DOUGLAS THIAGO DA SILVA ALVES

DETERMINAÇÃO DE LAYOUT DE PLANTAS QUÍMICAS VIA MINIMIZAÇÃO DO RISCO AO PÚBLICO EXTERNO APLICANDO TÉCNICAS DE MONTE CARLO E SIMULATED ANNEALING

UFRJ/CT/EQ/TPQBq

2013

DETERMINAÇÃO DE LAYOUT DE PLANTAS QUÍMICAS VIA MINIMIZAÇÃO DO RISCO AO PÚBLICO EXTERNO APLICANDO TÉCNICAS DE MONTE CARLO E SIMULATED ANNEALING

Douglas Thiago da Silva Alves

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS.

Aprovada por:

_____
Prof. José Luiz de Medeiros, D.Sc – Orientador

_____
Profa. Ofélia de Queiroz Fernandes Araújo, Ph.D. – Orientadora

_____
Prof. Enrique Andrés López Droguett, D.Sc.

_____
Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D.Sc.

_____
Prof. Márcio Nele de Souza, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil
2013

Alves, Douglas Thiago da Silva.

Determinação de layout de Plantas Químicas via minimização do Risco ao Público Externo aplicando técnicas de Monte Carlo e *Simulated Annealing* - 2013.

xiii, 140 p., il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Rio de Janeiro, 2013.

Orientadores: José Luiz de Medeiros e Ofélia de Queiroz Fernandes Araújo

1. Risco ao público externo. 2. Otimização de layout de instalações industriais. 3. *Simulated Annealing*. 4. Método de Monte Carlo. 5. *Software* MATLAB. 6. Incêndio, explosão e dispersão de nuvem tóxica. 7. Estudo de Análise de Riscos
I. Medeiros, José Luiz de.
II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola de Química.
III. Título.

Dedico este trabalho em especial à minha família, aos meus mestres,

e a todos aqueles que, de alguma forma, apoiaram-me,

acreditaram na minha capacidade e me ajudaram a chegar até aqui.

Agradecimentos

A Deus, pelas oportunidades e pelas pessoas as quais me ajudaram a concretizar mais um objetivo.

Aos Professores José Luiz e Ofélia, pela orientação neste trabalho, pela exemplar competência técnica e docente, pela disponibilidade em ajudar e por todos os ensinamentos.

Ao meu gerente imediato Leonardo Florêncio, da Petrobras, pelo incentivo, por acreditar na minha capacidade e pela oportunidade de me permitir conciliar o trabalho e os estudos. Agradeço também ao colega e coordenador Giovani Dellamea pela análise da dissertação.

Aos membros da banca pela atenção, pelas críticas construtivas e por estarem presentes na defesa deste trabalho.

À minha colega de trabalho e amiga Izabel, pelos conselhos e pelos ensinamentos técnicos na área de Análise de Riscos.

À minha pátria, a qual possibilitou que eu tivesse acesso a uma educação de qualidade desde o ensino médio (CEFET-MG), passando pela graduação (UFMG) até chegar ao mestrado (UFRJ), e também por ter me permitido fazer parte da maior empresa do país.

E principalmente aos meus pais Fátima e José e aos meus irmãos Rodrigo e Diogo, pois a família é a base de tudo. Sem o apoio, o carinho e a força proporcionada por eles, a realização deste trabalho teria sido infinitamente mais difícil.

“Educação é uma descoberta progressiva de nossa própria ignorância.”

Voltaire

“Seja impetuoso, um livre-pensador, supere suas limitações.”

Nietzsche

Resumo da Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Ciências.

DETERMINAÇÃO DE LAYOUT DE PLANTAS QUÍMICAS VIA MINIMIZAÇÃO DO RISCO AO PÚBLICO EXTERNO APLICANDO TÉCNICAS DE MONTE CARLO E SIMULATED ANNEALING

Douglas Thiago da Silva Alves
Agosto de 2013

Orientadores: Prof. José Luiz de Medeiros, D.Sc.
Profª. Ofélia de Queiroz Fernandes Araújo, Ph.D.

Tendo em vista a atual fase do desenvolvimento industrial brasileiro impulsionado pelas descobertas de novas reservas de petróleo e gás nas bacias da plataforma continental, a implantação de novos empreendimentos em petróleo e gás se tornou frequente e essencial à expansão da infraestrutura e à diversificação da matriz energética do Brasil. Nesta categoria incluem-se refinarias, terminais de distribuição de combustíveis, plantas petroquímicas e de fertilizantes, centrais de distribuição de GLP, unidades de tratamento de gás, entre outros, que foram implantados recentemente ou serão construídos em um futuro próximo.

Em função de estas instalações processarem e armazenarem grandes inventários inflamáveis e tóxicos, há a preocupação constante das empresas e órgãos ambientais em evitar que a ocorrência de vazamentos e acidentes possam causar danos às comunidades vizinhas e/ou ao meio-ambiente. Esta preocupação sobrevém em nível internacional desde os anos 70, principalmente pelas repercussões dos acidentes de Seveso, Itália (1976), e Bhopal, Índia (1984). Neste sentido destacam-se as Diretivas de Seveso I e II da União Européia em 1982 e 1996, visando à prevenção de acidentes com inventários perigosos, bem como a limitação das consequências para comunidades vizinhas e o meio ambiente.

Neste contexto, este trabalho desenvolveu uma metodologia computacional em MATLAB R12, tendo como base a utilização conjunta do método de Monte Carlo e do método de otimização heurística *Simulated Annealing*. A metodologia visa locar de forma ótima unidades de processo na planta (*layout*) de modo a minimizar o potencial de dano às comunidades extramuros em face dos possíveis acidentes nas instalações. A eficácia da metodologia foi comprovada pela aplicação em três estudos de caso hipotéticos: terminal marítimo de combustíveis, refinaria de petróleo e estação de tratamento de água com gás cloro. Em todos os casos estudados a aplicação da metodologia contribuiu efetivamente para a redução do risco a comunidades vizinhas, uma vez que as áreas de população atingidas pelos alcances acidentais foram minimizadas.

Abstract of Dissertation presented to Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science.

DETERMINATION OF CHEMICAL PLANTS LAYOUTS VIA MINIMIZATION OF RISK TO THE EXTERNAL PUBLIC USING MONTE CARLO AND SIMULATED ANNEALING TECHNIQUES.

Douglas Thiago da Silva Alves
August 2013

Advisors : Prof. José Luiz de Medeiros, D.Sc.
Profª. Ofélia de Queiroz Fernandes Araújo, PhD.

Given the current conjuncture of the Brazilian industrial development boosted by the discoveries of new reserves of oil and gas in continental platform basins, the implementation of new enterprises of oil and gas have become frequent and essential to support the expansion of the infrastructure and diversification of the Brazilian energy matrix. In this category may be included new refineries, fuel and LPG distribution terminals, petrochemical and fertilizer plants, gas treatment units, among others, which were implanted recently in the country or are planned to be built soon.

Since these process facilities and store substantial inventories of flammable and toxic products, companies and environmental agencies are always concerned to avoid that spillages and accidents cause damages to the surrounding communities and the environment. This is a global concern since the 70's due to the drastic repercussions of the accidents Seveso, Italy (1976) and Bhopal, India (1984). In this context, the European Union issued Seveso I and II Directives, respectively in 1982 and 1996, for preventing accidents with dangerous inventories, as well mitigating their consequences to neighbor communities and the environment.

In consonance with this scenario, this work developed a computational methodology, written in MATLAB R12 and based on the Monte Carlo method and the Simulated Annealing technique, to optimally locate process units in the plant area (layout) in order to minimize the potential damage to neighbor populations in the case of possible plant accidents. The efficacy of the methodology was demonstrated by its application to three hypothetic case-studies: a marine terminal of fuels, an oil refinery, and a water treatment plant with chlorine gas. In all studied cases the methodology has contributed effectively to the reduction of risk to the surrounding communities, because it always proposed plant layouts leading to minimal extension of the external populated area that could be affected by accidents.

Lista de Figuras

Figura 1.1 Alcance acidental referente ao parque de tancagem atingindo a população. 8
Figura 1.2 Alcance acidental referente ao parque de tancagem após sua realocação. 9
Figura 1.3 Alcance acidental restrito aos limites da instalação industrial. 10
Figura 1.4 Alcances acidentais referentes às unidades de processo/armazenamento. 11
Figura 2.1 Etapas para elaboração do Estudo de Análise de Riscos (CETESB, 2003). 16
Figura 2.2Árvore de eventos aplicada a ocorrências pós-incidente (AICHE 2000). 23
Figura 2.3Árvore de eventos aplicada a ocorrências pré-incidente (AICHE 2000). 23
Figura 2.4 Árvore de eventos para liberações contínuas de gases inflamáveis. 26
Figura 2.5 Árvore de eventos para liberações instantâneas de gases inflamáveis. 26
Figura 2.6 Árvore de eventos para liberações de líquidos inflamáveis. 28
Figura 2.7 Desenho esquemático de um furo em um tanque de armazenamento. 30
Figura 2.8 Desenho esquemático representando furos em um vaso/tanque bifásico. 35
Figura 2.9 Elemento de volume utilizado para dedução da equação de balanço. 40
Figura 2.10 Formação de vórtex durante o espalhamento gravitacional – gás denso. 43
Figura 2.11 Nomogramas para liberações contínuas e instantâneas, respectivamente. 44
Figura 2.12 Nomograma utilizado para determinação dos alcances para o Modelo TNT. 47
Figura 2.13 Nomograma para determinação dos alcances para o Modelo Multienergia. 49
Figura 2.14 Geometrias adotadas para cada tipologia acidental (cortes transversais). 51
Figura 2.15 Curvas dose-resposta e Log (dose)-resposta tipicamente obtidas. 52
Figura 2.16 Representação das curvas de iso-risco de uma planta industrial fictícia. 57
Figura 2.17 Exemplo hipotético de curva F-N para instalações industriais. 58
Figura 2.18 Critérios de risco individual adotados pela CETESB. 60
Figura 2.19 Critérios de risco social adotados pela CETESB. 60
Figura 3.1 Exemplo de aplicação do método de Monte Carlo. 63
Figura 5.1 Exemplo de aplicação do método de Monte Carlo. 73
Figura 5.2 Pontos gerados pelo Método de Monte Carlo para quantificação das áreas. 75
Figura 5.3 Exemplo da aplicação da Triangulação de Delaunay. 77
Figura 5.4 Aplicação da Triangulação de Delaunay no exemplo em análise. 77
Figura 5.5 Análise da localização do ponto em relação ao triângulo selecionado. 79
Figura 5.6 Identificação da localização dos pontos dentro e fora do Polígono do Empreendimento. 81
Figura 5.7 Identificação dos pontos localizados na Área de Interesse. 82
Figura 5.8 Resultado final obtido mediante a aplicação da FUNCAO_AREA. 83

Figura 5.9 Configuração inicial do Terminal Marítimo e circunvizinhanças. 88
Figura 5.10 Exemplo dos movimentos de rotação e de translação propostos. 94
Figura 5.11 Refinaria, circunvizinhanças e localização inicial do Parque de Esferas. 102
Figura 5.12 Área disponível para implantação do Parque de Esferas. 105
Figura 5.13 Estação de Tratamento de Cloro e circunvizinhanças. 108
Figura 6.1 Configuração Inicial do Terminal mediante plotagem no MATLAB. 117
Figura 6.2 Configuração Otimizada para Terminal mediante aplicação do algoritmo. 118
Figura 6.3 Gráfico do comportamento da função objetivo ao longo da otimização. 119
Figura 6.4 Configuração Inicial da Refinaria mediante plotagem no MATLAB. 121
Figura 6.5 Layout mostrando a localização otimizada do Parque de Esferas de GLP. 122
Figura 6.6 Gráfico do comportamento da função objetivo ao longo da otimização. 123
Figura 6.7 Localização Inicial da Estação de Tratamento e circunvizinhanças. 125
Figura 6.8 Localização otimizada da Estação de Tratamento e circunvizinhanças. 126
Figura 6.9 Gráfico do comportamento da função objetivo ao longo da otimização. 127
Figura 6.10 Nova localização otimizada da Estação e circunvizinhanças. 129
Figura 6.11 Gráfico do comportamento da função objetivo para o novo caso. 130

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 Principais acidenteis industriais ocorridos no mundo até a década de 80. 2
Tabela 1.2 Países que ratificaram a Convenção nº 174 até o ano de 2010. 4
Tabela 2.1 Exemplos da aplicação da técnica HazOp (Fonte: CETESB, 2003). 21
Tabela 2.2 Relação entre probabilidade de dano (%) e valores de PROBIT. 53
Tabela 2.3 Fórmulas disponíveis para cálculo da dose na equação de PROBIT. 54
Tabela 2.4 Valores de referência para definição dos alcances acidentais..... 55
Tabela 5.1 Classificação de líquidos inflamáveis conforme manual BEVI. 89
Tabela 5.2 Classificação dos inventários presentes no Terminal Marítimo. 89
Tabela 5.3 Dados das tancagens que compõem o Terminal..... 90
Tabela 5.4 Dados meteorológicos adotados nas simulações..... 90
Tabela 5.5 Alcances acidentais por tipologia. 92
Tabela 5.6 Fatores de ponderação pertinentes ao Estudo de Caso 1..... 98
Tabela 5.7 Parâmetros pertinentes à otimização *Simulated Annealing*..... 99
Tabela 5.8 Alcances acidentais por tipologia. 103
Tabela 5.9 Fatores de ponderação pertinentes ao Estudo de Caso 2..... 104
Tabela 5.10 Classificação de substâncias tóxicas conforme manual da CETESB. 109
Tabela 5.11 Classificação do cloro segundo sua toxicidade. 110
Tabela 5.12 Alcances acidentais para nuvem tóxica de cloro. 111
Tabela 5.13 Fatores de ponderação pertinentes ao Estudo de Caso 3..... 112
Tabela 6.1 Coordenadas dos arranjos Inicial e Otimizado referentes ao Terminal..... 118
Tabela 6.2 Dados referentes à otimização do *layout* do Terminal..... 119
Tabela 6.3 Dados referentes à otimização da localização do Parque de Esferas. 123
Tabela 6.4 Dados referentes à otimização da localização da Estação de Tratamento..... 127
Tabela 6.5 Dados referentes à otimização para o novo caso..... 130

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. Prevenção de acidentes no mundo - Histórico 3

1.2. Prevenção de Acidentes no Brasil 5

1.3. Objetivo 6

1.4. Motivação 7

1.5. Organização da Dissertação 12

2. CÁLCULO DE RISCO APLICADO A INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS 13

2.1. Conceito de Risco ao Público Externo 13

2.2. Estudo de Análise de Riscos 14
2.2.1 Caracterização do empreendimento e da região 17
2.2.2 Identificação de perigos 19
2.2.3 Estimativa de efeitos físicos 22
2.2.4 Análise de vulnerabilidade 52
2.2.5 Análise de Frequência 56
2.2.6 Estimativa e Avaliação dos Riscos 56

3. MÉTODO DE MONTE CARLO 61

3.1. Introdução 61

3.2. Método de Monte Carlo aplicado ao cálculo de áreas 62

4. MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO *SIMULATED ANNEALING* 65

4.1. Introdução 65

4.2. Problemas de *Layout* de Instalações Industriais 68

4.3. *Simulated Annealing* aplicado a FLP 70

5. METODOLOGIA 72

5.1. Introdução 72

5.2. Algoritmo para cálculo das áreas 73
5.2.1. Aplicação do Método de Monte Carlo 74
5.2.2. Definição da FUNCAO_AREA 76

5.3. Estudos de caso 86
5.3.1 Estudo de Caso 1: Terminal de Líquidos Inflamáveis 87
5.3.2 Estudo de Caso 2 – Novo Parque de Esferas de GLP 101

5.3.3 Estudo de Caso 3 – Estação de Tratamento de Água 107

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO 116

6.1. Estudo de Caso 1 – Terminal de Líquidos Inflamáveis 117

6.2. Estudo de Caso 2 – Novo Parque de Esferas de GLP 120

6.3. Estudo de Caso 3 – Estação de Tratamento de Água 124

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 132

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 136

1. INTRODUÇÃO

Dentre os diversos assuntos que permeiam a sociedade desde a ocorrência da Revolução Industrial no Reino Unido em meados do século XVIII e, posteriormente, no mundo de uma forma geral, verifica-se que a questão ambiental ao longo do tempo vem se tornando cada vez mais presente e relevante no cotidiano das pessoas.

Conforme citado no site das Nações Unidas no Brasil (ONUBR[1]), pode-se dizer que a preocupação do homem com o meio ambiente em resposta à industrialização se iniciou há séculos atrás, evidenciando, portanto, a forte relação entre os temas. Uma das formas de expressão desta preocupação remonta ao século XIX, principalmente na literatura através da exaltação da natureza feita por autores americanos e escritores românticos britânicos (sendo o naturalista Henry David Thoreau um exemplo).

Entretanto, segundo NAVARRO *et alii* (2010), apesar da preocupação internacional com o meio ambiente não ser recente, somente a partir da segunda metade do século XX seu espaço foi ampliado nas agendas políticas dos Estados, Organizações Intergovernamentais, Organizações não Governamentais (ONGs) e Empresas. Essa consciência ambiental global surgiu gradativamente e, nas décadas de 60 e 70, o tema meio ambiente passou a ter uma dimensão realmente internacional, culminando na realização da Conferência de Estocolmo sobre Meio Ambiente Humano em 1972.

