção e segurança das instalações de cloro da companhia.

Para o desenvolvimento e aplicação destas medidas, torna-se importante a utilização de softwares que sirvam como ferramentas no desenvolvimento dos cálculos necessários na simulação de cada cenário.

Considerando-se os resultados obtidos nesse trabalho, recomenda-se a implantação de um programa de gerenciamento de riscos eficiente que inclua planos de contingência, treinamento de funcionários para abandono de área, simulados para evacuação da população do entorno, entre outros. Os riscos de acidentes com consequências indesejáveis e as recomendações



identificadas na Análise Preliminar de Perigos devem ser incorporadas ao programa de gerenciamento de riscos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABICLOR. Disponível em: <<http://www.abiclor.com.br>>. Acessado em fevereiro 2009.

AGUIAR, L. A. *Metodologias de análise de riscos APP & HAZOP*. Disponível em: <[www.saneamento.poli.ufrj.br/documentos/Josimar/APP\\_e\\_HAZOP.pdf](http://www.saneamento.poli.ufrj.br/documentos/Josimar/APP_e_HAZOP.pdf)>. Acessado em março 2009.

AGUIAR, L. A. A. et al. *A Termelétrica de Santa Cruz: Laboratório Químico e Operações com Produtos Químicos na Área Industrial*. Monografia do curso de Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2001.

ALMEIDA, I. M. *Construindo a culpa e evitando a prevenção: caminhos da investigação de acidentes do trabalho em empresas de município de porte médio*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

BRASKEM, Ficha de Segurança de Produtos Químicos. Disponível em: <[http://www2.braskem.com.br/ori-tec/fispq/pdf/FISPQ\\_Cloro.pdf](http://www2.braskem.com.br/ori-tec/fispq/pdf/FISPQ_Cloro.pdf)>. Acessado em fevereiro 2009.

CCPS (Center for Chemical Process Safety). Disponível em: <<http://www.aiche.org/ccps/>>. Acessado em março 2009.

CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, São Paulo). Análise de Risco. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/emergencia/riscos/apresentacao/introducao.asp>>. Acessado em janeiro 2009.

CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, São Paulo). Emergências Químicas. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/emergencia/emergencia.asp>>. Acessado em janeiro 2009.

CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, São Paulo). Gerenciamento de riscos. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/Emergencia/gerenciamento.asp>>. Acessado em janeiro 2009.

COCO, J.C., Editor, *Large Property Damage Losses in the Hydrocarbon-Chemical Industries- A Thirty-Year Review*, 20th ed., New York: Marsh and McLennan Protection, 2003.

CROWL & LOUVAR. *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications*. 2.ed. Prentice Hall, 2002.

CARVALHO, F.C.V.S.P.M. *Estudo comparativo entre diferentes métodos de Avaliação de Risco, em situação real de trabalho*. Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2007.

Fator Ambiental. Gerenciamento de Riscos. Disponível em: <[http://www.fatorambiental.com.br/atuacao/gerenciamento\\_riscos.php](http://www.fatorambiental.com.br/atuacao/gerenciamento_riscos.php)>. Acessado em março 2009.

FEPAM (Fundação Estadual de Proteção Ambiental, Rio Grande do Sul). Manual de Análise de Riscos Industriais da FEPAM. Disponível em: <[http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/manual\\_analise\\_risco.asp](http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/manual_analise_risco.asp)>. Acessado em fevereiro 2009.

FONTANIVE, S. *Estudo de Análise de Risco do Cloro em Estações de Tratamento de Água*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Campinas, 2005.



GADD, S., Deborah, K., & Balmforth, H. *Good practice and pitfalls in risk assessment*. Sheffield, UK: Health & Safety Executive, 2003.

KIRCHHOFF, D. *Avaliação de risco ambiental e o processo de licenciamento: o caso do gasoduto de distribuição gás brasiliano trecho São Carlos – Porto Ferreira*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

LEAL, C. A.; FACCHINI, S. *Quantitative risk analysis of an agrochemical processing plant*. COBEM, São Paulo, 2003.

LEOCADIO, J.C. *Estimativa do Risco de Exposição Potencial em Instalações Industriais*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <http://www.con.ufrj.br/DScTeses/Joao%20Leocadio/Tese%20de%20Doutorado%20Versao%20Final%20Corrigida.pdf>. Acessado em março 2009.

Manual do Cloro. Disponível em: <[http://www.clorosur.org/?a=subcanal&id=62&can\\_id=37](http://www.clorosur.org/?a=subcanal&id=62&can_id=37)>. Acessado em fevereiro 2009.

MELO, P.F.F.F. *Análise de Riscos em Instalações Industriais*. Curso de Mestrado em Engenharia Nuclear. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ, 2003.

Ministério do Trabalho e Emprego, Normas Regulamentadoras. Disponível em: <[http://www.mte.gov.br/legislacao/normas\\_regulamentadoras/default.asp](http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/default.asp)>. Acessado em março 2009.

MITKIEWICZ, G.F.M.; MELO, G.C.B. *Dispersão Atmosférica de Poluentes em um Complexo Industrial Siderúrgico*. In: XXVIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Cancun, outubro/2002.

MONTES, A. L.; BARBARÍN, C. R.; CATILLO, J.M.B.; GRANADOS, O. H. *Análisis de riesgo ambiental y su aplicación al almacenamiento y manejo de cloro industrial*. Ciência UANL, vol. nº 2, 2002.

MOREIRA, D. M.; TIRABASSI, T.; MORAES, M. R. *Meteorologia e poluição atmosférica Ambiente & Sociedade*, v.XI, n.1, p.1-13. Campinas, 2008.

NIOSH – Instituto Nacional da Saúde e Segurança Ocupacional. Disponível em: <[www.cdc.gov/niosh/ipcsneng/neng0123.html](http://www.cdc.gov/niosh/ipcsneng/neng0123.html)>. Acesso em fevereiro 2009.

Notas de aula da Disciplina Segurança de Processos e Prevenção de Perdas, 2007. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química. Professores Caetano Moraes e Márcio Nele de Souza.

NUNES, M.P. *Análise de Risco no Processo de Avaliação de Impactos Ambientais*. Disponível em: <[www.dse.ufpb.br/Tarcisio/Artigos/MétodoAnáliseRisco.doc](http://www.dse.ufpb.br/Tarcisio/Artigos/MétodoAnáliseRisco.doc)>. Acessado em março 2009.

PASSOS, J. C. *Fundamentos da Prevenção e do Controle de Perdas e as Metodologias para Identificação de Riscos: uma breve revisão da literatura*. CEPPG, ano V, nº 9, 2003.

PEREIRA, N. *Aprimoramento de Análise de Risco: Árvore de Eventos – Ambiental* In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Santa Catarina, setembro/2003.