Ainda segundo NAVARRO *et alii* (2010), antes da Conferência de Estocolmo, as questões ambientais recebiam, no âmbito da Organização das Nações Unidas (ONU), tratamento limitado, com atitudes pontuais e restritas a algumas de suas entidades. Porém, o ponto de inflexão no exame das questões ambientais pelo sistema das Nações Unidas foi, realmente, a referida Conferência de 1972.

Neste ponto, cabe ressaltar que, atualmente, a questão ambiental possui uma abrangência maior do que os assuntos comumente associados a este tema, tais como a poluição da atmosfera e de corpos hídricos, o combate ao desmatamento, a contaminação do solo e a desertificação, a preocupação com espécies ameaçadas de extinção, dentre outros. Ela compreende também, dentro do conceito de

[1] http://www.onu.org.br/a-onu-em-acao/a-onu-e-o-meio-ambiente. Acesso realizado em 05/12/2012, às 14:00 hs.

desenvolvimento sustentável, questões relacionadas à preservação da própria vida humana com foco na prevenção da ocorrência de acidentes em instalações industriais, as quais possuam potencial de causar danos às comunidades que vivem em suas proximidades e também ao meio ambiente.

Do ponto de vista histórico, esta preocupação com os riscos proporcionados à população circunvizinha ao empreendimento (público externo) associados à atividade industrial se intensificou a partir das décadas de 70 e 80, principalmente em função da ocorrência de grandes acidentes que tiveram repercussão em nível internacional. Dentre os acidentes ocorridos nesta época destacam-se os que estão apresentados na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 Principais acidenteis industriais ocorridos nas décadas de 70 e 80.

Data	Local	Evento	Substância
1966	Feysin, França	Incêndio na planta de processo - Refinaria	Derivado de Petróleo
1972	Rio de Janeiro - Brasil	Incêndio seguido de BLEVE na tancagem da Refinaria	Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)
1974	Flixborough, Reino Unido	Explosão seguida de incêndio na planta de processo	Cicloexano
1975	Beek, Holanda	Incêndio na planta de processo - Petroquímica	Propeno
1976	Seveso, Itália	Liberação de nuvem tóxica em planta química	Dioxina
1979	Three Mile Island, EUA	Fusão parcial do reator nuclear	Produtos de fissão
1984	Bhopal, Índia	Liberação de nuvem tóxica em planta química	Isocianato de metila
1984	Cidade do México, México	Explosão e incêndio no terminal de estocagem de GLP	Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)
1986	Chernobyl, Ucrânia	Explosão do reator causada por acúmulo de H_2	Produtos de fissão
1988	Mar do Norte, Reino Unido	Explosão seguida de incêndio em plataforma petrolífera	Petróleo e gás

Fonte: Navarro *et alii* (2010).

Em resposta ao expressivo número de acidentes ocorridos principalmente nesta época em âmbito mundial e à crescente apreensão da sociedade em função das severas consequências impostas às populações vizinhas e/ou ao meio ambiente em decorrência dos mesmos, a temática relacionada à prevenção de acidentes passou a ser de responsabilidade não somente das empresas (como era anteriormente), mas também dos organismos governamentais nacionais e, até mesmo, internacionais.

1.1. Prevenção de acidentes no mundo - Histórico

Conforme PUIATTI (2000), a primeira iniciativa em nível internacional com o objetivo de prevenção de grandes acidentes ocorreu em junho de 1982, com a publicação na União Européia da Diretiva 82/501/ECC, amplamente conhecida como "Diretiva de Seveso" (em referência ao acidente ocorrido na Itália em 1976). A mesma foi elaborada em função dos inúmeros acidentes que ocorreram na Europa até a data de sua publicação, conforme pode ser verificado na Tabela 1.1.

Posteriormente, em 1996, foi lançada a Diretiva 96/82/EC sobre o Controle dos Perigos Associados a Acidentes Graves que Envolvem Substâncias Perigosas, denominada "Diretiva de Seveso II", introduzindo novos requisitos em relação à Diretiva anterior. Os principais pontos adicionais são referentes à gestão de segurança das instalações industriais, ao planejamento e resposta a emergências, ao planejamento do uso do solo e considerações sobre o "efeito dominó".

De forma resumida, as Diretivas de Seveso I e II possuem dois grandes objetivos:

- Prevenção de acidentes graves envolvendo substâncias perigosas;
- Limitação das suas consequências para o homem e para o meio ambiente, com vista a assegurar níveis de proteção elevados à comunidade.

É importante ressaltar que, em função dos acidentes mais recentes ocorridos na Europa, a Diretiva foi ampliada de forma a abranger também questões relacionadas ao setor de mineração, a substâncias pirotécnicas e explosivas e à estocagem de nitrato de amônia.

Além da Europa, os grandes acidentes também tiveram repercussões nos Estados Unidos. Em 1985, um ano após o acidente de Bhopal na Índia (provocado por uma empresa multinacional norte-americana e que resultou em inúmeras fatalidades), a agência ambiental americana (EPA - *Environmental Protection Agency*) iniciou no país um programa de incentivo a ações comunitárias de emergência em caso de acidentes envolvendo substâncias químicas perigosas. Essa e outras ações relacionadas à prevenção de acidentes resultaram, segundo PUIATTI (2000), na publicação, pela OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*), da versão final da legislação americana relacionada à segurança dos trabalhadores de instalações sujeitas à ocorrência de grandes acidentes. Esta

legislação entrou em vigor em 1992 e foi intitulada "*Process Safety Management of Highly Hazardous Chemicals*".

Também tendo como referência o acidente de Bhopal, o qual despertou interesse político não só nos Estados Unidos como também em nível mundial, foi aprovada durante a Conferência Geral da OIT (Organização Internacional do Trabalho), em 1993, a Convenção nº 174, a qual tem como foco a Prevenção de Grandes Acidentes Industriais, bem como a redução ao mínimo dos riscos e das consequências relacionadas a estes acidentes. Estão relacionados na Tabela 1.2 os países que ratificaram a referida Convenção até o ano de 2010.

Tabela 1.2 Países que ratificaram a Convenção nº 174 até o ano de 2010.

Data	País	Data	País
1994	Suécia	2003	Albânia
1996	Armênia	2003	Zimbábue
1997	Colômbia	2004	Bélgica
1997	Holanda	2005	Líbano
2000	Estônia	2008	Luxemburgo
2001	**Brasil**	2008	Índia
2001	Arábia Saudita	2010	Eslovênia

Fonte: Navarro *et alii* (2010).

Tendo como base a Diretiva de Seveso I, segundo ROCHA JR. *et alii* (2006), neste instrumento evidencia-se que o Estado, em conjunto com as organizações de empregadores e de trabalhadores e outras partes que possam ser afetadas, deve formular, adotar e revisar, periodicamente, a legislação, as condições e as práticas nacionais, com vista a uma política nacional coerente relativa à proteção dos trabalhadores, da população e do meio-ambiente.

Ainda segundo ROCHA JR. *et alii* (2006), quando se comparam a Diretiva de Seveso e a Convenção nº 174, verifica-se que, em termos gerais, estas normas são semelhantes, sendo que a primeira tem uma preocupação maior na prevenção dos grandes acidentes relacionados a substâncias químicas perigosas, tendo como foco principal as comunidades próximas às instalações industriais. Por sua vez, a Convenção, além de se tratar de um instrumento essencialmente preventivo, tem como enfoque a segurança dos trabalhadores.

1.2. Prevenção de Acidentes no Brasil

Conforme consta no site da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB)[2], no Brasil, assim como havia ocorrido na Europa e nos Estados Unidos, o acontecimento de um acidente de grandes proporções no ano de 1984 constituiu o fator principal que impulsionou a preocupação com a prevenção de grandes acidentes no país.

Particularmente em São Paulo, estado onde ocorrera o referido acidente, causado pelo rompimento de um duto de gasolina numa localidade conhecida como Vila Socó, em Cubatão, esta preocupação se tornou ainda mais evidente. Deste modo, tendo em vista o evento catastrófico ocorrido e o conhecimento da publicação da Diretiva de Seveso em 1982, a CETESB iniciou uma pesquisa em relação ao tema, em nível internacional.

Este acontecimento representou uma mudança de paradigma em relação à visão dos órgãos ambientais no país em relação aos grandes acidentes, uma vez que, a partir desse momento, a preocupação passou a ter um caráter mais preventivo, e não somente corretivo.

Aliado a isto, em 1986, com a publicação da Resolução n^{o} 1 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), a qual tornou obrigatória, dentro do processo de licenciamento ambiental, a elaboração do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e do respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), os Estudos de Análise de Riscos (EAR) passaram a ser incorporados neste processo, sendo aplicáveis a empreendimentos os quais apresentem potencial de causar danos extramuros (fora dos limites da indústria em questão). Isto permitiu, portanto, que a questão relacionada à prevenção de acidentes maiores passasse a ser contemplada nos processos de licenciamento no Brasil, seja em nível municipal, estadual ou federal.

Neste contexto, o Estudo de Análise de Riscos (EAR), juntamente com o Programa de Gerenciamento de Riscos (PGR) e o Plano de Ação de Emergência (PAE), dentre outros documentos, tornaram-se, ao longo do tempo, ferramentas de suma importância para a gestão adequada dos riscos tecnológicos inerentes à atividade industrial no país.

[2] http://www.cetesb.sp.gov.br/gerenciamento-de-riscos/Emegências-Químicas/11-Histórico. Acesso realizado em 06/12/2012 às 11:00 hs.

Particularmente, o EAR, conforme será explorado com mais detalhe posteriormente neste trabalho, permite a aplicação de metodologias científicas para se identificar, quantificar, analisar, verificar a adequabilidade dos riscos de um dado empreendimento, bem como propor medidas de mitigação (caso necessárias) de forma que os mesmos possam ser gerenciados e mantidos em níveis aceitáveis. Vale ressaltar que este tipo de estudo aborda a questão da prevenção de acidentes tendo como foco as comunidades vizinhas à instalação analisada.

Além disso, conforme DEMAJOROVIC (2006), outros eventos ocorridos no país com a óptica voltada à prevenção de grandes acidentes também merecem destaque.

Em 1994, dez anos após o acidente ocorrido em Cubatão e um ano após a publicação da Convenção n^{o} 174 pela Organização Internacional do Trabalho em Genebra, foi realizado, em Salvador, o primeiro Seminário Nacional sobre Prevenção de Acidentes Maiores em Indústrias Químicas. Um ano depois, aconteceu o Seminário Nacional sobre Riscos e Acidentes Maiores e, em 1997, foi apresentado à Câmara dos Deputados um projeto de lei para o país ratificar a Convenção acima citada, à qual o Brasil aderiu em 2001.

No que tange à segurança dos trabalhadores das indústrias, em 1998 uma portaria do Ministério do Trabalho nomeou uma comissão paritária, com participação de representantes do governo, dos trabalhadores e das empresas, com o objetivo de serem elaboradas diretrizes para o desenvolvimento de uma política nacional sobre prevenção de acidentes industriais maiores / ampliados. Segundo NAVARRO *et alii* (2010), as propostas desta comissão, publicada em 1999, têm como base as experiências internacionais no assunto, tais como a européia (Diretivas de Seveso I e II) e a norte-americana (OSHA/PSM).

1.3. Objetivo

O principal objetivo deste trabalho consistiu na elaboração de uma metodologia computacional com base na utilização conjunta do Método de Monte Carlo (MC) e do método de otimização heurística conhecido como *Simulated Annealing* (SA), visando a:

(i) Determinar a localização ótima das unidades de processo na planta (*layout*) de modo a minimizar os potenciais danos às comunidades extramuros em

decorrência dos possíveis acidentes que possam vir a ocorrer em instalações industriais que armazenem, processem ou movimentem grandes inventários de substâncias perigosas;

(ii) Evitar a demanda futura de medidas mitigadoras de risco adicionais, atuando de maneira preventiva durante a etapa de projeto do empreendimento na definição do arranjo da planta;

(iii) Fomentar a inserção da variável ambiental "risco ao público externo" no processo de elaboração do projeto das plantas industriais.

Ressalta-se que a demonstração da eficiência e da aplicabilidade da metodologia desenvolvida será feita por meio de estudos de caso, os quais serão apresentados no capítulo 5.

1.4. Motivação

Tendo em vista a atual fase do desenvolvimento industrial brasileiro, bem como o cenário econômico do país nos últimos dez anos, a implantação de novos empreendimentos se tornou uma atividade bastante frequente e essencial para impulsionar o desenvolvimento da infraestrutura e a diversificação da matriz energética do Brasil.

Dentro desta conjuntura, um número expressivo de empreendimentos relacionados à indústria de petróleo e derivados, tais como refinarias, terminais de distribuição de combustíveis, plantas petroquímicas e de fertilizantes, centrais de distribuição de GLP, unidades de tratamento de gás, entre outros, foram implantados recentemente no país ou serão construídos em um futuro próximo.

Em função de estas instalações industriais movimentarem, processarem e/ou armazenarem produtos de natureza inflamável e/ou tóxica e em grandes quantidades, há uma preocupação constante tanto das empresas quanto dos órgãos ambientais em evitar a ocorrência de vazamentos e acidentes que possam, de alguma forma, causar danos às comunidades vizinhas a estes empreendimentos e/ou ao meio-ambiente. Além disto, do ponto de vista do empreendedor, além da questão ambiental, há também o temor relacionado à ocorrência de acidentes pelo fato de os mesmos resultarem em prejuízos financeiros tanto devido à descontinuidade da atividade desenvolvida (lucro cessante), quanto pelos danos à imagem da empresa, a qual, no mundo globalizado atual, possui extrema relevância.

Desta forma, uma grande quantidade de recursos (tanto financeiros como humanos) é empregada pelas empresas de forma a se atingir patamares aceitáveis que permitam a operação segura de tais plantas. Grandes investimentos são feitos em sistemas de segurança, sistemas de combate a incêndio, treinamentos da força de trabalho na prevenção de acidentes, programas de gerenciamento de riscos, planos de contingência, etc.

Sem dúvida, estes e outros fatores não citados acima são imprescindíveis. Entretanto, não é difícil mostrar que, em alguns casos, medidas tomadas durante a fase de elaboração do projeto, além de exigirem custos e prazos muito menores, constituem ações mais efetivas do ponto de vista da segurança.

Um exemplo simples pode ser evidenciado através das Figuras 1.1 e 1.2 apresentadas em seguida. Em ambas as figuras está sendo considerada a mesma planta industrial presente em uma dada região geográfica, a qual apresenta a oeste e ao norte comunidades representadas esquematicamente por pequenas casas. Em ambas as figuras foi representado, por meio de um círculo vermelho, o alcance acidental máximo correspondente, por exemplo, a um potencial sinistro que possa ocorrer em seu parque de tancagem de combustíveis.

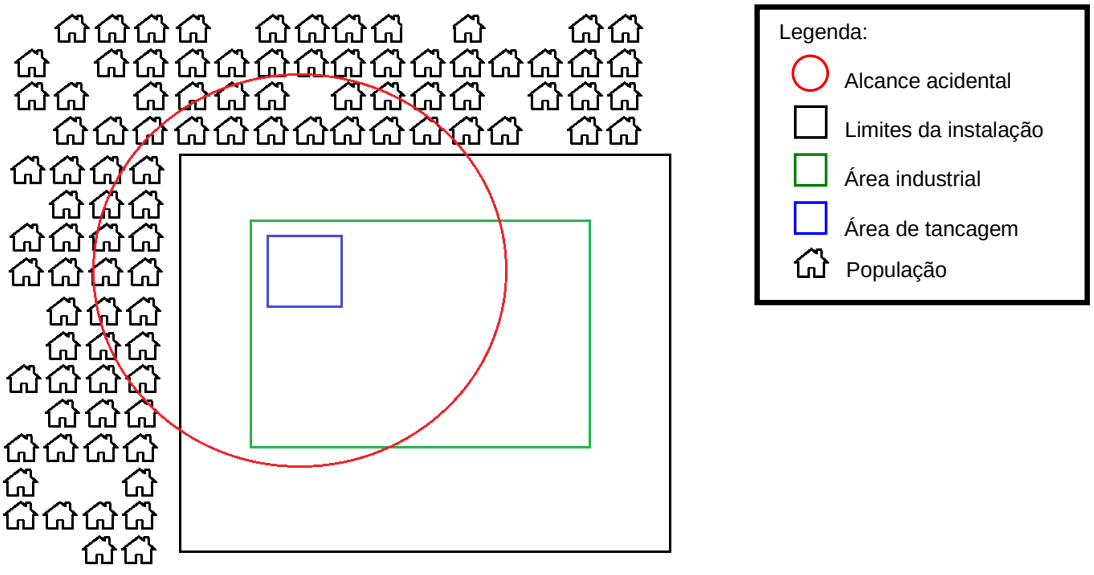


Figura 1.1 Alcance acidental referente ao parque de tancagem atingindo a população.