PINTO, G.M.; ROBERTO, R.S. *Análise de Riscos da Unidade de Craqueamento Catalítico da REDUC*. Projeto Final de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

PONTES, H.; XAVIER, A.A.P.; KOVALESKI, J.L. *Redução dos riscos ambientais como responsabilidade da gestão industrial – um enfoque ergonômico*. In: XI SIMPEP. Bauru, São Paulo, novembro/2004.

SANTANA, T.A.S.M. et al. *Análise Quantitativa de Riscos de uma Unidade Típica de Processamento de Gás Natural e seu Condensado*. Projeto Final de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

SOUZA, E.A. *O Treinamento Industrial e a Gerência de Riscos - Uma Proposta de Instrução Programada*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1995.

The Chlorine Institute. Disponível em : < [www.chlorineinstitute.org](http://www.chlorineinstitute.org) >. Acessado em fevereiro 2009.

TOXNET – Toxicological Data Network. Disponível em: <[www.toxnet.nlm.nih.gov](http://www.toxnet.nlm.nih.gov)>. Acessado em janeiro 2009.

VAZ, J.L.L. *Estudo da dispersão de particulado na atmosfera considerando-se meio florestal e sua topografia*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008.

VEIGA, P. M. S., VELHO, H.F.C., FREITAS, S.R. *Dispersão de poluentes no Vale do Rio Paraíba*. Disponível em <[http://www.sbmac.org.br/eventos/cnmac/xxx1\\_cnmac/PDF/193.pdf](http://www.sbmac.org.br/eventos/cnmac/xxx1_cnmac/PDF/193.pdf)>. Acessado em março 2009.



## Anexo A1 - Glossário

Para um entendimento mais completo do estudo da Segurança de Processos, é fundamental que determinadas definições estejam disponíveis. Neste anexo são apresentadas algumas delas. Também são apresentadas definições úteis para o presente trabalho.

**Aceitabilidade de riscos:** Um risco associado a alguma atividade é normalmente considerado aceitável, quando é inteiramente compensado pelos resultados dessa atividade. Porém, como diferentes pessoas e organizações têm visões diferentes dos riscos e benefícios, as visões de aceitabilidade também variam.

**Acidente:** Evento específico não planejado e indesejável, ou uma sequência de eventos que geram consequências indesejáveis.

**Análise de consequência:** Estimativa, através de bases de dados ou modelos matemáticos, de consequências físicas de eventos de riscos, tais como radiação térmica de incêndios e chamas, bolas de fogo etc., ou sobrepressão (ondas de choque) de explosões ou ainda concentrações associadas a liberações de produtos tóxicos e o seu alcance tanto internamente quanto externamente às instalações.

**Análise de riscos:** Estudo quantitativo de riscos numa instalação industrial, baseado em técnicas de identificação de perigos, estimativa de frequências e consequências, análise de vulnerabilidade e estimativa do risco.

**Análise de vulnerabilidade:** Estudo realizado por intermédio de modelos matemáticos para a previsão dos impactos danosos às pessoas, instalações e ao meio ambiente, baseado em limites de tolerância estabelecidos através do parâmetro Probit para os efeitos de sobrepressão advinda de explosões, radiações térmicas decorrentes de incêndios e efeitos tóxicos advindos da exposição a uma alta concentração de substâncias químicas por um curto período de tempo.

**Avaliação de riscos:** Processo pelo qual os resultados da análise de riscos são utilizados para a tomada de decisão, através de critérios comparativos de riscos, para definição da estratégia de gerenciamento dos riscos e aprovação do licenciamento ambiental de um empreendimento.

**Bola de fogo (fireball):** Fenômeno que se verifica quando o volume de vapor inflamável, inicialmente comprimido num recipiente, escapa repentinamente para a atmosfera e, devido à despressurização, forma um volume esférico de gás, cuja superfície externa queima, enquanto a massa inteira eleva-se por efeito da redução da densidade provocada pelo superaquecimento.

**Curva F-N:** Curva referente ao risco social determinada pela plotagem das frequências acumuladas de acidentes com as respectivas consequências expressas em número de fatalidades.

**Curva de iso-risco:** Curva referente ao risco individual determinada pela intersecção de pontos com os mesmos valores de risco de uma mesma instalação industrial. Também conhecida como “contorno de risco”.

**BLEVE:** Do original inglês *Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*. Fenômeno decorrente da explosão catastrófica de um reservatório, quando um líquido nele contido atinge uma temperatura bem acima da sua temperatura de ebulação à pressão atmosférica com projeção de fragmentos e de expansão adiabática.



**Confiabilidade:** é a probabilidade de um item desempenhar uma função, sob condições específicas, de forma adequada, como previsto no projeto, durante um período de tempo pré-determinado. Confiabilidade também está associada a garantia de execução de funcionalidades sistêmicas para atender requisitos não-funcionais.

**Dano:** Efeito adverso à integridade física de um organismo.

**Diagrama de instrumentação e tubulações (P & ID):** Representação esquemática de todas as tubulações, vasos, válvulas, filtros, bombas, compressores, etc., do processo. Os P & ID mostram todas as linhas de processo, linhas de utilidades e suas dimensões, além de indicar também o tamanho e especificação das tubulações e válvulas, incluindo toda a instrumentação da instalação.

**Empreendimento:** Conjunto de ações, procedimentos, técnicas e benfeitorias que permitem a construção de uma instalação.

**Engenharia de confiabilidade:** é o ramo da engenharia voltado para o estudo da confiabilidade de sistemas de forma geral, durante o seu ciclo de vida. O profissional da área possui uma visão geral dos campos da engenharia, vendo o sistema como um todo.

**Erro humano:** Ações indesejáveis ou omissões decorrentes de problemas de sequenciamento, tempo (*timing*), conhecimento, interfaces e/ou procedimentos, que resultam em desvios de parâmetros estabelecidos ou normais e que colocam pessoas, equipamentos e sistemas em risco.

**Estabilidade atmosférica:** Medida do grau de turbulência da atmosfera, normalmente definida em termos de gradiente vertical de temperatura. A atmosfera é classificada, segundo Pasquill, em seis categorias de estabilidade, de A a F, sendo A a mais instável, F a mais estável e D a neutra. A classificação é realizada a partir da velocidade do vento, radiação solar e percentagem de cobertura de nuvem; a condição neutra corresponde a um gradiente vertical de temperatura da ordem de 1º C para cada 100 m de altitude.

**Estimativa de consequências:** Estimativa do comportamento de uma substância química quando de sua liberação acidental no meio ambiente.

**Explosão:** Processo onde ocorre uma rápida e violenta liberação de energia, associado a uma expansão de gases acarretando o aumento da pressão acima da pressão atmosférica.

**Flare:** Chaminés que queimam misturas de gases resultantes de processos em refinarias. A queima dos gases no flare garante dupla segurança para a empresa e a comunidade: os gases não são jogados na atmosfera e a queima garante que estes gases não fiquem parados nas tubulações, o que poderia provocar acidentes.

**Fluxograma de processo:** Representação esquemática do fluxo seguido no manuseio ou na transformação de matérias-primas em produtos intermediários e acabados. É constituída de equipamentos de caldeiraria (tanques, torres, vasos, reatores, etc.); máquinas (bombas, compressores, etc.); tubulações, válvulas e instrumentos principais, onde devem ser apresentados dados de pressão, temperatura, vazões, balanços de massa e de energia e demais variáveis de processo.

**Frequência:** Número de ocorrências de um evento por unidade de tempo.

**Gerenciamento de riscos:** Processo de controle de riscos compreendendo a formulação e a implantação de medidas e procedimentos técnicos e administrativos que têm por objetivo



prevenir, reduzir e controlar os riscos, bem como manter uma instalação operando dentro de padrões de segurança considerados toleráveis ao longo de sua vida útil.

**Incêndio:** Tipo de reação química na qual os vapores de uma substância inflamável combinam-se com o oxigênio do ar atmosférico e uma fonte de ignição, causando liberação de calor.

**Incêndio em nuvem (flashfire):** Incêndio de uma nuvem de vapor onde a massa envolvida e o seu grau de confinamento, não é suficiente para atingir o estado de explosão.

**Incêndio em poça (pool fire):** Fenômeno que ocorre quando há a combustão do produto evaporado da camada de líquido inflamável junto à base do fogo.

**Instalação:** Conjunto de equipamentos e sistemas que permitem o processamento, armazenamento e/ou transporte de insumos, matérias-primas ou produtos. Para fins deste manual, o termo é definido como a materialização de um determinado empreendimento.

**Morbidade:** Relação entre o número de casos de moléstias e o número de habitantes em dado lugar e momento.

**Mortandade:** Grande número de mortes.

**Nó:** Termo utilizado no Estudo de Risco e Operabilidade (“HAZOP – Hazard and Operability Study”) para indicar tubulação, vaso ou ponto de observação de parâmetros de processo.

**Perigo:** Uma ou mais condições, físicas ou químicas, com potencial para causar danos às pessoas, à propriedade, ao meio ambiente ou à combinação desses.

**Planta:** Conjunto de unidades de processo e/ou armazenamento com finalidade comum.

**Probabilidade:** Chance de um evento específico ocorrer ou de uma condição especial existir. A probabilidade é expressa numericamente na forma de fração ou de percentagem.

**Probit:** Parâmetro que serve para relacionar a intensidade de fenômenos como radiação térmica, sobrepressão e concentração tóxica com os danos que podem causar às estruturas ou pessoas. O Probit (unidade de probabilidade) é uma variável randômica com média 5 e variância 1. O valor do Probit é relacionado a uma determinada porcentagem por meio de curvas ou tabelas.

**Programa de gerenciamento de riscos (PGR):** Documento que define a política e diretrizes de um sistema de gestão, com vista à prevenção de acidentes em instalações ou atividades potencialmente perigosas.

**Risco:** É a possibilidade de ocorrência de um perigo. É normalmente definido como o produto  $R = p \cdot C$

onde  $p$  é a probabilidade de ocorrência de um evento indesejado (perigo) e  $C$  são as consequências (severidade) geradas pela ocorrência desse evento indesejado. Essa definição mostra que é possível atenuar um risco diminuindo sua probabilidade de ocorrência ou suas consequências ou ambas.

**Risco individual:** Risco para uma pessoa presente na vizinhança de um perigo, considerando a natureza da injúria que pode ocorrer e o período de tempo em que o dano pode acontecer.

**Risco social:** Risco para um determinado número ou agrupamento de pessoas expostas aos danos de um ou mais acidentes.



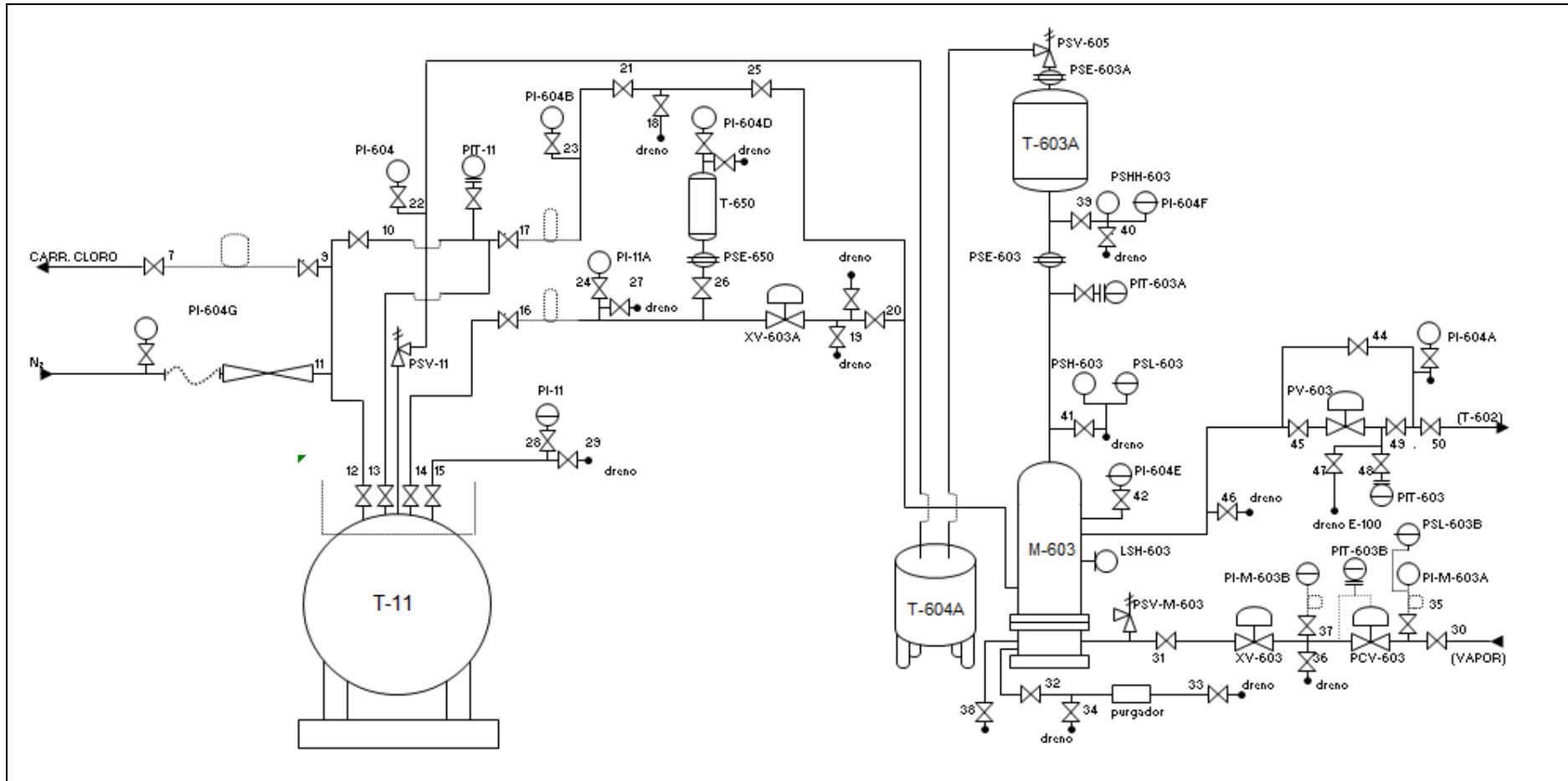
**Sistema:** Arranjo ordenado de componentes que estão interrelacionados e que atuam e interatuam com outros sistemas, para cumprir uma tarefa ou função num determinado ambiente.