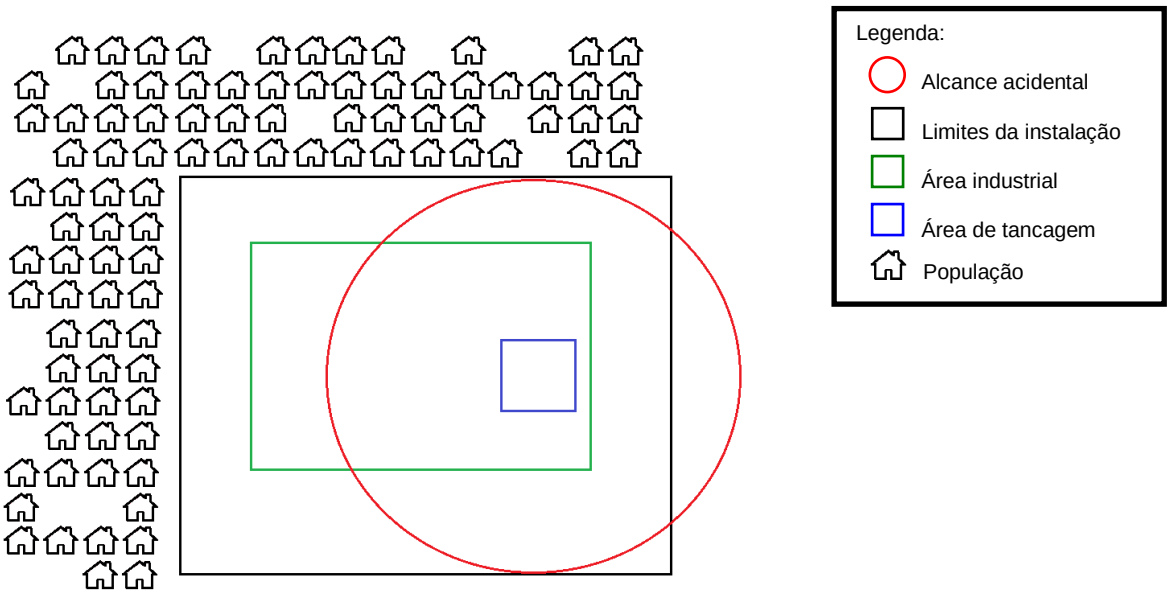


Figura 1.2 Alcance acidental referente ao parque de tancagem após sua realocação.

No caso da Figura 1.1, o alcance acidental possui potencial de atingir as populações consideradas caso ocorra o sinistro, podendo haver, portanto, danos extramuros a terceiros. Conforme será explicado posteriormente, isto não significa, por exemplo, que os riscos referentes a esta instalação sejam considerados intoleráveis de acordo com os critérios de aceitabilidade dos órgãos ambientais. Porém, após a elaboração do Estudo de Análise de Riscos, pode-se chegar à conclusão, durante o processo de licenciamento, que medidas mitigadoras adicionais sejam necessárias para reduzir os riscos às populações vizinhas, acarretando, inclusive, em custo adicional ao projeto.

Com relação à Figura 1.2, na qual apenas foi feito o reposicionamento do parque de tancagem, nota-se que o alcance acidental não tem potencial de atingir populações extramuros, minimizando, portanto, os riscos a que estas comunidades estarão submetidas em função das atividades a serem desempenhadas na planta industrial vizinha. Isto evidencia, assim, que a simples mudança do local de implantação do parque de tancagem, medida esta passível de ser tomada durante as primeiras etapas do projeto, referente à elaboração do *layout* da instalação, contribuiu de forma significativa para a redução dos riscos ao público externo.

Além disso, com base na análise de ambas as figuras apresentadas anteriormente, pode-se, inclusive, propor uma localização para o parque de tancagem de tal forma que o alcance acidental fique restrito aos limites do empreendimento, conforme exemplificado na Figura 1.3.

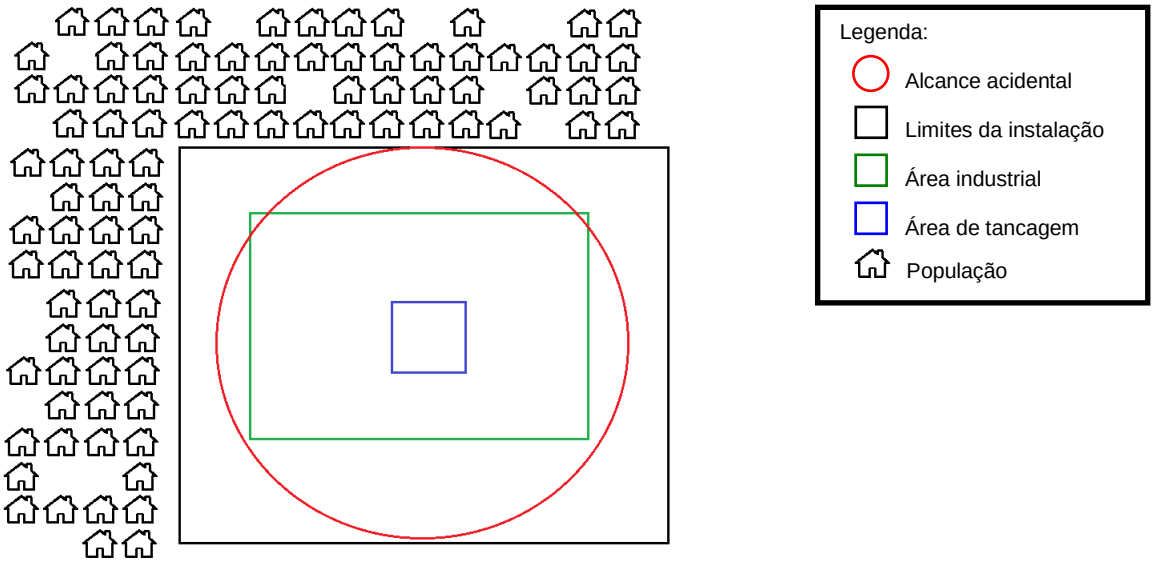


Figura 1.3 Alcance acidental restrito aos limites da instalação industrial.

A configuração representada acima, na qual se reduziu ao máximo a área externa aos muros da instalação atingida pelo alcance acidental, constitui uma situação mais favorável do que a apresentada na Figura 1.2. Isto porque, mesmo que haja expansão da população e consequente surgimento de casas também do lado leste do empreendimento, o alcance acidental referente ao parque de tancagem na situação da Figura 1.3 continuará sem potencial de atingir as comunidades vizinhas. No caso da configuração anterior, entretanto, mediante o crescimento populacional citado, haverá a possibilidade de o alcance acidental atingir as novas casas.

É importante observar que, tanto por limitação do tamanho das áreas industriais, quanto pela magnitude dos alcances referentes a determinadas tipologias acidentais, nem sempre será possível restringir os mesmos aos limites do empreendimento. Entretanto, mesmo para estes casos, a minimização da área de tais alcances que extrapolará os limites da instalação e que poderá atingir a população constitui uma medida interessante do ponto de vista da redução dos riscos ao público externo.

Outro ponto relevante a ser destacado é que, no exemplo contextualizado pelas Figuras 1.1, 1.2 e 1.3, de forma didática, apresentou-se apenas o alcance acidental referente ao parque de tancagem da instalação analisada. Entretanto, sabe-se que as instalações industriais são bastante complexas, sendo compostas

por distintas unidades de processo e/ou por tanques de armazenamento contendo produtos com diferentes quantidades e periculosidades.

Do ponto de vista da quantificação dos riscos, o estudo destas instalações complexas pode ser feito de maneira segmentada, chegando-se a alcances acidentais máximos para cada uma das unidades de processo, por exemplo, ou para cada tipo de tancagem de produtos químicos. A Figura 1.4 exemplifica esta questão.

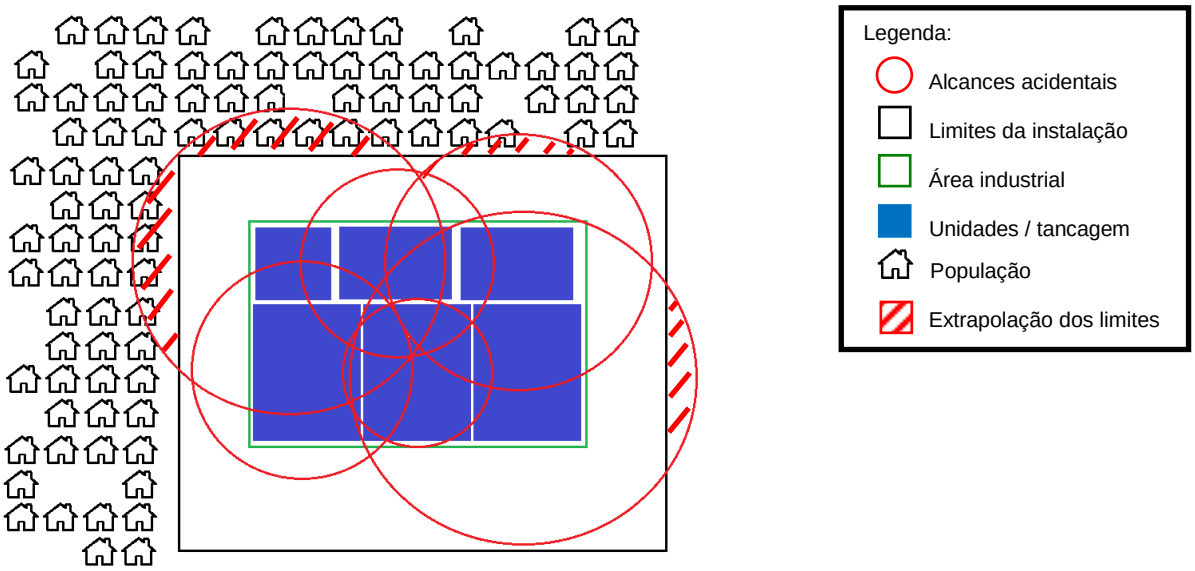


Figura 1.4 Alcances acidentais referentes às unidades de processo/armazenamento.

Assim sendo, da mesma forma que foi feito apenas para o parque de tancagem exemplificado anteriormente, a medida de redução de riscos referente à minimização das áreas abrangidas pelos alcances acidentais que extrapolam os limites da instalação (áreas hachuradas na Figura 1.4) também pode ser aplicada a instalações contendo diversas unidades / tanques, sendo intuitiva a idéia de que há um arranjo ótimo para o qual a soma das áreas extrapoladas é a menor possível.

Tendo este princípio como base, propõe-se uma metodologia desenvolvida em MATLAB R12 consubstanciando um algoritmo aplicando conjuntamente o Método de Monte Carlo (MC) e o método de otimização heurística *Simulated Annealing* (SA) com a finalidade de minimizar uma função objetivo que represente o somatório das áreas abrangidas pelos alcances acidentais referentes às unidades que compõem uma dada instalação industrial que extrapolem os limites da mesma. Seguindo o padrão SA característico, o algoritmo aqui implementado pesquisa, de forma heurística e iterativa, as localizações das unidades dentro da área industrial, modificando-as de modo a minimizar o objetivo descrito, mas tendo como restrição a

não sobreposição das unidades no arranjo final, uma vez que tal sobreposição remeteria a uma situação fisicamente impossível.

Ao longo deste trabalho, objetiva-se apresentar esta metodologia a qual visa à obtenção de *layouts* para instalações industriais cujos riscos impostos às comunidades vizinhas sejam os menores possíveis, contribuindo para a busca da plena tolerabilidade dos riscos destes futuros empreendimentos frente aos critérios dos órgãos ambientais brasileiros. Neste âmbito, salienta-se que se busca a plena tolerabilidade dos riscos tanto para a fase de licenciamento ambiental relacionada à implantação do empreendimento como também para toda a vida útil operacional da planta em análise, estando, portanto, em consonância com os princípios básicos dos dispositivos internacionais relacionadas à prevenção de grandes acidentes, tais como as Diretivas de Seveso I e II.

1.5. Organização da Dissertação

A revisão bibliográfica deste trabalho é composta pelos Capítulos 2, 3 e 4. O Capítulo 2 introduz o conceito de risco ao público externo, bem como apresenta a metodologia e as equações utilizadas para a quantificação dos riscos de instalações industriais contendo substâncias perigosas, além de exemplos de critérios de avaliação dos riscos aplicados no Brasil. No Capítulo 3 é apresentado o Método de Monte Carlo (MC), com enfoque na aplicação proposta no presente trabalho para o referido algoritmo. O Capítulo 4, por sua vez, expõe os conceitos básicos referentes ao método de otimização heurística *Simulated Annealing* (SA), discutindo inclusive a sua aplicação à resolução de problemas de otimização de *layout* (FLP – *Facility Layout Problem*).

No Capítulo 5 é apresentada a metodologia desenvolvida com base nos Métodos de Monte Carlo e *Simulated Annealing*, bem como descritos os três estudos de caso abordados com o objetivo de exemplificar a eficácia da metodologia proposta.

A consolidação dos resultados e a apresentação das figuras e dos gráficos obtidos para os três estudos de caso hipotéticos mediante aplicação da metodologia desenvolvida é feita no Capítulo 6.

Por fim, são expostas no Capítulo 7 as conclusões e as recomendações deste trabalho.

2. CÁLCULO DE RISCO APLICADO A INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS

Com o intuito de minimizar os riscos com base nos alcances acidentais referentes às unidades de processo e/ou de tancagem que compõem uma dada instalação industrial, é necessário compreender a metodologia de cálculo usualmente aplicada para a determinação destes alcances e, consequentemente, dos riscos.

No Brasil, assim como em países tais como o Reino Unido e a Holanda (os quais são considerados referência internacional na área de quantificação e gestão de riscos), a ferramenta habitualmente empregada para esta finalidade consiste no Estudo de Análise de Riscos (EAR).

Entretanto, antes de explorar em que consiste esta ferramenta, convém primeiramente definir o conceito de risco do ponto de vista em que este termo é empregado neste tipo de estudo, ou seja, com foco nas comunidades presentes no entorno do empreendimento analisado (risco ao público externo).

2.1. Conceito de Risco ao Público Externo

Segundo FREITAS (1997), o termo “risco” tem sua origem durante o processo do estabelecimento das sociedades contemporâneas a partir do final do Renascimento e início das revoluções científicas (final do século XV e início do século XVI), momento este em que ocorreram intensas transformações sociais e culturais. Deriva da palavra italiana *riscare*, cujo significado original remetia ao ato de navegar entre rochedos perigosos (época das grandes navegações), sendo, inclusive, incorporado ao vocabulário francês por volta de 1660 (ROSA *et al*., 1995 apud FREITAS, 1997).

O conceito de risco que se conhece atualmente, e que pode ser aplicado nas mais diversas áreas do conhecimento, basicamente preconiza a análise associada do potencial de perdas e danos em decorrência de dado evento (magnitude das consequências) e a probabilidade de ocorrência deste dado evento (frequência).

Desta forma, de uma maneira geral, matematicamente o risco (R) é comumente definido como sendo uma função do próprio evento (e) analisado e das suas respectivas consequências (c) e frequência (f), originando, portanto, a seguinte equação simplificada:

$$R = F(e, c, f), \tag{2.1}$$

De acordo com a área para a qual a equação anterior é aplicada, as variáveis e, c e f possuem metodologias distintas para a sua determinação. No caso do risco ao público externo, conforme estabelecido no *Guidelines for Chemichal Process Quantitative Risk Analysis* (AICHE, 2000), a equação genérica definida acima assume a seguinte forma:

$$R = F(s, c, f), \tag{2.2}$$

Em que:

s	Cenário acidental analisado.
c	Consequência (dano) ao público externo referente ao cenário acidental “s”.
f	Frequência estimada de ocorrência do cenário acidental “s”.

A definição dos cenários acidentais possíveis de ocorrer em uma dada instalação industrial, bem como a quantificação das suas respectivas consequências e frequências constituem etapas da Análise Quantitativa de Riscos (AQR) desenvolvida durante a elaboração do Estudo de Análise de Riscos (EAR) citado anteriormente, cuja metodologia será apresentada, de forma geral, nos itens a seguir.

2.2. Estudo de Análise de Riscos

O Estudo de Análise de Riscos (EAR) é uma ferramenta que permite identificar, quantificar e analisar os riscos impostos por uma dada instalação industrial (que contenha produtos perigosos em quantidade significativa) ao público externo, o qual é representado pela população vizinha ao empreendimento em análise.

No Brasil, conforme citado anteriormente, após a publicação da Resolução nº 1 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) em 1986, o EAR passou, obrigatoriamente, a compor os processos de licenciamento ambiental referentes a

instalações industriais com estas características, sejam elas já existentes ou empreendimentos novos (a serem construídos).

Entretanto, é importante ressaltar que a finalidade do EAR extrapola o atendimento às exigências das agências reguladoras durante o processo de licenciamento. São exemplos da aplicabilidade desta ferramenta:

- Permitir que o empreendedor conheça os riscos inerentes à atividade industrial desempenhada, de modo que os mesmos possam ser gerenciados de forma satisfatória (ou seja, é empregado como instrumento de gestão);
- Identificar cenários acidentais mais críticos, possibilitando ao empreendedor direcionar recursos referentes à mitigação dos riscos de maneira mais eficiente;
- Subsidiar a elaboração do Plano de Ação de Emergências (PAE) através dos alcances acidentais estimados na análise de consequências;
- Apoiar a tomada de decisão referente à localização de um empreendimento futuro, de forma a se evitar, sempre que possível, locais que possuam grandes aglomerados populacionais;
- Servir como referência para definição de determinadas variáveis de projeto de uma dada instalação industrial (tais como quantidade e a capacidade de tanques de armazenamento de produtos perigosos, bem como a localização dos mesmos na planta);
- Auxiliar na escolha do tipo de tecnologia a ser empregada em um dado processo (exemplo: utilização de hipoclorito ao invés de cloro gasoso em unidades de tratamento de água);
- No caso do projeto de dutos de transporte de produtos perigosos, pode auxiliar também na definição dos respectivos traçados, bem como de suas variáveis operacionais e construtivas.

De uma forma geral, o Estudo de Análise de Riscos segue uma metodologia bem definida, a qual é dividida em etapas que se inter-relacionam e, por fim, resultam na quantificação e avaliação dos riscos obtidos.