**Substância:** Espécie da matéria que tem composição definida.

**Unidade:** Conjunto de equipamentos com finalidade de armazenar (unidade de armazenamento) ou de provocar uma transformação física e/ou química nas substâncias envolvidas (unidade de processo).



## Anexo A2 – Fluxograma da unidade



Anexo A3 - HAZOP



**HAZOP – Estudos de Riscos e Operabilidade**

Unidade: Unidade de Armazenamento e Distribuição de Cloro

Sistema: Sistema de segurança 4

Equipe: Laís e Giovana

Data: Março/ 2009

Localização do Nó: Fornecimento de vapor para o vaporizador M-603 / linha 6

Página:

| <b>Variável ou Parâmetro</b> | <b>Palavra Chave</b> | <b>Desvio</b>     | <b>Causas</b>  | <b>Consequências</b>  | <b>Proteção Disponível</b>   | <b>Recomendações</b>   |
|------------------------------|----------------------|-------------------|--|---|--|--|
| Fluxo de Vapor               | MENOS                | Fluxo baixo       | <ul style="list-style-type: none"> <li>*PSV-M-603 parcialmente aberta</li> <li>*Válvulas 30 e 31 parcialmente fechadas</li> <li>*Incrustação na linha de vapor</li> <li>*Orifício na tubulação</li> <li>*Fornecimento insuficiente do vapor</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>*Vaporização insuficiente do Cl<sub>2</sub></li> <li>*Aquecimento insuficiente do M-603</li> <li>*Acúmulo de Cl<sub>2</sub> líquido no M-603</li> <li>*Redução da pressão na linha de vapor</li> </ul>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Sistemas de shut down em XV-603 e XV-603A</li> </ul>                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Incluir medidores de fluxo ao longo da linha de vapor</li> <li>Incluir alarme de temperatura baixa com intertravamento em XV-603 e XV-603A</li> </ul> |
| Fluxo de Vapor               | MAIS                 | Fluxo alto        | *Falha no sistema de segurança   | <ul style="list-style-type: none"> <li>*Aumento da pressão na linha de vapor</li> <li>*Aumento da pressão no feixe de tubos do M-603</li> <li>*Rompimento do feixe de tubos do M-603 e formação de HCl</li> </ul>                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Sistemas de shut down em XV-603 e XV-603A</li> <li>Válvula de alívio PSV-M-603</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Incluir medidores de fluxo ao longo da linha de vapor</li> </ul>  |
| Fluxo de Vapor               | NENHUM               | Ausência de fluxo | <ul style="list-style-type: none"> <li>*Vapor não está sendo enviado</li> <li>*PSV-M-603 totalmente aberta</li> <li>*Válvulas 30 e 31 totalmente fechadas</li> <li>*Rompimento da tubulação</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>*Acúmulo de Cl<sub>2</sub>(l) no vaporizador</li> <li>*Queda de Temperatura e Pressão em M-603</li> <li>*Cloração insuficiente do processo</li> <li>*Vaporização insuficiente do Cl<sub>2</sub></li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Sistemas de shut down em XV-603 e XV-603A</li> </ul>                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Incluir alarme de temperatura baixa com intertravamento em XV-603 e XV-603A</li> <li>Incluir medidores de fluxo ao longo da linha de vapor</li> </ul> |



## HAZOP – Estudos de Riscos e Operabilidade



Unidade: Unidade de Armazenamento e Distribuição de Cloro

Sistema: Sistema de segurança 4

Equipe: Laís e Giovana

Data: Março/ 2009

Localização do Nó: Fornecimento de vapor para o vaporizador M-603 / linha 6

Página:

| Variável ou Parâmetro | Palavra Chave | Desvio        | Causas   | Consequências   | Proteção Disponível  | Recomendações |
|-----------------------|---------------|---------------|--|---|--|---------------|
| Pressão do Vapor      | MENOS         | Pressão baixa | *Problema no fornecimento do vapor<br>*Falha no sistema de segurança<br>*Orifício na tubulação                                     | *Aquecimento insuficiente do M-603<br>*Vaporização insuficiente do Cl <sub>2</sub><br>*Acúmulo de Cl <sub>2</sub> (l) no M-603<br>*Redução do fluxo na linha de vapor | Sistemas de shut down em XV-603 e XV-603A                                |               |
| Pressão do Vapor      | MAIS          | Pressão alta  | *Falha no sistema de segurança<br>*Incrustação na linha<br>*Válvula 31 parcialmente fechada<br>*Problemas no fornecimento do vapor | *Aumento do fluxo na linha de vapor<br>*Aumento da pressão no feixe de tubos do M-603<br>*Rompimento do feixe de tubos do M-603 e formação de HCl                     | Sistemas de shut down em XV-603 e XV-603A<br>Válvula de alívio PSV-M-603 |               |



## HAZOP – Estudos de Riscos e Operabilidade



Unidade: Unidade de Armazenamento e Distribuição de Cloro

Sistema: Linhas 4 e 5

Equipe: Laís e Giovana

Data: Março/ 2009

Localização do Nó: Entrada de Cloro gás no Vaporizador

Página:

| Variável ou Parâmetro        | Palavra Chave | Desvio            | Causas   | Consequências                                | Proteção Disponível                             | Recomendações   |
|------------------------------|---------------|-------------------|--|--|---|---|
| Fluxo de Cl <sub>2</sub> (g) | MENOS         | Fluxo baixo       | *Pressão de vapor baixa<br>*Incrustação na tubulação<br>*Orifício na tubulação<br>*Válvulas da linha parcialmente fechadas | *Menos Cl <sub>2</sub> (g) entrando no M-603 | Detektoren de Cl <sub>2</sub> (> 1ppm)          | Instalar medidor de fluxo através de um elemento sensor |
| Fluxo de Cl <sub>2</sub> (g) | MAIS          | Fluxo alto        | *Pressão de vapor alta   | *Sobre pressão no M-603                      | Sistema de segurança para alta pressão em M-603 | Instalar medidor de fluxo através de um elemento sensor |
| Fluxo de Cl <sub>2</sub> (g) | NENHUM        | Ausência de fluxo | *T-11 vazio<br>*Válvulas 12 e 13 fechadas<br>*Válvulas 17 ou 21 ou 25 fechadas<br>*Rompimento da tubulação                 | *O Cl <sub>2</sub> não chega ao M-603        | Detektoren de Cl <sub>2</sub> (> 1ppm)          | Instalar medidor de fluxo através de um elemento sensor |



## HAZOP – Estudos de Riscos e Operabilidade



Unidade: Unidade de Armazenamento e Distribuição de Cloro

Sistema: Linhas 4 e 5

Equipe: Laís e Giovana

Data: Março/ 2009

Localização do Nó: Entrada de Cloro gás no Vaporizador

Página:

| <b>Variável ou Parâmetro</b>   | <b>Palavra Chave</b> | <b>Desvio</b> | <b>Causas</b>   | <b>Consequências</b>                                | <b>Proteção Disponível</b>  | <b>Recomendações</b>  |
|--------------------------------|----------------------|---------------|---|---|---|---|
| Pressão de Cl <sub>2</sub> (g) | MENOS                | Pressão baixa | *Pressão de vapor no T-11 baixa<br>*Orifício na tubulação   | *Fluxo de Cl <sub>2</sub> (g) baixo no M-603        | Detektoren de Cl <sub>2</sub> (> 1ppm)                                      |   |
| Pressão de Cl <sub>2</sub> (g) | MAIS                 | Pressão alta  | *Válvulas da linha parcialmente fechadas<br>*Pressão de vapor no T-11 alta<br>*Incrustação na linha | *Sobre pressão no M-603<br>*Rompimento da tubulação | Medidores e alarme de pressão ao longo da linha<br>Válvula de alívio PSV-11 | Instalar medidor de pressão ligado a um intertravamento na linha de gás |



## HAZOP – Estudos de Riscos e Operabilidade



Unidade: Unidade de Armazenamento e Distribuição de Cloro

Sistema: Sistema de segurança 1 e Linhas 3 e 5

Equipe: Laís e Giovana

Data: Março/ 2009

Localização do Nó: Entrada de Cloro líquido no Vaporizador

Página:

| Variável ou Parâmetro        | Palavra Chave | Desvio            | Causas   | Consequências  | Proteção Disponível  | Recomendações   |
|------------------------------|---------------|-------------------|--|--|--|---|
| Fluxo de Cl <sub>2</sub> (l) | MENOS         | Fluxo baixo       | *Pressão de vapor baixa<br>*Incrustação na tubulação<br>*Orifício na tubulação<br>*Válvulas da linha parcialmente fechadas | *Menos Cl <sub>2</sub> (l) entrando no M-603   | Detektoren de Cl <sub>2</sub> (> 1ppm)                                     | Instalar medidor de fluxo através de um elemento sensor |
| Fluxo de Cl <sub>2</sub> (l) | MAIS          | Fluxo alto        | *Pressão de vapor alta   | *Sobre pressão no M-603<br>*Acúmulo de Cl <sub>2</sub> (l) no M-603<br>Alarme de nível LSH-603 | Sistema de segurança para alta pressão em M-603<br>Alarme de nível LSH-603 | Instalar medidor de fluxo através de um elemento sensor |
| Fluxo de Cl <sub>2</sub> (l) | NENHUM        | Ausência de fluxo | *T-11 vazio<br>*Válvulas fechadas ao longo da linha<br>*Rompimento da tubulação  | *O Cl <sub>2</sub> não chega ao M-603  | Detektoren de Cl <sub>2</sub> (> 1ppm)                                     | Instalar medidor de fluxo através de um elemento sensor |



## HAZOP – Estudos de Riscos e Operabilidade



Unidade: Unidade de Armazenamento e Distribuição de Cloro

Sistema: Sistema de segurança 1

Equipe: Laís e Giovana

Data: Março/ 2009

Localização do Nó: Entrada de Cloro líquido no Vaporizador / Linhas 3 e 5

Página:

| <b>Variável ou Parâmetro</b>   | <b>Palavra Chave</b> | <b>Desvio</b> | <b>Causas</b>   | <b>Consequências</b>  | <b>Proteção Disponível</b>   | <b>Recomendações</b> |
|--------------------------------|----------------------|---------------|---|---|--|----------------------|
| Pressão de Cl <sub>2</sub> (l) | MENOS                | Pressão baixa | *Pressão de vapor no T-11 baixa<br>*Orifício na tubulação   | *Fluxo de Cl <sub>2</sub> (g) baixo no M-603  | Detektore de Cl <sub>2</sub> (> 1ppm)  |                      |
| Pressão de Cl <sub>2</sub> (l) | MAIS                 | Pressão alta  | *Válvulas da linha parcialmente fechadas<br>*Pressão de vapor no T-11 alta<br>*Incrustação na linha | *Sobre pressão no M-603<br>*Rompimento da tubulação<br>*Acúmulo de Cl <sub>2</sub> (l) em M-603 | Medidores e alarme de pressão ao longo da linha<br>Sistema de segurança para alta pressão em M-603<br>Alarme de nível no M-603 |                      |



## HAZOP – Estudos de Riscos e Operabilidade



Unidade: Unidade de Armazenamento e Distribuição de Cloro

Sistema: Sistema de segurança 2

Equipe: Laís e Giovana

Data: Março/ 2009

Localização do Nó: Linha 7

Página:

| Variável ou Parâmetro          | Palavra Chave | Desvio        | Causas  | Consequências   | Proteção Disponível   | Recomendações |
|--------------------------------|---------------|---------------|---|---|---|---------------|
| Pressão de Cl <sub>2</sub> (g) | MAIS          | Pressão alta  | *Admissão de cloro em excesso no M-603<br>*Excesso de vapor<br>*Falha no intertravamento de admissão de cloro e vapor       | *Perda de cloro<br>*Ruptura dos discos de segurança                         | Alarmes de pressão alta e de pressão muito alta<br>Discos de ruptura<br>Válvula de alívio<br>Tanque de expansão<br>Tanque absorvedor de cloro |               |
| Pressão de Cl <sub>2</sub> (g) | MENOS         | Pressão baixa | *Pressão no vaporizador menor que no sistema de segurança 2<br>*Orifício no vaporizador<br>*Falha no sistema de segurança 2 | *Fluxo inverso de cloro<br>*Danos no vaporizador M-603 e/ou na sua operação | Alarmes de pressão alta e de pressão muito alta<br>Discos de ruptura<br>Válvula de alívio<br>Tanque de expansão<br>Tanque absorvedor de cloro |               |
| Fluxo de Cl <sub>2</sub> (g)   | MAIS          | Fluxo alto    | *Admissão de cloro em excesso no M-603<br>*Falha no intertravamento de admissão de cloro e vapor<br>*Excesso de vapor       | *Perda de cloro<br>*Ruptura dos discos de segurança                         | Alarmes de pressão alta e de pressão muito alta<br>Discos de ruptura<br>Válvula de alívio<br>Tanque de expansão<br>Tanque absorvedor de cloro |               |