As etapas que compõem o EAR são mostradas esquematicamente na Figura 2.1 a seguir.

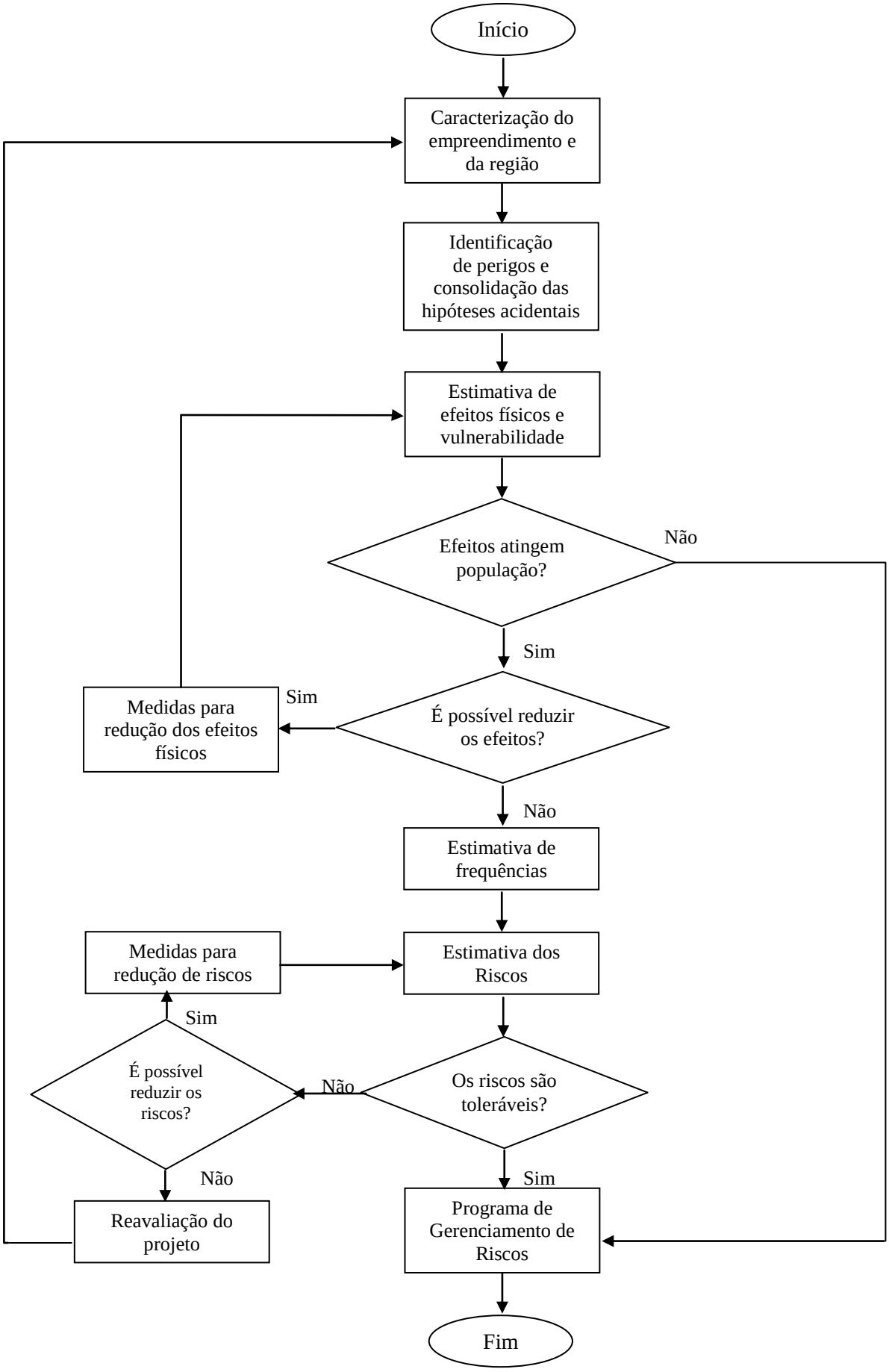


Figura 2.1 Etapas para elaboração do Estudo de Análise de Riscos (CETESB, 2003).

2.2.1 Caracterização do empreendimento e da região

A caracterização do empreendimento e da região constitui uma das etapas mais importantes na elaboração do EAR, uma vez que esta terá influência em todas as etapas posteriores do estudo, sem exceção. Desta forma, o Estudo de Análise de Riscos deve considerar, da forma mais fiel possível, a realidade do empreendimento em análise, bem como da região em que o mesmo está ou estará inserido.

No caso da caracterização do empreendimento, os dados referentes à instalação analisada são de suma importância, principalmente, para as etapas de identificação de perigos, análise de consequências e vulnerabilidade, análise de frequências e, por conseguinte, para a estimativa dos riscos.

As principais informações levantadas a respeito do empreendimento em análise são relacionadas abaixo.

2.2.1.1 Substâncias químicas movimentadas, processadas ou armazenadas.

A partir da relação de todas as substâncias e da apresentação das respectivas Fichas de Identificação de Segurança de Produtos Químicos (FISPQs), é possível classificá-las de acordo com as respectivas periculosidades, selecionando-se as que são de interesse para as próximas etapas do estudo de risco.

2.2.1.2 Instalações e processos

A caracterização física da instalação em análise, em geral feita por meio da planta de arranjo (*layout*) do empreendimento, fornece informações importantes para a análise de consequências e vulnerabilidade, pois é a partir dela que, por exemplo, serão definidas as localizações dos pontos de liberação referentes às hipóteses acidentais consolidadas após a etapa de identificação de perigos. Além disso, também podem ser extraídos do *layout* dados de entrada para as simulações de consequências, tais como as dimensões de diques de contenção, caso existam.

Igualmente imprescindível para a elaboração do estudo, o conhecimento a respeito dos processos, do armazenamento de substâncias e das operações de carga e descarga que farão parte do empreendimento fornecerão a grande maioria dos dados que serão necessários para as simulações de consequência, para os

cálculos de frequência e, por fim, para a estimativa dos riscos. Os principais dados são:

- Condições operacionais (temperatura, pressão, vazão, etc);
- Composição das linhas de processo;
- Equipamentos (tipo e quantidade) e diâmetros das tubulações envolvidas;
- Inventário presente nos vasos de processo;
- Inventário presente nos tanques de armazenamento;
- Dispositivos de proteção presentes (válvulas de alívio, por exemplo);
- Frequência de operações, no caso de carga e descarga;
- Instrumentação de controle de processo e de segurança presentes.

Estas informações são suportadas por documentos pertinentes à instalação analisada, tais como fluxogramas de processo e de engenharia, balanços de massa e energia das unidades de processo, folha de dados de equipamentos, memoriais descritivos, etc.

No que tange à caracterização da região, as principais informações relevantes para elaboração do EAR são relacionadas a seguir:

2.2.1.3 Dados meteorológicos

A velocidade média dos ventos, a temperatura e a umidade médias do ar atmosférico, a classe de estabilidade atmosférica e a distribuição de probabilidade de direção de ventos, dentre outros parâmetros, também constituem dados relevantes para as etapas de estimativa de consequências e de riscos.

Desta forma, a coleta e o tratamento adequados dos dados meteorológicos referentes à região em análise são de suma importância para a representatividade dos resultados obtidos no estudo.

2.2.1.4 Pontos notáveis

Do ponto de vista da quantificação dos riscos, os pontos notáveis mais relevantes são aqueles relacionados à presença de ocupação humana, tais como

residências, creches, escolas, hospitais, dentre outros que façam parte do público externo ao empreendimento.

A obtenção do número de pessoas nestes pontos notáveis, que pode ser feita através de pesquisa de campo ou com base em dados censitários do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), é essencial para o cálculo do risco social, o qual será definido posteriormente.

Além da quantidade de pessoas, dados probabilísticos relacionados ao fator de presença nos períodos diurno e noturno, e ou dentro (indoor) ou fora (outdoor) das habitações, por exemplo, também são importantes para a quantificação dos riscos. Dados de referência podem ser obtidos nas referências holandesas "*Purple Book*" (RIVM, 2005), "*Green Book*" (TNO, 1992) e no *Reference Manual Bevi Risk Assessments* (RIVM, 2009).

2.2.2 Identificação de perigos

De posse das informações obtidas na etapa anterior, referentes à periculosidade das substâncias movimentadas, manipuladas e/ou armazenadas no empreendimento e aos processos a que as mesmas são submetidas, faz-se necessária a identificação das hipóteses acidentais possíveis de ocorrer.

Várias técnicas podem ser empregadas na identificação de perigos de uma dada instalação industrial. Dentre elas, por serem as mais empregadas em Estudos de Análise de Risco, destacam-se a Análise Preliminar de Perigos (APP) e a Análise de Perigos e Operabilidade (HazOp - *Hazard Operations*).

De fato, o HazOp consiste em uma técnica comumente empregada para estudar possíveis desvios e os perigos associados à operabilidade da planta, sendo a APP a técnica mais indicada para identificação de perigos referentes a vazamentos de produtos para a atmosfera, foco do EAR. Entretanto, em casos específicos, tais como de sistemas em que haja grandes transformações químicas de substâncias (caracterizada pela presença de reatores), ou em que haja operações em batelada (processo descontínuo), o HazOp pode ser empregado juntamente com a APP na definição das hipóteses acidentais.

A seguir são apresentadas algumas particularidades das referidas técnicas de identificação de perigos, as quais têm como referência o *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures* (AICHE, 2008).

2.2.2.1 Análise Preliminar de Perigos (APP)

A Análise Preliminar de Perigos (APP) consiste em uma técnica que teve origem no programa de segurança militar do Departamento de Defesa dos Estados Unidos (*U.S. Military Standard System Safety Program Requirements*). Trata-se de um procedimento que tem como objetivo a identificação dos perigos referentes à instalação industrial em análise, os quais podem ser ocasionados por eventos indesejáveis.

De acordo com a referência citada anteriormente, a APP é uma técnica usualmente aplicada durante a fase inicial do projeto, podendo ser bastante útil na tomada de decisões do ponto de vista da segurança da instalação. Entretanto, ela pode ser empregada também, com sucesso, em instalações industriais em operação, permitindo uma análise crítica dos sistemas de segurança existentes (CETESB, 2003) e a identificação das possíveis hipóteses acidentais.

Além da identificação dos perigos, a APP tem como objetivo a categorização das hipóteses acidentais elaboradas de acordo com a criticidade, sendo possível, portanto, que o empreendedor priorize as recomendações e direcione os recursos a serem aplicados na melhoria da segurança dos processos de forma mais eficiente.

No EAR, esta categorização também é utilizada na consolidação das hipóteses acidentais a serem consideradas nas etapas subsequentes do estudo, sendo selecionadas as mais críticas do ponto de vista do risco ao público externo.

2.2.2.2 Análise de Perigos e Operabilidade (HazOp)

A Análise de Perigos e Operabilidade (HazOp) é uma técnica que foi desenvolvida com o objetivo de identificar e avaliar problemas relacionados à operação de uma dada planta industrial, os quais, apesar de não necessariamente consistirem em eventos com potencial risco às comunidades vizinhas, podem comprometer a capacidade da planta em alcançar os seus objetivos de produtividade.

Embora tenha sido uma metodologia desenvolvida com a finalidade de antecipar o conhecimento dos perigos e dos problemas de operabilidade da planta em sua etapa de projeto, o HazOp tem se mostrado, ao longo dos anos, como uma

técnica bastante efetiva também quando aplicada a instalações industriais existentes.

A base do HazOp consiste na utilização de um conjunto de *palavras-guia* focalizando os desvios de parâmetros operacionais (tais como temperatura, pressão, vazão, nível de líquido, etc) estabelecidos para o processo ou para a operação objeto de estudo (CETESB, 2003). Além disso, de forma a facilitar a análise, a planta é dividida em subsistemas (denominados *nós)*, sendo o trabalho realizado, portanto, de forma segmentada.

A Tabela 2.1 a seguir ilustra alguns exemplos de palavras-guia, parâmetros de processo e desvios comumente analisados durante a aplicação da técnica em questão.

Tabela 2.1 Exemplos da aplicação da técnica HazOp (Fonte: CETESB, 2003).

Parâmetro	Palavra-guia	Desvio
Fluxo	Não	Sem fluxo
	Menor	Menos fluxo
	Maior	Mais fluxo
	Reverso	Fluxo reverso
Pressão	Menor	Pressão baixa
	Maior	Pressão alta
Temperatura	Menor	Baixa temperatura
	Maior	Alta temperatura
Nível	Menor	Nível baixo
	Maior	Nível alto

Assim como no caso da APP, para a realização do HazOp é necessária uma equipe multidisciplinar, a qual deve conter, no mínimo, profissionais ligados às áreas de segurança, de processo, de projeto (em caso de instalações novas) e de operação (instalações existentes). Evidentemente, o nível de experiência e de conhecimento dos participantes de ambas as análises é proporcional à qualidade dos resultados que serão obtidos.

2.2.3 Estimativa de efeitos físicos

A etapa de estimativa de efeitos físicos (consequências) e vulnerabilidade tem como objetivo a determinação dos alcances acidentais que podem ser obtidos caso ocorram as hipóteses acidentais que foram selecionadas na etapa de identificação e consolidação.

Além das informações obtidas na etapa de caracterização do empreendimento e da região, tais como a identificação das substâncias, o estado físico e a quantidade em que as mesmas estarão presentes, as variáveis operacionais (pressão, temperatura, vazão, etc), características físicas da planta e os dados meteorológicos, dentre outros, o conhecimento do desdobramento dos fenômenos possíveis de ocorrer após a liberação de produtos tóxicos e/ou inflamáveis na atmosfera em decorrência destas hipóteses é de suma importância para se estimar, de forma adequada, os alcances acidentais.

Esquematicamente, estes fenômenos, denominados tipologias acidentais, são representados nos Estudos de Análise de Riscos por meio das árvores de eventos.

Segundo AICHE (2000), uma árvore de eventos é definida como sendo um modelo gráfico lógico que identifica e quantifica a possibilidade de ocorrência de uma liberação provocada por um dado evento iniciador. Este dispositivo fornece uma visão geral da propagação dos eventos analisados ao longo do tempo, tendo aplicação tanto na análise dos acontecimentos que podem preceder um dado incidente (falha de ações e de sistemas de segurança), quanto das consequências possíveis de ocorrer após o vazamento de uma dada substância.

Desta forma, as árvores relacionadas à análise dos eventos que podem preceder um dado acidente geralmente são utilizadas para se avaliar a eficiência de sistemas de segurança com diversas camadas de proteção. Por sua vez, as árvores com foco nos eventos pós-acidente são utilizadas para identificar as tipologias acidentais, tais como jato de fogo, incêndio em nuvem, explosão, etc, possíveis de ocorrer, bem como direcionar a etapa de quantificação das consequências.

A seguir, nas Figuras 2.2 e 2.3 são apresentadas, respectivamente, exemplos da aplicação de árvores com foco em eventos “pós-incidentes” e “pré-incidentes”.

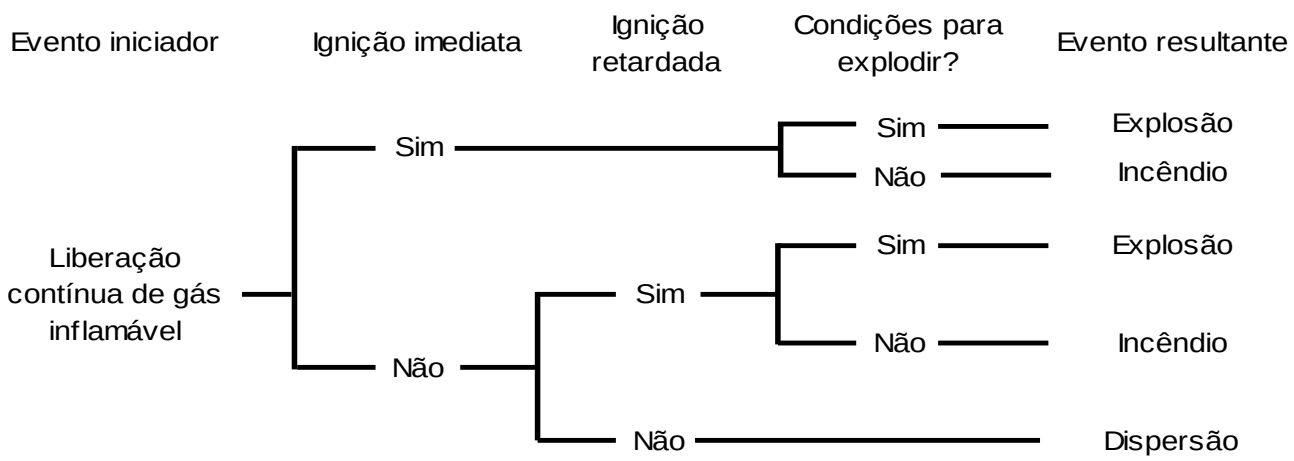


Figura 2.2Árvore de eventos aplicada a ocorrências pós-incidente (AICHE 2000).