## HAZOP – Estudos de Riscos e Operabilidade



Unidade: Unidade de Armazenamento e Distribuição de Cloro

Sistema: Sistema de segurança 3

Equipe: Laís e Giovana

Data: Março/ 2009

Localização do Nó: Saída do vaporizador / Linha 8

Página:

| Variável ou Parâmetro          | Palavra Chave | Desvio        | Causas  | Consequências  | Proteção Disponível        | Recomendações   |
|--------------------------------|---------------|---------------|---|--|----------------------------|---|
| Pressão de Cl <sub>2</sub> (g) | MAIS          | Pressão alta  | *Excesso de cloro no vaporizador<br>*Falha no intertravamento de admissão de cloro e vapor<br>*Falha no sistema de segurança 3<br>*Incrustação                    | *Excesso de cloro para o processo<br>*Perda de cloro<br>*Danos a tubulação | Válvula de intertravamento | Instalar intertravamento auxiliar<br>Instalar alarme de pressão alta  |
| Pressão de Cl <sub>2</sub> (g) | MENOS         | Pressão baixa | *Aquecimento insuficiente do vaporizador<br>*Falha no intertravamento de admissão de cloro e vapor<br>*Falha no sistema de segurança 3                            | *Comprometimento da cloração do processo                                   | Válvula de intertravamento | Instalar intertravamento auxiliar<br>Instalar alarme de pressão baixa |
| Fluxo de Cl <sub>2</sub> (g)   | MAIS          | Fluxo alto    | *Excesso de cloro no vaporizador<br>*Falha no intertravamento de admissão de cloro e vapor<br>*Falha no sistema de segurança 3                                    | *Excesso de cloro para o processo<br>*Perda de cloro                       | Válvula de intertravamento | Instalar intertravamento auxiliar<br>Instalar alarme de fluxo alto    |
| Fluxo de Cl <sub>2</sub> (g)   | MENOS         | Fluxo baixo   | *Aquecimento insuficiente do vaporizador<br>*Falha no intertravamento de admissão de cloro e vapor<br>*Falha no sistema de segurança 3<br>*Incrustação na linha 8 | *Comprometimento da cloração do processo                                   | Válvula de intertravamento | Instalar intertravamento auxiliar<br>Instalar alarme de pressão baixa |

Anexo A4 – Análise Preliminar de Perigos

|  <b>Análise Preliminar de Perigos</b>  |  |                              |                                      |                       |                      |                       |                                    |                |
|--|--|------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------------------|----------------|
| <b>Empreendimento:</b><br><b>Subsistema: Estação de Cloro - Descarga da carreta</b>  |  |                              |                                      | <b>Referências:</b>   |                      |                       | <b>Data:</b><br><b>Revisão:</b>    |                |
| <b>Perigos<br/>Identificados</b>   | <b>Causas</b>  | <b>Modos de<br/>Detecção</b> | <b>Efeitos</b>                       | <b>Cat.<br/>Freq.</b> | <b>Cat.<br/>Sev.</b> | <b>Cat.<br/>Risco</b> | <b>Recomendações / Observações</b> | <b>Cenário</b> |
| Pequena liberação de substância tóxica Cloro   | Vazamento no tanque da carreta:<br>- Pelas juntas;<br>-Pelos flanges;<br>-Pelas válvulas   | Odor                         | Vaporização de cloro para o ambiente | B                     | II                   | 1                     |                                    | 01             |
| Grande liberação de substância tóxica Cloro  | Ruptura no trecho da tubulação entre a carreta de Cloro e o tanque de T-11:<br>-Na linha ½";<br>-Nas válvulas;<br>-Nos flanges e juntas. | Odor                         | Formação de Nuvem tóxica             | B                     | IV                   | 3                     |                                    | 02             |
|  | Ruptura do tanque de cloro da carreta  | Ruído, odor                  | Formação de Nuvem tóxica             | B                     | IV                   | 3                     |                                    | 03             |



## Análise Preliminar de Perigos



Empreendimento:

Subsistema: Estação de cloro

Data:

Revisão:

| Perigos Identificados                        | Causas   | Modos de Detecção | Efeitos                              | Cat. Freq. | Cat. Sev. | Cat. Risco | Recomendações / Observações                               | Cenário |
|--|--|-------------------|--------------------------------------|------------|-----------|------------|---|---------|
| Pequena liberação de substância tóxica Cloro | Vazamento no trecho de tubulação da saída do tanque T-11 até o vaporizador de Cloro M-603:<br>-pela linha;<br>-pelos flanges e juntas;<br>-pelas válvulas.                                 | Odor              | Vaporização de Cloro para o ambiente | B          | II        | 1          |   | 04      |
| Grande liberação de substância tóxica Cloro  | Ruptura no trecho de tubulação entre o T-11 até o tanque T-602, passando pelo vaporizador de Cloro M-603:<br>-Na linha ½";<br>-Nas válvulas;<br>-Nos flanges e juntas;<br>-No vaporizador. | Odor              | Formação de nuvem tóxica             | B          | IV        | 3          | Bloquear válvula à montante da PSV 6038 na posição aberta | 05      |
|  |  | Ruído Odor        | Formação de nuvem tóxica             | B          | IV        | 3          |   | 06      |



Anexo A5 - Árvore de Eventos do Evento Iniciador 01 (EI-01)



| Evento iniciador 01 | Sucesso no sistema de segurança   | Direção do vento | Velocidade do vento                       | Efeitos                  | Frequência           |
|---------------------|-----------------------------------|------------------|---|--------------------------|----------------------|
|                     | S ( $1,00 - 7,24 \cdot 10^{-7}$ ) |                  |   | Dano desprezível         | $0,99$               |
|                     |                                   |                  | $V = 1 \text{ m/s } (7,81 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $5,65 \cdot 10^{-8}$ |
|                     |                                   | Norte            | $V = 3 \text{ m/s } (3,71 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $2,68 \cdot 10^{-8}$ |
|                     | N ( $7,24 \cdot 10^{-7}$ )        |                  | $V = 5 \text{ m/s } (0,55 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $3,98 \cdot 10^{-9}$ |
|                     |                                   |                  | $V = 1 \text{ m/s } (8,71 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $6,30 \cdot 10^{-8}$ |
|                     |                                   | Nordeste         | $V = 3 \text{ m/s } (6,48 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $4,69 \cdot 10^{-8}$ |
|                     |                                   |                  | $V = 5 \text{ m/s } (0,5 \cdot 10^{-2})$  | Formação de nuvem tóxica | $3,62 \cdot 10^{-9}$ |
|                     |                                   |                  | $V = 1 \text{ m/s } (7,34 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $5,31 \cdot 10^{-8}$ |
|                     |                                   | Leste            | $V = 3 \text{ m/s } (7,40 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $5,35 \cdot 10^{-8}$ |
|                     |                                   |                  | $V = 5 \text{ m/s } (1,01 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $7,31 \cdot 10^{-9}$ |
|                     |                                   |                  | $V = 1 \text{ m/s } (4,86 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $3,51 \cdot 10^{-8}$ |
|                     |                                   | Sudeste          | $V = 3 \text{ m/s } (5,29 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $3,83 \cdot 10^{-8}$ |
|                     |                                   |                  | $V = 5 \text{ m/s } (7,59 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $5,49 \cdot 10^{-8}$ |
|                     |                                   |                  | $V = 1 \text{ m/s } (3,67 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $2,65 \cdot 10^{-8}$ |
|                     |                                   | Sul              | $V = 3 \text{ m/s } (4,70 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $3,40 \cdot 10^{-8}$ |
|                     |                                   |                  | $V = 5 \text{ m/s } (6,69 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $4,84 \cdot 10^{-8}$ |
|                     |                                   |                  | $V = 1 \text{ m/s } (2,31 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $1,67 \cdot 10^{-8}$ |
|                     |                                   | Sudoeste         | $V = 3 \text{ m/s } (0,97 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $7,02 \cdot 10^{-9}$ |
|                     |                                   |                  | $V = 5 \text{ m/s } (2,08 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $1,50 \cdot 10^{-8}$ |
|                     |                                   |                  | $V = 1 \text{ m/s } (3,27 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $2,36 \cdot 10^{-8}$ |
|                     |                                   | Oeste            | $V = 3 \text{ m/s } (3,36 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $2,43 \cdot 10^{-8}$ |
|                     |                                   |                  | $V = 5 \text{ m/s } (2,70 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $1,95 \cdot 10^{-8}$ |
|                     |                                   |                  | $V = 1 \text{ m/s } (4,48 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $3,24 \cdot 10^{-8}$ |
|                     |                                   | Noroeste         | $V = 3 \text{ m/s } (3,41 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $2,46 \cdot 10^{-8}$ |
|                     |                                   |                  | $V = 5 \text{ m/s } (1,10 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $7,96 \cdot 10^{-9}$ |



## Anexo A6 - Árvore de Eventos do Evento Iniciador 02 (EI-02)



| Evento iniciador 02 | Sucesso no sistema de segurança   | Direção do vento | Velocidade do vento                       | Efeitos                  | Frequência            |
|---------------------|-----------------------------------|------------------|---|--------------------------|-----------------------|
|                     | S ( $1,00 - 1,14 \cdot 10^{-7}$ ) |                  |   | Dano desprezível         | $0,99$                |
|                     |                                   |                  | $V = 1 \text{ m/s } (7,81 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $8,90 \cdot 10^{-9}$  |
|                     |                                   | Norte            | $V = 3 \text{ m/s } (3,71 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $4,22 \cdot 10^{-9}$  |
|                     |                                   |                  | $V = 5 \text{ m/s } (0,55 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $6,27 \cdot 10^{-10}$ |
|                     |                                   |                  | $V = 1 \text{ m/s } (8,71 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $9,92 \cdot 10^{-9}$  |
|                     | N (1,14*10 <sup>-7</sup> )        | Nordeste         | $V = 3 \text{ m/s } (6,48 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $7,38 \cdot 10^{-9}$  |
|                     |                                   |                  | $V = 5 \text{ m/s } (0,5 \cdot 10^{-2})$  | Formação de nuvem tóxica | $5,70 \cdot 10^{-10}$ |
|                     |                                   |                  | $V = 1 \text{ m/s } (7,34 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $8,36 \cdot 10^{-9}$  |
|                     |                                   | Leste            | $V = 3 \text{ m/s } (7,40 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $8,43 \cdot 10^{-9}$  |
|                     |                                   |                  | $V = 5 \text{ m/s } (1,01 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $1,15 \cdot 10^{-9}$  |
|                     |                                   |                  | $V = 1 \text{ m/s } (4,86 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $5,54 \cdot 10^{-9}$  |
|                     |                                   | Sudeste          | $V = 3 \text{ m/s } (5,29 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $6,03 \cdot 10^{-9}$  |
|                     |                                   |                  | $V = 5 \text{ m/s } (7,59 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $8,65 \cdot 10^{-9}$  |
|                     |                                   |                  | $V = 1 \text{ m/s } (3,67 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $4,18 \cdot 10^{-9}$  |
|                     |                                   | Sul              | $V = 3 \text{ m/s } (4,70 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $5,35 \cdot 10^{-9}$  |
|                     |                                   |                  | $V = 5 \text{ m/s } (6,69 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $7,62 \cdot 10^{-9}$  |
|                     |                                   |                  | $V = 1 \text{ m/s } (2,31 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $2,63 \cdot 10^{-9}$  |
|                     |                                   | Sudoeste         | $V = 3 \text{ m/s } (0,97 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $1,10 \cdot 10^{-9}$  |
|                     |                                   |                  | $V = 5 \text{ m/s } (2,08 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $2,37 \cdot 10^{-9}$  |
|                     |                                   |                  | $V = 1 \text{ m/s } (3,27 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $3,72 \cdot 10^{-9}$  |
|                     |                                   | Oeste            | $V = 3 \text{ m/s } (3,36 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $3,83 \cdot 10^{-9}$  |
|                     |                                   |                  | $V = 5 \text{ m/s } (2,70 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $3,07 \cdot 10^{-9}$  |
|                     |                                   |                  | $V = 1 \text{ m/s } (4,48 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $5,10 \cdot 10^{-9}$  |
|                     |                                   | Noroeste         | $V = 3 \text{ m/s } (3,41 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $3,88 \cdot 10^{-9}$  |
|                     |                                   |                  | $V = 5 \text{ m/s } (1,10 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $1,25 \cdot 10^{-9}$  |