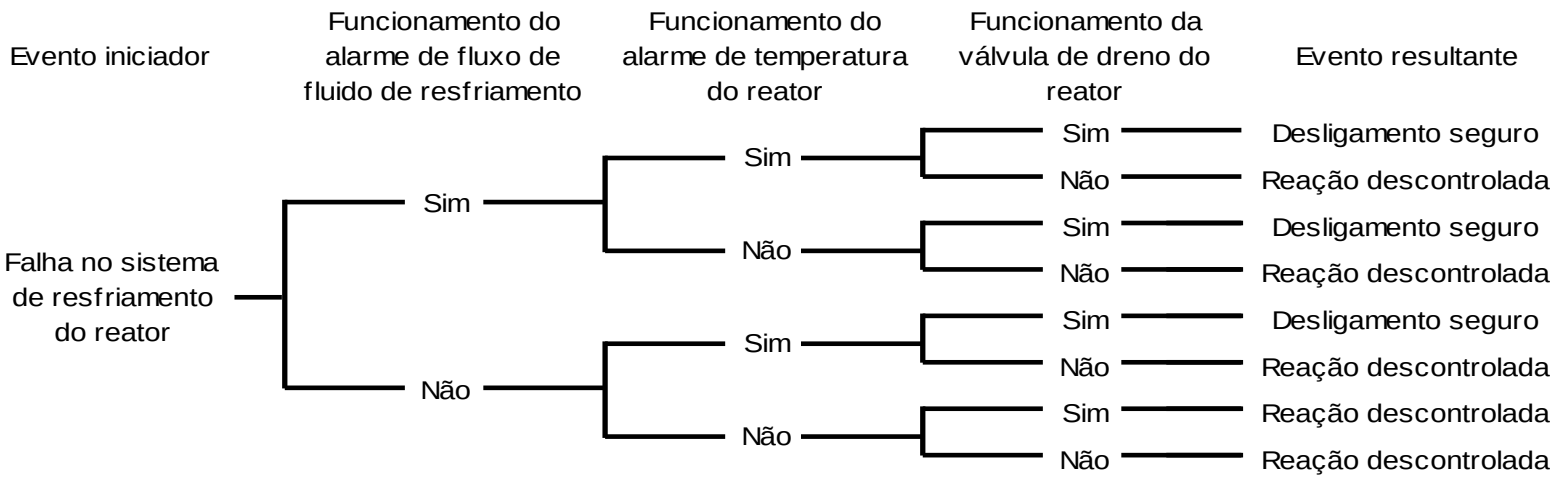


Figura 2.3Árvore de eventos aplicada a ocorrências pré-incidente (AICHE 2000).

Como pode ser evidenciado nas figuras apresentadas acima, as árvores de eventos são construídas, convencionalmente, da esquerda para a direita, tendo como ponto de partida o evento iniciador analisado. Na parte superior são indicados os fatores promotores de perigo (tais como fontes de ignição, direção de vento, condições para ocorrência de explosão, etc) nos casos de análise pós-incidente, ou as funções de segurança pertinentes à análise pré-incidente.

O desdobramento da árvore é feito com base nestes eventos do topo (também denominadas interferências), de tal modo que, para um dado nó, o movimento ascendente indica o sucesso (sim) da ocorrência do respectivo evento de

topo, e o movimento descendente indica o fracasso (não). Além disso, é considerado que as probabilidades de sucesso e fracasso em cada nó são complementares, ou seja, numericamente a soma de ambas é igual à unidade.

Apesar de ambos os tipos de árvores poderem ser aplicados em Estudos de Análise de Riscos, para a definição das tipologias acidentais a serem quantificadas na etapa de estimativa de efeitos físicos, as árvores de eventos referentes a ocorrências pós-incidentes são as mais aplicadas, como pode ser constatado na Figura 2.2.

Conforme está apresentado a seguir, as tipologias acidentais definidas nas árvores de eventos utilizadas nos EARs dependem, basicamente, do estado físico e da periculosidade das substâncias analisadas (inflamável ou tóxica), bem como do tipo de liberação (contínua ou instantânea).

2.2.3.1 Liberações de gases inflamáveis

Gases inflamáveis estão frequentemente presentes nos processos das indústrias químicas. Por serem fluidos facilmente compressíveis, encontram-se na grande maioria dos casos sob pressão em linhas e equipamentos, podendo, em alguns casos, inclusive serem armazenados na forma liquefeita na temperatura ambiente (como é o caso do Gás Liquefeito de Petróleo – GLP).

O vazamento contínuo de um gás pressurizado, em decorrência, por exemplo, do rompimento de uma linha de processo ou de furos em linhas e equipamentos, acarreta na formação de um jato de produto inflamável, o qual, devido à alta velocidade de liberação, arrasta consigo grande quantidade de ar.

Nas proximidades do ponto de vazamento, onde a velocidade do jato é bastante elevada, a influência da velocidade do vento é praticamente desprezível. Entretanto, conforme o observador se afasta da fonte, a velocidade do jato reduz gradativamente, até um ponto em que a velocidade do vento influencia na dispersão do produto na atmosfera.

Em função do arraste de ar provocado pelo jato turbulento, o produto liberado se mistura com o ar, provocando a sua diluição e a formação de uma região em que a mistura ar-produto possui características inflamáveis (ou seja, a região em que as concentrações da substância liberada se encontram entre os limites de inflamabilidade – LII e LSI).

Caso ocorra a ignição imediata do produto, haverá a formação de uma tipologia acidental conhecida como “Jato de Fogo”. Entretanto, caso não ocorra esta ignição, haverá a formação de uma nuvem de produto inflamável.

Se a ignição acontecer após a formação da nuvem (ignição retardada), basicamente duas tipologias acidentais poderão ser geradas: o *flashfire* e a explosão de nuvem de vapor (*VCE – Vapour Cloud Explosion*).

O *flashfire*, ou incêndio em nuvem, é um fenômeno que se caracteriza por provocar efeitos térmicos apenas na região em que a nuvem, anteriormente, possuía características inflamáveis (ou seja, entre os limites de inflamabilidade), sem, contudo, originar danos relacionados à sobrepressão e sem emissão significativa de radiação térmica para as regiões próximas.

A explosão de nuvem de vapor, por sua vez, é um fenômeno diretamente relacionado à quantidade de produto em condições inflamáveis presente na nuvem e ao grau de confinamento da região abrangida por ela, e os danos referentes a esta tipologia são provocados pela emissão de ondas de sobrepressão.

No caso de liberação instantânea, relacionados, por exemplo, a ruptura catastrófica de vasos de processo ou de tanques de armazenamento (tais como um BLEVE – *Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion* - de uma esfera de GLP), as tipologias acidentais relacionadas à ocorrência de ignição retardada da nuvem inflamável são idênticas.

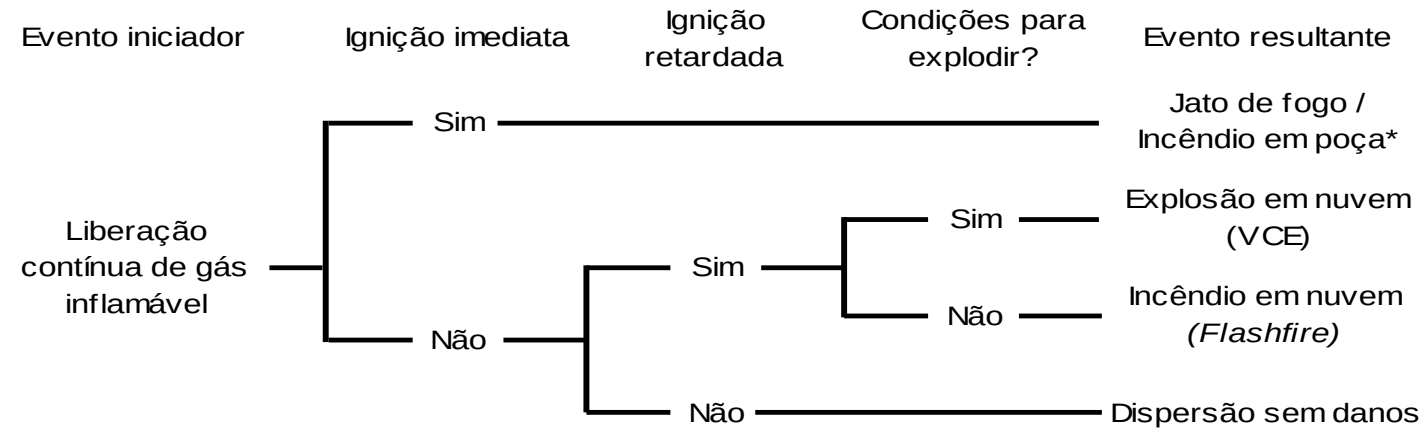
Entretanto, mediante ignição imediata, a liberação instantânea de uma grande quantidade de produto dá origem a uma tipologia conhecida como “Bola de Fogo”, cuja magnitude e duração dependem, basicamente, da massa de produto inflamável liberada.

Com relação aos gases liquefeitos, em função da queda de temperatura provocada pela expansão do gás durante a sua liberação, há a possibilidade de haver a condensação do produto e a formação de uma poça de líquido resfriado.

Em geral, como a temperatura ambiente e a temperatura do solo são muito superiores à temperatura da poça, haverá um significativo gradiente de temperatura que funcionará como força motriz para a gradativa evaporação do produto. A massa evaporada contribuirá para a formação da nuvem inflamável, juntamente com a parcela da massa liberada na forma de vapor e que não condensou.

Entretanto, caso haja ignição imediatamente após a formação da poça, uma nova tipologia acidental pode ser formada, denominada incêndio em poça.

As Figuras 2.4 e 2.5 apresentadas a seguir mostram, respectivamente, as árvores de eventos que resumem as tipologias acidentais para liberações contínuas e instantâneas de gases inflamáveis.



* Obs.: Incêndio em poça é aplicável apenas a gases liquefeitos.

Figura 2.4 Árvore de eventos para liberações contínuas de gases inflamáveis.

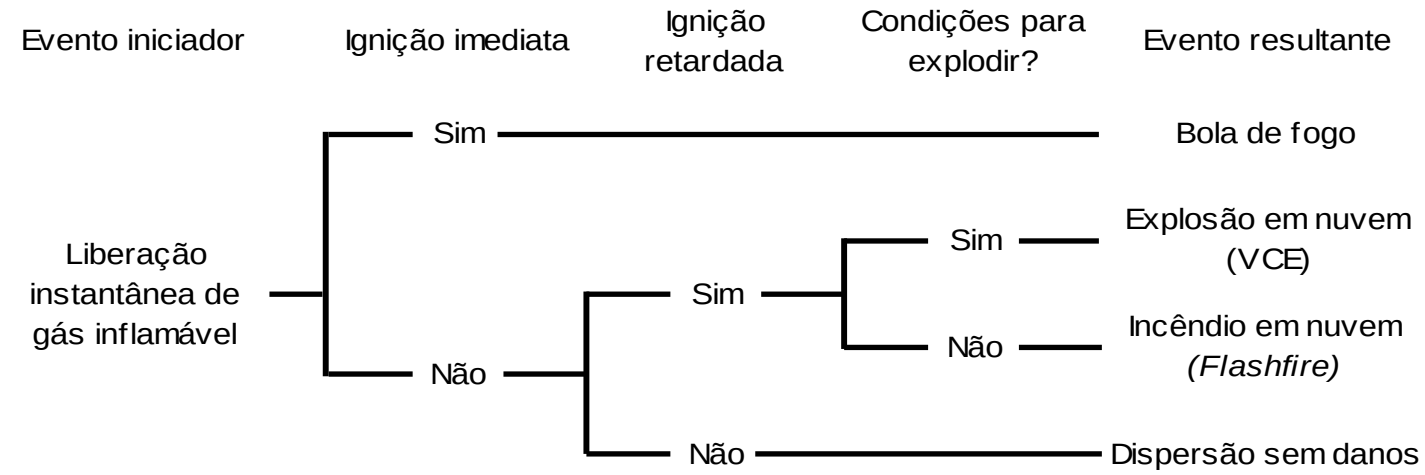


Figura 2.5 Árvore de eventos para liberações instantâneas de gases inflamáveis.

2.2.3.2 Liberações de líquidos inflamáveis

No caso dos líquidos inflamáveis, após a liberação o líquido se espalhará na superfície dando origem a uma poça de produto. As dimensões desta poça dependerão, basicamente, da taxa de liberação de produto por unidade de tempo (alimentação), das propriedades do solo (como, por exemplo, sua difusividade

térmica), da volatilidade da substância e da presença de obstáculos que possam vir a limitar o seu tamanho, tais como diques de contenção.

Caso ocorra a ignição imediata do produto, haverá a formação de uma tipologia acidental conhecida como “Incêndio em poça”, a qual gradativamente consumirá o produto inflamável.

Entretanto, se a ignição não acontecer imediatamente após o início do vazamento, o processo de espalhamento do produto no solo continuará a ocorrer. Neste processo, os gradientes de temperatura e/ou de potencial químico existentes entre a superfície da poça e o ar tenderão a fazer com que o produto evapore para a atmosfera. A taxa de evaporação dependerá da área da poça, da troca térmica entre produto, ar e solo, da velocidade do vento, do tipo de superfície em que houve o espalhamento e, evidentemente, da volatilidade da substância em questão.

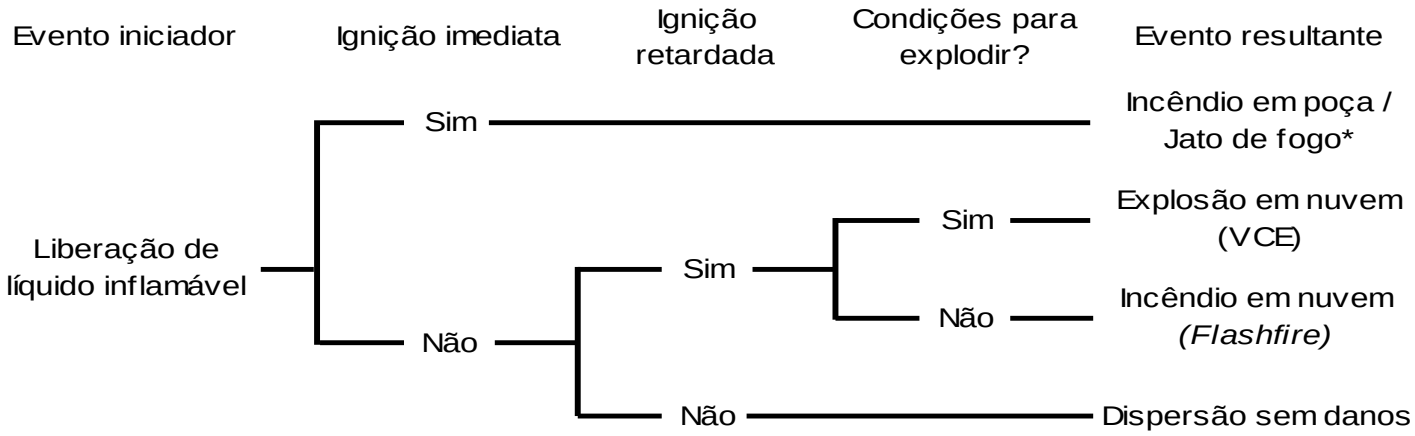
Assim como no caso das poças de gases liquefeitos, a massa evaporada dará origem a uma nuvem de produto, a qual, em função da mistura com o ar atmosférico, poderá originar uma região em que as concentrações da substância terão características inflamáveis.

Uma vez formada a nuvem em condições de inflamabilidade, as tipologias acidentais que poderão se originar em função da ocorrência da ignição retardada da nuvem são as mesmas que são possíveis para gases inflamáveis: “Incêndio em nuvem” (*flashfire*) e “explosão” (VCE).

Caso a substância analisada seja muito volátil, e, nas condições de processo, o mesmo esteja no estado bifásico, parte do líquido inflamável será liberado no estado vapor. Dependendo da pressão de liberação e da fração de produto vaporizada, há a possibilidade da formação da tipologia “Jato de fogo”, mediante a ocorrência de uma fonte de ignição imediata.

Não havendo a ignição imediata do produto, a massa liberada na fase vapor contribuirá, juntamente com a massa evaporada a partir da poça, para a formação da nuvem inflamável.

A Figura 2.6 mostra a árvore de eventos que resume as tipologias acidentais possíveis de ocorrer para liberações de líquidos inflamáveis.



* Obs.: Jato de fogo é aplicável apenas a líquidos muito voláteis, dependendo das condições de processo.

Figura 2.6 Árvore de eventos para liberações de líquidos inflamáveis.

2.2.3.3 Liberações de produtos tóxicos

Os fenômenos que ocorrem logo após a liberação de produtos tóxicos na atmosfera são semelhantes aos que acontecem no caso de produtos inflamáveis.

No caso de vazamentos contínuos de gases, também haverá a formação de um jato turbulento de produto para a atmosfera, enquanto que, para os líquidos, o produto também será liberado para o ambiente tendo como origem a evaporação da poça e/ou a liberação de uma fração vaporizada de produto (líquidos muito voláteis). Por fim, para vazamentos instantâneos de gases, também se terá uma liberação abrupta de grande quantidade de substância para o ar atmosférico.

Em todos os casos, a tipologia acidental que será originada é a “dispersão de nuvem tóxica”, cujo comportamento dependerá, principalmente, das características meteorológicas da região (velocidade e direções do vento, temperatura, etc), da natureza da liberação (liberação contínua ou instantânea) e da presença de obstáculos no caminho a ser percorrido pela nuvem.

À medida que a nuvem tóxica se desloca, ao longo do tempo e da distância ocorrerá a gradativa diluição da nuvem em função da movimentação do ar na atmosfera. O dano a ser provocado às pessoas pela inalação do produto dependerá da dose absorvida, a qual é função da concentração e do tempo de exposição.

Após a identificação das tipologias acidentais, o próximo passo é realizar a modelagem matemática destes fenômenos, resultando, por fim, nos valores dos alcances de dano.

A etapa inicial da quantificação diz respeito à modelagem do termo fonte, através da qual será definida a quantidade de produto liberada, bem como a taxa de liberação desta massa no tempo (taxa de vazamento). A estimativa adequada destes parâmetros é essencial, pois os mesmos estão intimamente relacionados com os alcances a serem obtidos posteriormente.

Basicamente, são consideradas liberações a partir de furos em vasos/tanques ou em linhas, bem como rupturas catastróficas destes equipamentos. No caso da ruptura catastrófica de vasos/tanques, considera-se que toda a massa será liberada instantaneamente, enquanto que a ruptura catastrófica de linhas equivale à analogia de um corte “em guilhotina” na mesma, de tal forma que a massa de produto é liberada continuamente através de um orifício cuja área equivale à área transversal da tubulação.

Em todos os casos, as equações que serão utilizadas para o cálculo da taxa de vazamento terão como fundamento a equação do balanço da energia mecânica, apresentada abaixo:

$$\int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{\rho} + \frac{g}{g_c}\left(z_2 - z_1\right) + \frac{1}{2g_c}\left(v_2^2 - v_1^2\right) + \sum e_f + \frac{\dot{W}s}{\dot{m}} = 0 \quad , \tag{2.3}$$

Nesta equação, cada um dos termos remete, respectivamente (da esquerda para a direita), as parcelas referentes à energia associada à pressão do fluido, à energia potencial gravitacional, à energia cinética, à parcela da energia perdida por perda de carga (atrito), e à energia absorvida ou cedida pelo fluido em função de trabalho de eixo exercido sobre o fluido, ou por ele executado.

Dependendo do evento e do estado físico do produto analisado (líquido, gasoso ou bifásico), premissas serão estabelecidas para o cálculo de cada um dos termos da equação 2.3. Em alguns casos, como, por exemplo, para escoamento bifásico, em que a complexidade do fenômeno inviabiliza a aplicação de expressões analíticas para solução do problema, equações empíricas geralmente são utilizadas.

2.2.3.4 Termos fonte para liberações de líquidos

No caso de líquidos, pelo fato de haver a premissa de que os mesmos se comportam como fluidos incompressíveis ($\frac{dv}{dP}=0$), premissa esta válida para a grande maioria dos casos presentes na indústria (desde que não próximo ao ponto crítico), a manipulação da equação 2.3 se torna razoavelmente simples, residindo no termo de perda de carga a maior dificuldade para resolução da referida equação.

No entanto, de forma a facilitar análise, introduz-se o conceito de coeficiente de descarga (C_D), cuja definição matemática (equação 2.4) é a razão entre a vazão real referente a uma dada liberação e a vazão ideal que seria liberada, caso não houvesse efeitos de atrito no processo (ou seja, perda de carga).

$$C_D = \frac{\dot{V}_{REAL}}{\dot{V}_{IDEAL}}, \tag{2.4}$$

De posse das equações anteriores, o primeiro caso a ser analisado se refere à liberação de um líquido estocado em um dado vaso ou tanque a partir de um furo nestes equipamentos, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 2.7.

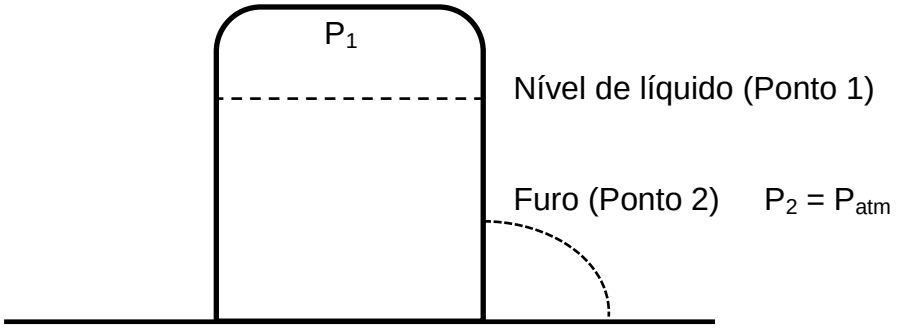


Figura 2.7 Desenho esquemático de um furo em um tanque de armazenamento.

Para este caso genérico, o cálculo da vazão ideal por meio da equação 2.3, assumindo que a velocidade de descida do nível do tanque em função do vazamento é desprezível (v_1) e desconsiderando as parcelas referentes aos efeitos de atrito entre o fluido e a parede do recipiente e ao trabalho de eixo, resume-se a:

$$V_{IDEAL} = v_2 . A = A\sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} + g(z_1 - z_2)}, \quad (2.5)$$

Utilizando as definições de vazão mássica $\dot{m} = \dot{V} / \rho$ e de vazão real $V_{REAL} = v.A$ juntamente com as equações 2.4 e 2.5, obtém-se a equação utilizada para cálculo de taxa de vazamento referente a líquidos:

$$\dot{m} = C_D A \rho \sqrt{2\left[\frac{(P_1 - P_2)}{\rho} + g(z_1 - z_2)\right]}, \quad (2.6)$$

De forma geral, o primeiro termo no interior do radical, referente à diferença de pressão entre o interior do vaso/tanque e o ambiente, é muito superior ao segundo termo, de tal forma que a aproximação de se desprezar a diferença de cota entre o local do vazamento e o nível do tanque é aceitável. Esta simplificação resulta na equação 2.7, comumente apresentada na literatura:

$$\dot{m} = C_D A \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)}, \quad (2.7)$$

É importante destacar que o valor do coeficiente de descarga, neste caso, varia de acordo com o formato do furo. Segundo AICHE (2000), para orifícios com formato irregular e escoamento cujo número de Reynolds seja superior a 30.000, o coeficiente de descarga se aproxima do valor de 0,61 (o qual é, inclusive, utilizado como referência em diversos *softwares* para cálculo de taxa de vazamento).

Entretanto, quanto mais o furo se aproximar do formato circular, mais o coeficiente de descarga se aproxima da unidade. Para casos em que não se conhece o valor de C_D, conservativamente pode-se utilizar o valor igual a um, maximizando-se a taxa de vazamento.

Analogamente, para vazamentos referentes a furos ou a ruptura de linhas, as equações 2.6 e 2.7 também são aplicáveis, mudando apenas a forma de se determinar o coeficiente de descarga.

Neste caso, o valor de C_D é dado por:

$$C_D = \frac{1}{\sqrt{1+\sum K_f}}, \tag{2.8}$$

Em que o termo K_f computa não só as perdas de carga no orifício, mas também em toda linha, considerando inclusive os acessórios presentes na tubulação (juntas, válvulas, joelhos, etc).

2.2.3.5 Termos fonte para liberações de gases

O mesmo tratamento dado para a equação 2.3 não pode ser assumido para o caso dos gases, uma vez a densidade deste tipo de fluido não pode ser considerada constante mediante variação da pressão.

Desta forma, o primeiro termo da referida equação precisa ser integrado para se obter a expressão da taxa de vazamento. Assumindo, para fins de simplificação, a equação de estado de gás ideal e que o comportamento do vazamento de gases por um orifício em um vaso/tanque segue o caminho isentrópico (ou seja, adiabático e reversível), a expressão resultante é, segundo AICHE (2000):

$$\dot{m} = C_D A P_1 \sqrt{\frac{2M}{RT_1}\frac{k}{k-1}\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{2/k} - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k}\right]}, \tag{2.9}$$

Em que as variáveis com índice “1” se referem ao interior do vaso/tanque; com índice “2” se referem às condições atmosféricas (exterior); M se refere à massa molar do gás; R à constante universal dos gases ideais; e k é a razão entre as capacidades caloríficas a pressão constante e a volume constante do gás ($k = C_p/C_v$).

Entretanto, a equação acima não é aplicável para quaisquer valores de P_1 e P_2. No caso do escoamento compressível, há um limite para a velocidade de saída do gás através do orifício, ou seja, a partir de uma dada diferença de pressão ($\Delta P = P_1 - P_2$) entre o interior e o exterior do vaso/tanque, a velocidade de saída do gás permanece constante.

Para este tipo de escoamento, denominado “crítico” (*choked*), a velocidade de saída do gás é igual à velocidade do som (Mach = 1) e a taxa de vazamento é dada por:

$$\dot{m}_{choked} = C_D A P_1 \sqrt{\frac{kM}{RT_1}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1)/(k-1)}} \quad , \tag{2.10}$$

A razão entre a pressão externa P_{choked} e a pressão interna P_1 que define o intervalo em que escoamento passa a ser crítico é dada pela seguinte expressão:

$$\frac{P_{choked}}{P_1} = \sqrt{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)}} \quad , \tag{2.11}$$

Ou seja, para uma dada pressão interna do recipiente P_1, o vazamento através do furo será crítico quando a pressão externa P_2 for menor ou igual à pressão P_{choked}.

De forma análoga, para uma dada pressão externa P_2, pode-se utilizar a mesma equação 2.11 para se definir a pressão interna P_1 acima da qual o escoamento será crítico. Basta igualar P_2 a P_{choked} na equação acima.

Segundo o "*Yellow Book"* (TNO, 2005) a grande maioria dos gases possuem valores de *k* variando entre 1,1 e 1,4, o que resulta num valor de P_{choked} / P_1 aproximadamente igual a 0,5. Logo, basta que a pressão interna seja cerca de 2 vezes maior que a pressão externa para que o escoamento, inicialmente, seja crítico.

Além disso, ressalta-se que os valores de C_D sugeridos para vazamentos de líquidos em furos também são válidos para este caso, evidenciando que o coeficiente de descarga é função do formato do furo.

No caso de liberações de gás a partir de furos em uma tubulação ou da ruptura da mesma, diferentemente do caso de vazamentos em furos em vasos/tanques, a premissa de que a expansão será adiabática não é direta, pois haverá a possibilidade de troca de calor ao longo da linha entre o gás e a parede da tubulação.

O trabalho realizado por Levenspiel (1984, apud AICHE 2000) mostrou que, comparando-se os modelos de expansão adiabática e de expansão isotérmica de gases a partir de tubulações, os resultados experimentais para a taxa de vazamento se situam entre os valores previstos por estes modelos. Em todos os casos analisados, os resultados sempre se apresentaram menores que os valores

previstos para o modelo adiabático, e maiores que os valores obtidos pelo modelo isotérmico.

Assim sendo, a estimativa obtida pelo modelo adiabático é conservativa, levando autores, tais como CRANE (1986, apud AICHE 2000) a adotarem este modelo como referência.

Neste contexto, Crane desenvolveu o seguinte modelo (Fórmula de Darcy) para determinação da taxa de vazamento de gases em tubulações, tanto para escoamento subsônico quanto sônico (crítico), a partir da equação de estado de gás ideal:

$$\dot{m} = YA\sqrt{\frac{2\rho_1(P_1 - P_2)}{\sum K_f}}\,, \tag{2.12}$$

De maneira semelhante ao que foi considerado no caso de líquidos, o termo K_f computa não só as perdas de carga no orifício, mas também em toda linha, considerando inclusive os acessórios presentes na tubulação.

Para a determinação do fator de expansão do gás “Y”, é utilizado o modelo de expansão adiabática desenvolvido por CROWL *et al* (1990, apud AICHE 2000), conforme apresentado a seguir.

O primeiro passo consiste na determinação do número de Mach através de um método iterativo utilizando-se as seguintes equações:

$$\frac{k+1}{2}\ln\left[\frac{2Y_1}{(k+1)Ma^2}\right] - \left(\frac{1}{Ma^2} - 1\right) + k\sum K_f = 0\,, \tag{2.13}$$

$$\frac{P_1 - P_2}{P_1} = 1 - Ma\sqrt{\frac{2Y_1}{k+1}}\,, \tag{2.14}$$

Para a determinação da pressão externa abaixo da qual o escoamento é sônico (P_{choked}), basta igualar o número de Mach à unidade (Ma = 1).

Para Mach < 1, o escoamento é subsônico e o valor de P_2 é igual à pressão externa.

Por fim, determina-se o fator Y de expansão do gás através da equação 2.15.

$$Y = Ma\sqrt{\frac{k\sum K_f}{2}\left(\frac{P_1}{P_1 - P_2}\right)}, \tag{2.15}$$

2.2.3.6 Termos fonte para liberações bifásicas

No que tange a liberações bifásicas, a possibilidade de ocorrência do flasheamento do produto durante o vazamento torna a análise um pouco mais complexa.

O caso mais simples reside na situação em que há a ocorrência de um furo em um vaso/tanque nas proximidades do nível de líquido saturado, o qual se encontra em equilíbrio com o seu respectivo espaço vapor, conforme representado pelo ponto 2 na Figura 2.8.

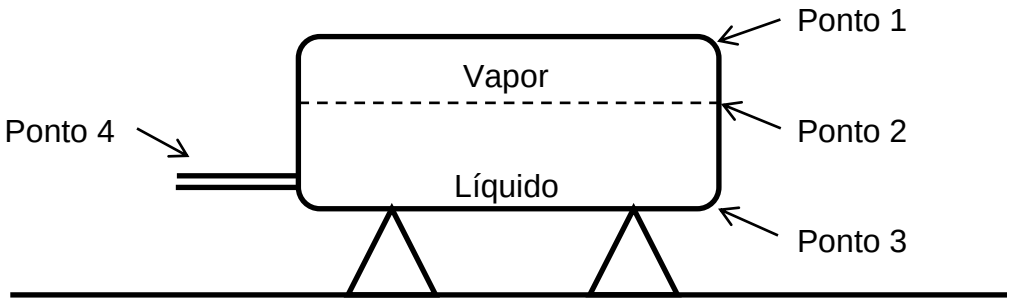


Figura 2.8 Desenho esquemático representando furos em um vaso/tanque bifásico.

Para o ponto 2, a equação que quantifica a taxa de vazamento, segundo o "*Yellow Book*" (TNO, 2005), é semelhante àquela aplicada a vazamento líquidos (equação 2.7):

$$\dot{m} = C_D A\sqrt{2\rho_M\left(P_1 - P_2\right)}, \tag{2.16}$$

Em que o termo ρ_M se refere à densidade da mistura bifásica liberada. Esta grandeza é definida por meio da seguinte relação:

$$\rho_M = \frac{1}{\frac{\phi_m}{\rho_V} + \frac{1-\left(\phi_m\right)}{\rho_L}}, \tag{2.17}$$

Por sua vez, os termos ϕ_m,ρ_V e ρ_L representam, respectivamente, a fração mássica de vapor e as densidades do vapor e do líquido na mistura.

Para liberações representadas pelo ponto 1, referentes a furos no espaço vapor, a taxa de liberação é calculada utilizando as equações 2.9 ou 2.10, definidas para liberações de gases.

Da mesma forma, para furos na região do ponto 3, as equações 2.6 e 2.7, definidas para líquidos, são aplicadas.

Com relação a vazamentos a partir de linhas de processo (ponto 4), o fenômeno do flasheamento durante a liberação do produto pode ocorrer. Neste caso, é necessário fazer duas considerações.

Se o líquido presente na tubulação estiver subresfriado ($P > P_{sat}$), a pressão no ponto de liberação será igual à pressão de saturação do produto à temperatura ambiente, e o mesmo sofrerá o *flash* no bocal de saída. Entretanto, se o produto dentro do vaso/tanque que alimenta a linha analisada estiver saturado, não necessariamente o flasheamento ocorrerá no bocal de saída, conforme será explicado adiante.

Para ambos os casos (líquido saturado ou líquido subresfriado), a equação utilizada para determinação da taxa de vazamento é dada pela seguinte equação elaborada por FAUSKE *et al* (1987, apud AICHE 2000):

$$\dot{m} = A\sqrt{G_{sub}^2 + \frac{G_{eq}^2}{N}}\ , \tag{2.18}$$

Em que A é a área de saída do fluido, N é o parâmetro de “não-equilíbrio”, e G_{sub} e G_{eq} são, respectivamente, as taxas de vazamento subresfriado e de vazamento em equilíbrio.

Os termos da equação 2.18 são calculados da seguinte forma:

$$G_{sub} = C_D\sqrt{2\rho_1\left(P_1 - P_{sat}\right)}\ , \tag{2.19}$$

$$G_{eq} = \frac{h_{vap}}{v_{vap}}\sqrt{\frac{1}{T_1 C_p}}\ , \tag{2.20}$$

$$N = \frac{h_{vap}^2}{2\Delta P\rho_1 C_D^2 v_{vap}^2 T_1 C_p} + \frac{L}{L_c}\ \text{, válida para } 0 \le L \le L_c \tag{2.21}$$

Em que:

h_{vap} Entalpia de vaporização do produto.

v_{vap} Diferença entre os volumes específicos do vapor e do líquido saturados.

C_p Capacidade calorífica do líquido.

L Comprimento da tubulação do tanque até o ponto de vazamento.

L_c Comprimento de equilíbrio, usualmente igual a 0,1 m (10 cm).

Ressalta-se que todos os termos das equações 2.19, 2.20 e 2.21 são calculados nas condições de estocagem do produto.