### Anexo A7 - Árvore de Eventos do Evento Iniciador 03 (EI-03)



| Evento iniciador 03 | Sucesso no sistema de segurança  | Direção do vento | Velocidade do vento                | Efeitos                  | Frequência           |
|---------------------|----------------------------------|------------------|------------------------------------|--------------------------|----------------------|
|                     | S (1,00 - $2,59 \cdot 10^{-5}$ ) |                  |                                    | Dano desprezível         | 0,99                 |
|                     | N ( $2,59 \cdot 10^{-5}$ )       | Norte            | V = 1 m/s ( $7,81 \cdot 10^{-2}$ ) | Formação de nuvem tóxica | $2,02 \cdot 10^{-6}$ |
|                     |                                  |                  | V = 3 m/s ( $3,71 \cdot 10^{-2}$ ) | Formação de nuvem tóxica | $9,60 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  |                  | V = 5 m/s ( $0,55 \cdot 10^{-2}$ ) | Formação de nuvem tóxica | $1,42 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  | Nordeste         | V = 1 m/s ( $8,71 \cdot 10^{-2}$ ) | Formação de nuvem tóxica | $2,25 \cdot 10^{-6}$ |
|                     |                                  |                  | V = 3 m/s ( $6,48 \cdot 10^{-2}$ ) | Formação de nuvem tóxica | $1,67 \cdot 10^{-6}$ |
|                     |                                  |                  | V = 5 m/s ( $0,5 \cdot 10^{-2}$ )  | Formação de nuvem tóxica | $1,29 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  | Leste            | V = 1 m/s ( $7,34 \cdot 10^{-2}$ ) | Formação de nuvem tóxica | $1,90 \cdot 10^{-6}$ |
|                     |                                  |                  | V = 3 m/s ( $7,40 \cdot 10^{-2}$ ) | Formação de nuvem tóxica | $1,91 \cdot 10^{-6}$ |
|                     |                                  |                  | V = 5 m/s ( $1,01 \cdot 10^{-2}$ ) | Formação de nuvem tóxica | $2,61 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  | Sudeste          | V = 1 m/s ( $4,86 \cdot 10^{-2}$ ) | Formação de nuvem tóxica | $1,25 \cdot 10^{-6}$ |
|                     |                                  |                  | V = 3 m/s ( $5,29 \cdot 10^{-2}$ ) | Formação de nuvem tóxica | $1,37 \cdot 10^{-6}$ |
|                     |                                  |                  | V = 5 m/s ( $7,59 \cdot 10^{-2}$ ) | Formação de nuvem tóxica | $1,96 \cdot 10^{-6}$ |
|                     |                                  | Sul              | V = 1 m/s ( $3,67 \cdot 10^{-2}$ ) | Formação de nuvem tóxica | $9,50 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  |                  | V = 3 m/s ( $4,70 \cdot 10^{-2}$ ) | Formação de nuvem tóxica | $1,21 \cdot 10^{-6}$ |
|                     |                                  |                  | V = 5 m/s ( $6,69 \cdot 10^{-2}$ ) | Formação de nuvem tóxica | $1,73 \cdot 10^{-6}$ |
|                     |                                  | Sudoeste         | V = 1 m/s ( $2,31 \cdot 10^{-2}$ ) | Formação de nuvem tóxica | $5,98 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  |                  | V = 3 m/s ( $0,97 \cdot 10^{-2}$ ) | Formação de nuvem tóxica | $2,51 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  |                  | V = 5 m/s ( $2,08 \cdot 10^{-2}$ ) | Formação de nuvem tóxica | $5,38 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  | Oeste            | V = 1 m/s ( $3,27 \cdot 10^{-2}$ ) | Formação de nuvem tóxica | $8,46 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  |                  | V = 3 m/s ( $3,36 \cdot 10^{-2}$ ) | Formação de nuvem tóxica | $8,70 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  |                  | V = 5 m/s ( $2,70 \cdot 10^{-2}$ ) | Formação de nuvem tóxica | $6,99 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  | Noroeste         | V = 1 m/s ( $4,48 \cdot 10^{-2}$ ) | Formação de nuvem tóxica | $1,16 \cdot 10^{-6}$ |
|                     |                                  |                  | V = 3 m/s ( $3,41 \cdot 10^{-2}$ ) | Formação de nuvem tóxica | $8,83 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  |                  | V = 5 m/s ( $1,10 \cdot 10^{-2}$ ) | Formação de nuvem tóxica | $2,84 \cdot 10^{-7}$ |



## Anexo A8 - Árvore de Eventos do Evento Iniciador 04 (EI-04)



| Evento iniciador 04 | Sucesso no sistema de segurança  | Direção do vento | Velocidade do vento                       | Efeitos                  | Frequência           |
|---------------------|----------------------------------|------------------|---|--------------------------|----------------------|
|                     | S ( $1,00 - 7,0 \cdot 10^{-6}$ ) |                  |   | Dano desprezível         | $0,99$               |
|                     |                                  |                  | $V = 1 \text{ m/s } (7,81 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $5,46 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  | Norte            | $V = 3 \text{ m/s } (3,71 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $2,59 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  |                  | $V = 5 \text{ m/s } (0,55 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $3,85 \cdot 10^{-8}$ |
|                     |                                  |                  | $V = 1 \text{ m/s } (8,71 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $6,09 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  | Nordeste         | $V = 3 \text{ m/s } (6,48 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $4,53 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  |                  | $V = 5 \text{ m/s } (0,5 \cdot 10^{-2})$  | Formação de nuvem tóxica | $3,50 \cdot 10^{-8}$ |
|                     |                                  |                  | $V = 1 \text{ m/s } (7,34 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $5,13 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  | Leste            | $V = 3 \text{ m/s } (7,40 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $5,18 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  |                  | $V = 5 \text{ m/s } (1,01 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $7,07 \cdot 10^{-8}$ |
|                     |                                  |                  | $V = 1 \text{ m/s } (4,86 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $3,40 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  | Sudeste          | $V = 3 \text{ m/s } (5,29 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $3,70 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  |                  | $V = 5 \text{ m/s } (7,59 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $5,31 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  |                  | $V = 1 \text{ m/s } (3,67 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $2,56 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  | Sul              | $V = 3 \text{ m/s } (4,70 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $3,29 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  |                  | $V = 5 \text{ m/s } (6,69 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $4,68 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  |                  | $V = 1 \text{ m/s } (2,31 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $1,61 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  | Sudoeste         | $V = 3 \text{ m/s } (0,97 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $6,79 \cdot 10^{-8}$ |
|                     |                                  |                  | $V = 5 \text{ m/s } (2,08 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $1,45 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  |                  | $V = 1 \text{ m/s } (3,27 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $2,28 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  | Oeste            | $V = 3 \text{ m/s } (3,36 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $2,35 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  |                  | $V = 5 \text{ m/s } (2,70 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $1,89 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  |                  | $V = 1 \text{ m/s } (4,48 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $3,13 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  | Noroeste         | $V = 3 \text{ m/s } (3,41 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $2,38 \cdot 10^{-7}$ |
|                     |                                  |                  | $V = 5 \text{ m/s } (1,10 \cdot 10^{-2})$ | Formação de nuvem tóxica | $7,70 \cdot 10^{-8}$ |