Assim sendo, para líquidos subresfriados, G_{eq} = 0 e a expressão para determinação da taxa de vazamento é:

$$\dot{m} = C_D A \sqrt{2\rho_1 (P_1 - P_{sat})}, \tag{2.22}$$

Entretanto, tratando-se de líquidos saturados (G_{sub} = 0), foi observado experimentalmente pelos autores citados que o flasheamento ocorre apenas se L > $L_{c.}$ Para este caso, o escoamento é dito estar em equilíbrio (N = 1) e a taxa de vazamento é dada por:

$$\dot{m} = A \frac{h_{vap}}{v_{vap}} \sqrt{\frac{1}{T_1 C_p}}, \tag{2.23}$$

Para vazamentos em distâncias muito próximas do vaso/tanque (ou seja, L < L_c), é prevista uma situação de não-equilíbrio na qual não há tempo suficiente para ocorrer o flasheamento durante a liberação do produto pela tubulação – o flasheamento ocorrerá no meio externo, após a saída do mesmo do furo. A taxa de vazamento é calculada utilizando o fator de não equilíbrio N, conforme indicado abaixo:

$$\dot{m} = \frac{A G_{eq}}{\sqrt{N}}, \tag{2.24}$$

Por fim, no caso de ruptura catastrófica de vasos/tanques, independente do estado físico em que se encontre do produto, para efeitos de cálculo é assumido que toda a massa presente nos recipientes será liberada instantaneamente, não sendo pertinente, portanto, o cálculo a taxa de vazamento.

É importante ressaltar que as equações apresentadas anteriormente para cálculo das taxas de vazamento referentes aos diversos casos analisados partem da premissa de que as condições internas dos vasos/tanques e das linhas permanecerão constantes durante o vazamento. Esta aproximação é válida apenas quando se estiver estudando equipamentos de grande porte, cujo inventário é muito maior do que a massa a ser vazada.

Para os casos em que esta premissa não for verdadeira, é necessário aplicar integração no tempo de balanços dinâmicos de massa e energia, conjugados a equilíbrio de fases no inventário (se houver possibilidade de duas ou mais fases), para determinar o comportamento temporal das variáveis de estado do sistema durante a liberação. Destarte, será obtida não somente uma taxa de vazamento, mas sim uma curva de como esta taxa se comporta no tempo em função da gradativa liberação de massa. Em geral, *softwares* comerciais utilizam rotinas iterativas para obtenção deste tipo de resultado.

De posse da taxa de vazamento para o caso das liberações contínuas ou da massa total liberada no caso das liberações instantâneas, é possível quantificar os alcances acidentais pertinentes a cada tipologia acidental.

A seguir são apresentadas considerações a respeito dos procedimentos de cálculo dos alcances para cada uma das tipologias identificadas anteriormente.

2.2.3.7 Incêndio em nuvem e dispersão de nuvem tóxica

Os alcances referentes a estas duas tipologias acidentais são obtidos por meio de cálculos de dispersão de substâncias químicas na atmosfera, cujo interesse é se determinar concentrações ao longo do tempo e ao longo da distância, no nível do solo (onde se encontram as pessoas que podem ser atingidas).

No caso do incêndio em nuvem, o interesse reside na determinação da máxima distância atingida pela concentração referente ao limite inferior de inflamabilidade do produto (LII). No caso da nuvem tóxica, há o interesse em se calcular o alcance referente a um específico valor de dose a que um observador

pode ser submetido em função da concentração de produto e do tempo de exposição.

Para a determinação destas concentrações em função da posição e do tempo, são conhecidos dois tipos de modelos de dispersão, cujas aplicações dependem basicamente da razão entre a densidade do produto (gás ou vapor) após o vazamento e a densidade do ar.

O primeiro tipo, representado pelos modelos de dispersão gaussiana, descrevem bem o comportamento tanto de liberações contínuas (plumas) quanto de liberações instantâneas (“puffs”) de gases neutros (densidade próxima da densidade do ar) e de gases leves.

Para os gases de maior densidade, cujos comportamentos na atmosfera diferem significativamente dos comportamentos dos demais gases citados acima, foram desenvolvidos os modelos de gás denso. É importante ressaltar que este segundo tipo de modelo pode ser aplicado tanto a gases de alto peso molecular, como também a gases neutros e leves a baixas temperaturas (resfriados), desde que sua densidade, ao se dispersar, seja maior que a do ar.

2.2.3.7.1 Dispersão gaussiana (gases leves e neutros)

A modelagem da dispersão gaussiana tem como base a resolução da equação diferencial da continuidade, considerando como mecanismo predominante de transferência de massa a velocidade do vento.

Assim como qualquer equação de balanço, a equação da continuidade possui um termo de acúmulo, geralmente representado por um termo diferencial de primeira ordem no tempo; termos que contabilizam a diferença de entrada e de saída de uma dada grandeza analisada; e um termo de geração desta grandeza, caso haja.

A Figura 2.9 apresenta um elemento de volume de ar atmosférico hipotético através do qual se considera que uma dada substância com concentração C se dispersa. Este elemento será utilizado para dedução da equação de balanço de massa pertinente a este problema específico.

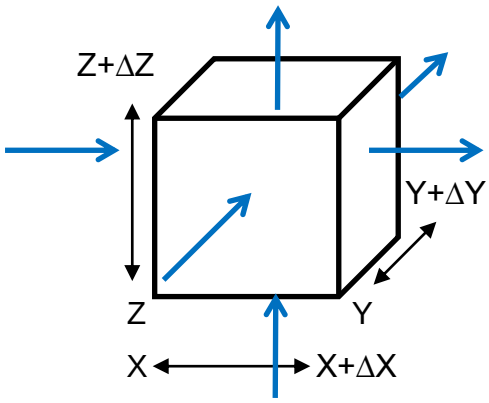


Figura 2.9 Elemento de volume utilizado para dedução da equação de balanço.

Considerando que as setas azuis representadas na figura representam os fluxos de massa J_i na direção da coordenada "i" que atravessam as áreas transversais $\Delta j \Delta k$, o balanço resultante é:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\Delta V.C) = \Delta x \Delta y.J_z\Big|_{z+\Delta z} - \Delta x \Delta y.J_z\Big|_{z} + \Delta x \Delta z.J_y\Big|_{y+\Delta y} - \Delta x \Delta z.J_y\Big|_{y} + \Delta z \Delta y.J_x\Big|_{x+\Delta x} - \Delta z \Delta y.J_x\Big|_{x}, \quad (2.25)$$

Dividindo ambos os lados pelo elemento de volume ΔV, tirando os limites das diferenças do lado direito da equação fazendo Δx, Δy e Δz tenderem a zero, tem-se:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\left(\frac{\partial J_z}{\partial z} + \frac{\partial J_y}{\partial_y} + \frac{\partial J_x}{\partial_x}\right), \quad (2.26)$$

Além disso, como o mecanismo de transferência de massa neste caso é o vento, os fluxos J_i podem ser substituídos por $v_i.C$, sendo v_i a velocidade do vento na direção "i" e C a concentração do produto no elemento de volume. Desta forma, obtém-se a equação da continuidade apresentada por AICHE (2000):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(v_x.C) + \frac{\partial}{\partial y}(v_y.C) + \frac{\partial}{\partial z}(v_z.C) = 0, \quad (2.27)$$

Aparentemente simples, a equação acima apresenta uma relevante dificuldade para ser resolvida analiticamente, uma vez que é impossível prever o comportamento do vetor velocidade $v = (v_x, v_y, v_z)$ em cada ponto da atmosfera.

A solução, primeiramente proposta por SUTTON (1953, apud AICHE 2000), teve como base a premissa de tratar a concentração como sendo uma variável normal aleatória, a qual apresenta desvios padrões σ_x, σ_y e σ_z na direção do vento

(*downwind*), na direção transversal ao vento (*crosswind*) e na vertical (x,y,z), respectivamente. Estes desvios padrões, denominados “coeficientes de dispersão”, são funções das condições atmosféricas, da região (presença de obstáculos) e da distância *downwind* em relação à fonte de liberação (AICHE, 2000).

Esta abordagem consiste no alicerce do modelo Pasquill-Gifford, o qual é amplamente utilizado para análise de dispersão gaussiana de gases neutros e leves na atmosfera e cuja denominação se refere aos respectivos autores.

De acordo com este modelo, para liberações instantâneas foi definida a seguinte equação para quantificação da concentração média C em um dado ponto (x,y,z) e em um dado tempo t:

$$C(x,y,z,t)=\frac{M}{(2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z}\exp.\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-vt}{\sigma_x}\right)^2\right]\exp.\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]\left\{\exp.\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right]+\exp.\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right]\right\}, \quad (2.28)$$

Em que:

M Massa total liberada no vazamento instantâneo.

H Altura em relação ao solo na qual a massa M foi liberada na atmosfera.

v Velocidade média do vento na direção x (*downwind*).

No caso da liberação contínua, cuja equação será apresentada a seguir, presume-se que a dispersão da substância seja feita em regime permanente, implicando, portanto, que o valor da concentração não depende da variável tempo. Desta forma, a expressão utilizada para a concentração média C em um dado ponto (x,y,z) consiste em:

$$C(x,y,z)=\frac{\dot{m}}{2\pi\sigma_y\sigma_z v}\exp.\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]\left\{\exp.\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right]+\exp.\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right]\right\}, \quad (2.29)$$

Em que:

m Taxa de vazamento.

H Altura em relação ao solo na qual o produto é continuamente liberado.

v Velocidade média do vento na direção x (*downwind*).

Em ambos os casos, tanto a taxa de vazamento para liberações contínuas quanto a massa total vazada M para liberações instantâneas são determinadas de acordo com os respectivos termos fonte. Já a altura do vazamento H é específica

para cada hipótese acidental analisada, sendo obtida através da etapa de caracterização do empreendimento. Por sua vez, a velocidade média do vento é obtida por meio da caracterização da região.

2.2.3.7.2 Dispersão de gases densos

O comportamento dos gases densos quando se dispersam na atmosfera é muito diferente do comportamento previsto pelos modelos de dispersão de gases neutros. Além do vento, outros fatores também influenciam consideravelmente o processo da dispersão, tais como a gravidade e o mecanismo de entrada de ar na nuvem.

De acordo com o *Yellow Book* (TNO, 2005), o fenômeno da dispersão de gases densos pode ser analisado em quatro etapas distintas. A etapa inicial é basicamente função das condições em que o produto foi liberado, ou seja, é fortemente influenciada pelo termo fonte. Desta forma, são relevantes, portanto, se a liberação é contínua ou instantânea, a direção em que a mesma ocorre, a taxa de vazamento etc.

Após a formação inicial da nuvem ao nível do solo, ocorre a etapa de espalhamento gravitacional. O gradiente de densidade existente induz a expansão da nuvem na direção horizontal, dando origem a fluxos radiais de produto no seu interior (o que provoca, portanto, uma redução da altura da nuvem). Neste momento, a força motriz de tais fluxos é apenas o gradiente de densidade, independente da velocidade do vento no local.

Estes fluxos de produto dão origem a vórtex nas extremidades da nuvem (frente gravitacional, Figura 2.10), os quais, juntamente com a turbulência atmosférica, promoverão o processo de diluição da nuvem. A entrada de ar, em contrapartida, induzirá o aumento da altura da nuvem.

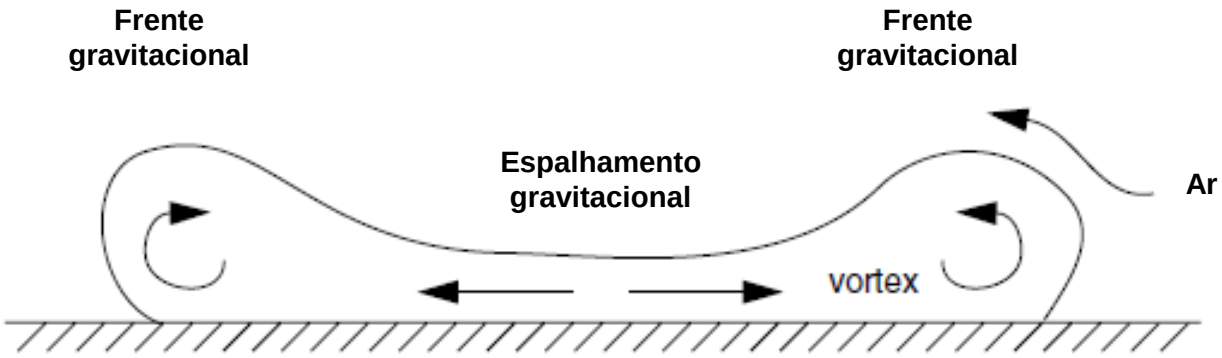


Figura 2.10 Formação de vórtex durante o espalhamento gravitacional – gás denso. Fonte: *Yellow Book*, TNO (2005).

Finalmente, à medida que a nuvem se dilui ao longo do tempo, a influência da turbulência atmosférica se sobrepõe aos efeitos das forças gravitacionais, passando a nuvem a exibir um comportamento gaussiano típico.

Devido à complexidade do fenômeno, o mesmo não pode ser descrito apenas pela equação da continuidade. Por estarem presentes também efeitos gravitacionais, os modelos referentes à dispersão de gases densos devem, adicionalmente, prever considerações a respeito da influência do gradiente de densidade. Além disso, nos casos em que se esteja tratando de gases densos resfriados, os efeitos térmicos também são relevantes, uma vez que o gás se aquece à medida que se dispersa.

Basicamente há três tipos de modelo que são utilizados para análise de dispersão de gases densos. Os modelos fenomenológicos, tais como os modelos desenvolvidos por BRITTER *et al* (1988), têm como base equações empíricas desenvolvidas através da observação da dispersão em escala de laboratório, ou em campos de teste, ou em ambos.

Também denominados modelos dimensionais, eles buscam descrever o comportamento do gás denso durante a dispersão através de nomogramas que correlacionam grupos adimensionais relevantes na ocorrência do fenômeno. A título de ilustração, na Figura 2.11 são apresentados nomogramas utilizados no modelo desenvolvido Britter e McQuaid para determinação da concentração média C_m em um dado ponto x na direção *downwind* para liberações contínuas (plumas) e instantâneas (“puffs”).

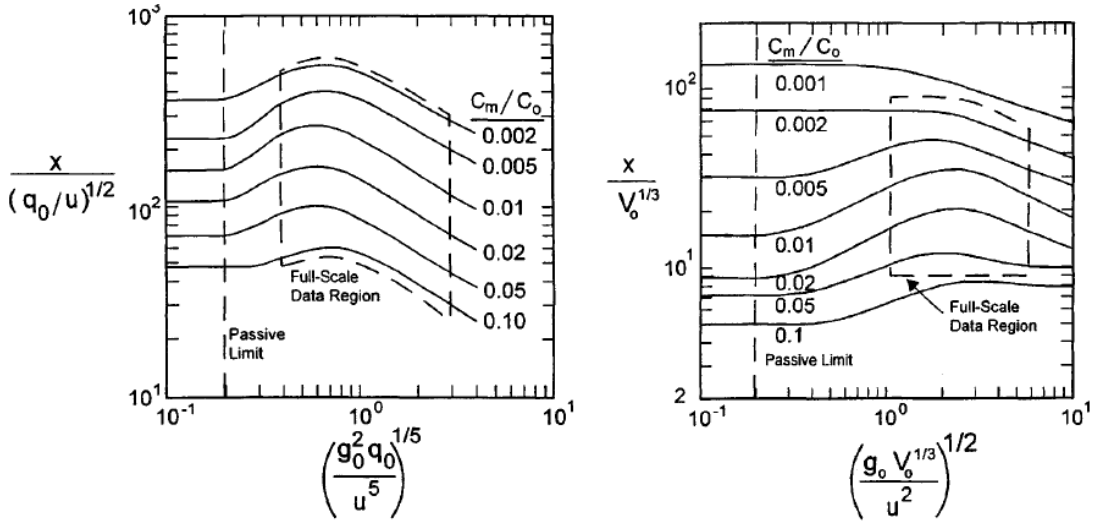


Figura 2.11 Nomogramas para liberações contínuas e instantâneas, respectivamente. Fonte: AICHE (2000).

As grandezas representadas na Figura 2.11 através de grupos adimensionais são:

- C_o Concentração inicial da nuvem
- g_o Gravidade relativa inicial, dada por $g_o = g(\rho_o - \rho_{ar})/\rho_{ar}$, $[g_o] = L / t^2$.
- q_o Fluxo volumétrico inicial, $[q_o] = L^3 / t$.
- V_o Volume inicial de gás liberado, $[V_o] = L^3$.
- u Velocidade média do vento, $[u] = L / t$.

Além dos modelos dimensionais, também são empregados modelos matemáticos avançados, os quais utilizam CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para resolver as equações da conservação da massa, do momento e da energia. É o único tipo de modelo que consegue descrever, com fidelidade, a dinâmica do comportamento da nuvem de gás denso, inclusive a formação de vórtices e a entrada de ar na nuvem.

Entretanto, apesar de fornecerem os resultados mais precisos, estes modelos requerem dados de entrada e condições de contorno muito específicos (tais como campo de velocidade do vento e de temperatura na atmosfera, geometria dos obstáculos presentes na região analisada, dentre outros), o que pode, em alguns casos, tornar a análise inviável. Em geral, são utilizados em estudos de casos específicos, que requerem uma análise mais detalhada, quando se busca uma resposta que não é possível de ser obtida pelos modelos mais simples.

O terceiro tipo é representado pelos modelos “box” (liberações instantâneas) e modelos de pluma descendente (*grounded plumes* – liberações contínuas). Segundo o *Yellow Book* (TNO, 2005), estes modelos, relativamente mais simples que os demais, descrevem apenas o comportamento global da nuvem. Isto fica evidente quando se analisam as premissas básicas adotadas nos modelos box e de pluma descendente, tais como:

- A dispersão se move sempre paralelamente ao solo;
- As características do solo, tais como rugosidade e propriedades térmicas, são consideradas uniformes ao longo de todo o terreno;
- Perfis similares de velocidade e de concentração são impostos para todas as direções (x,y,z) da nuvem;
- Flutuações locais de concentração não são consideradas.

Além disso, segundo AICHE (2000), modelos deste tipo ainda carecem de validação para determinadas situações, sendo prudente a verificação da sua aplicabilidade quando do uso.

Por fim, de posse das equações (2.28) e (2.29) e dos modelos de gases densos, é possível se determinar os alcances referentes às concentrações de interesse, na direção do vento (*downwind*), pertinentes às tipologias acidentais “*Flashfire*” e “nuvem tóxica”.

2.2.3.8 Explosão

Conforme apresentado anteriormente nas árvores de eventos, após a formação da nuvem inflamável há a possibilidade de ocorrência do *flashfire* ou da explosão (VCE). Para que a explosão em nuvem de vapor aconteça e, consequentemente, haja possibilidade de danos por sobrepressão, alguns pré-requisitos são necessários.

Primeiramente, a nuvem formada deve conter uma quantidade suficientemente grande de massa de produto em condições de inflamabilidade. Isto explica, portanto, a sua associação com a ignição retardada, uma vez que, caso ocorra a ignição imediata, não haverá tempo hábil para a formação de nuvem contendo a quantidade mínima necessária para gerar a explosão.

Além disso, é primordial que na região abrangida pela nuvem haja locais de confinamento ou de congestionamento, tais como áreas de processo com alta densidade de equipamentos (no caso de plantas industriais) ou túneis, pontes, estacionamentos lotados de carros, etc (no caso de instalações não industriais).

O efeito provocado por estas regiões congestionadas/confinadas consiste, basicamente, na aceleração da frente de combustão após a ignição da nuvem. Quanto mais rápida for a frente de combustão (velocidade da chama), maiores serão os efeitos de sobrepressão obtidos em decorrência da explosão.

Desta forma, os cálculos de dispersão da nuvem inflamável, descritos anteriormente, são primordiais para a análise da explosão, uma vez que os mesmos fornecerão tanto o total de massa que se encontra entre os limites de inflamabilidade, quanto a área abrangida pela nuvem. Isto permite verificar se dentro da nuvem haverá regiões de congestionamento/confinamento.

Alguns métodos são usualmente empregados para a estimativa dos alcances referentes a esta tipologia, sendo que dentre eles destacam-se o modelo de “TNT Equivalente” e o modelo “TNO Multi-Energia”.

2.2.3.8.1 Modelo TNT Equivalente

Este método considera que os efeitos de sobrepressão provocados pela explosão de uma dada massa de material inflamável (M) possuem uma relação de equivalência com os efeitos provocados por uma dada massa (W) de TNT (Trinitrotolueno), conforme apresentado pela equação abaixo:

$$W = \frac{\eta M E_C}{E_{TNT}}, \tag{2.30}$$

Em que:

η Eficiência da explosão

E_C Calor de combustão da substância analisada

E_{TNT} Calor de combustão do TNT

O termo η é um fator empírico e, de acordo com experimentos, varia de 1 a 10% para hidrocarbonetos. Conservativamente, nos cálculos geralmente é adotado o valor de 10% (AICHE, 2000).

Para a determinação dos alcances, é utilizado o gráfico experimental apresentado na Figura 2.12 (AICHE, 2000), o qual correlaciona a distância escalar (Z) e a Sobrepressão escalar (P_S), os quais serão definidos posteriormente.

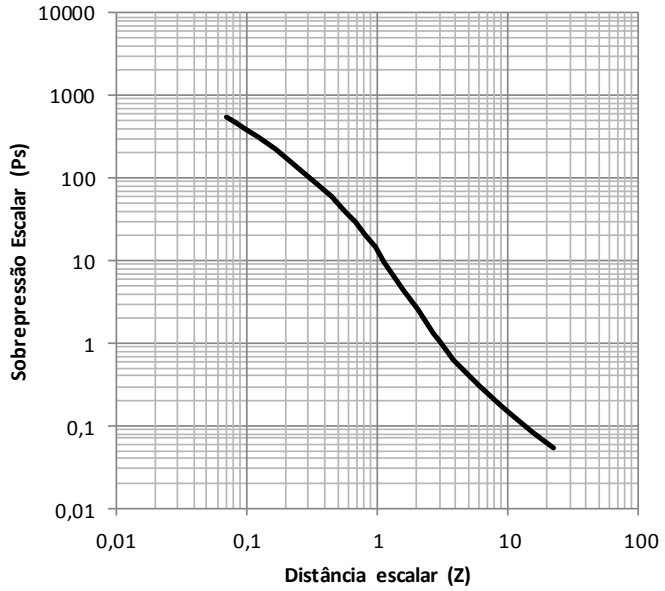


Figura 2.12 Nomograma utilizado para determinação dos alcances para o Modelo TNT. Fonte: AICHE (2000).

Abaixo são apresentadas as equações que definem, respectivamente, as variáveis P_S e Z.

$$P_S = \frac{P^O}{P_A}, \qquad (2.31)$$

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}}, \qquad (2.32)$$

Em que:

P^O Sobrepressão.

P_A Pressão Atmosférica.

R Distância (ou alcance) em relação ao local onde ocorre a explosão.

2.2.3.8.2 Modelo TNO Multi-Energia

O modelo Multi-Energia, desenvolvido pelo TNO (The Netherlands Organization for Applied Scientific Research) assume como premissa o fato de que os efeitos de sobrepressão gerados por uma explosão são fortemente dependentes do grau de confinamento/congestionamento da região em que a nuvem se encontra

e do tipo de fonte de ignição, e pouco dependentes da natureza do material inflamável.

A técnica consiste em identificar, na área da nuvem compreendida pelos limites de inflamabilidade, locais onde há a possibilidade de haver algum tipo de confinamento ou congestionamento da nuvem.

Para cada local de confinamento identificado, é necessário, além do seu volume, definir o parâmetro "força da explosão", o qual é representado por números naturais de 1 a 10. Basicamente, quanto maior for o grau de confinamento da localidade analisada, maior será o parâmetro e maiores serão os valores de sobrepressão gerados para uma dada massa de produto inflamável. A energia da fonte de ignição também influencia na escolha deste parâmetro, mas sua relevância é bem menor quando comparada com o grau de confinamento.

Semelhante ao modelo TNT, o modelo TNO Multi-Energia também utiliza um nomograma (Figura 2.13) para definição dos alcances acidentais. Entretanto, neste caso a distância escalar Z e a sobrepressão escalar P_S são definidas da seguinte forma:

$$Z = \frac{R}{\left(E_C V_{Conf} / P_A\right)^{1/3}}, \qquad (2.33) \qquad P_S = \frac{P^O}{P_A}, \qquad (2.34)$$

Em que:

R	Distância (ou alcance) em relação ao local onde ocorre a explosão.
P^O	Sobrepressão.
P_A	Pressão Atmosférica.
E_C	Energia de combustão. O valor adotado, para misturas estequiométricas de ar + hidrocarbonetos é de 3,5 MJ/m^3 de mistura.
V_{conf}	Volume do local de confinamento analisado.

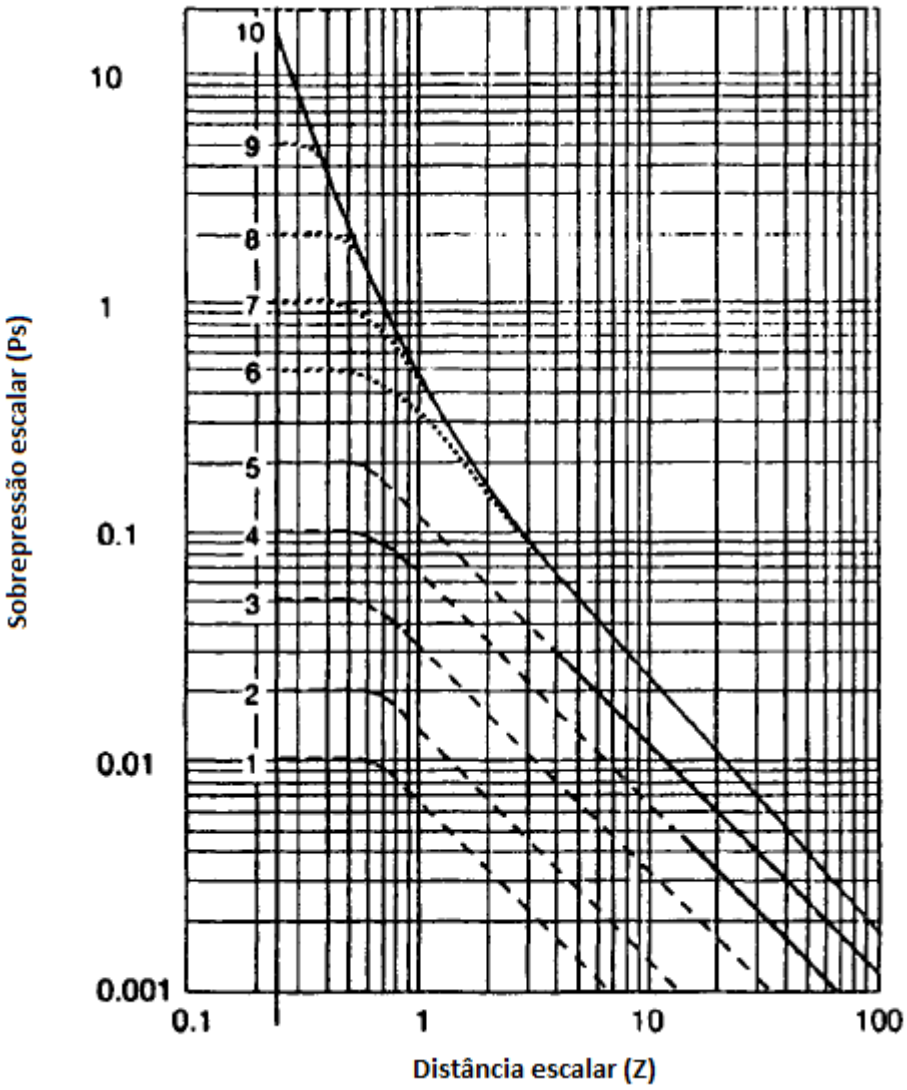


Figura 2.13 Nomograma para determinação dos alcances para o Modelo Multienergia. Fonte: AICHE (2000).

Cabe destacar que ambos os modelos possuem suas particularidades. O modelo TNT, apesar de mais simples e de fácil aplicação, em geral dá origem a alcances conservadores. No caso do método Multi-Energia, apesar de resultar em valores mais realistas, requer a definição de parâmetros por parte do analista (tal como os locais de confinamento e a “força da explosão”), o que confere certo grau de subjetividade ao procedimento de cálculo.

2.2.3.9 Tipologias associadas à emissão de radiação térmica com a distância

Além do *flashfire* e da explosão, mediante a liberação de um produto inflamável há também a possibilidade de ocorrência de tipologias acidentais de incêndio, as quais, de acordo com as árvores de eventos apresentadas, estão associadas à ignição imediata da substância.

O calor gerado por um incêndio tem potencial de causar danos a pessoas ou a objetos em suas proximidades, uma vez que a temperatura da chama pode variar entre 800 e 1600 K, dependendo do produto (TNO, 2005). Em função da diferença de temperatura entre a chama/gases quentes gerados pela combustão e o ambiente, haverá transferência de calor para os objetos e eventuais pessoas presentes no local.

Todos os mecanismos de transferência de calor estarão presentes no processo: condução, convecção e radiação. Entretanto, à medida que se afasta da fonte, o mecanismo predominante passa a ser a radiação, sendo a convecção e a condução importantes apenas para objetos situados muito próximos ao incêndio.

Assim sendo, como o interesse do Estudo de Análise de Riscos são as pessoas extramuros, os potenciais danos devido a incêndios em instalações industriais são causados por radiação térmica.

Independente do tipo de incêndio que ocorra (Jato de Fogo, Incêndio em poça ou Bola de Fogo), a equação base que define a radiação térmica (fluxo térmico por unidade de área) a que um observador estará submetida, a uma dada distância, é dada por:

$$q = SEP.F_{vista}.\tau_{ar}, \tag{2.35}$$

Em que:

q Radiação térmica a uma dada distância

SEP Poder emissivo da superfície da chama (*Surface Emissive Power*).

F_{vista} Fator de vista. Varia entre 0 e 1.

τ_{ar} Transmissividade térmica da atmosfera.

O poder emissivo da superfície da chama (SEP) depende, essencialmente, da taxa de queima e calor de combustão do produto, do formato geométrico da chama e se a mesma constitui uma chama limpa ou com fuligem/fumaça. Este último parâmetro é importante porque a presença de fuligem/fumaça reduz a emissão de calor pelo incêndio, uma vez que este material tem alta capacidade de absorver radiação térmica.

O fator de vista, por sua vez, representa uma relação de natureza puramente geométrica entre a superfície que emite e a superfície que recebe a radiação térmica, e pode ser definido como a fração da radiação emitida pela superfície da chama que é absorvida pela superfície do observador. Em outras palavras, o fator de vista indica o quanto o observador “vê” a chama, sendo dependente das geometrias da chama e do observador e característico da distância entre os mesmos.

Desta forma, as premissas referentes à geometria da chama para cada uma das tipologias acidentais em questão são primordiais para os valores de radiação térmica que serão obtidos. Neste contexto, os métodos referentes a Jato de Fogo, em geral, modelam a chama em formato de tronco de cone (*Frustum*), enquanto que aqueles referentes a Incêndio em Poça consideram a chama como tendo o formato de um cilindro. A Bola de Fogo, evidentemente, é modelada como uma esfera.

A Figura 2.14 a seguir ilustra as geometrias das chamas para cada tipologia.

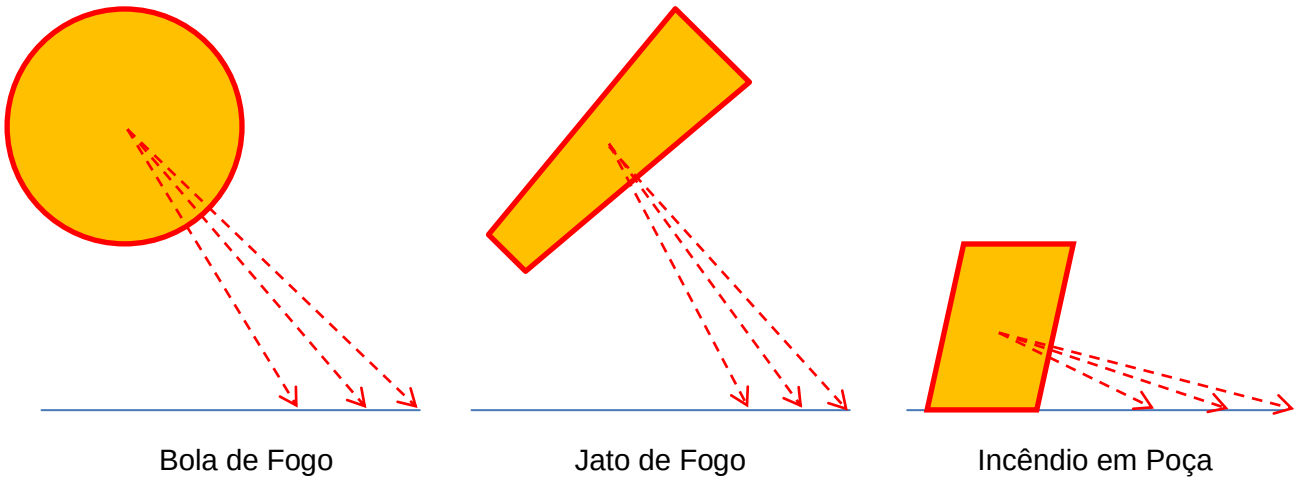


Figura 2.14 Geometrias adotadas para cada tipologia acidental (cortes transversais).

Por fim, a transmissividade térmica do ar é definida como sendo a fração da radiação térmica que não é absorvida pelo meio quando esta se propaga por um caminho correspondente a uma unidade de comprimento. Esta é função da

temperatura do ar e também de sua composição, sendo importante para os cálculos o conhecimento da umidade relativa do ar e a participação do CO_2 na atmosfera (uma vez que a água e o dióxido de carbono possuem alta capacidade de absorver calor).

2.2.4 Análise de vulnerabilidade

A análise de vulnerabilidade tem a finalidade de estimar os danos a serem causados às pessoas extramuros em função dos efeitos físicos que podem gerados em decorrência das hipóteses acidentais em análise.

Em geral, os modelos matemáticos aplicados para realização desta análise tem fundamento em funções do tipo PROBIT (Pr), as quais permitem expressar a porcentagem de dano causado em função da magnitude dos efeitos físicos advindos de explosões (sobrepressão), incêndios (dose térmica) e liberações de substâncias tóxicas (dose tóxica).

As funções de PROBIT se baseiam em funções conhecidas como "dose-resposta", as quais são obtidas experimentalmente para cada um dos efeitos físicos analisados (AICHE, 2000). Estas funções expressam, para cada dose, um valor médio de porcentagem de dano (resposta) e um dado desvio padrão σ, uma vez que indivíduos de uma mesma população possuem vulnerabilidades diferentes (dependendo da idade, do estado de saúde, etc). A Figura 2.15 a seguir ilustra, respectivamente, a curva dose-resposta tipicamente obtida nestes experimentos e a curva log(dose)-resposta, a qual, matematicamente, é uma maneira mais conveniente de se expressar este tipo de curva, como será visto posteriormente.

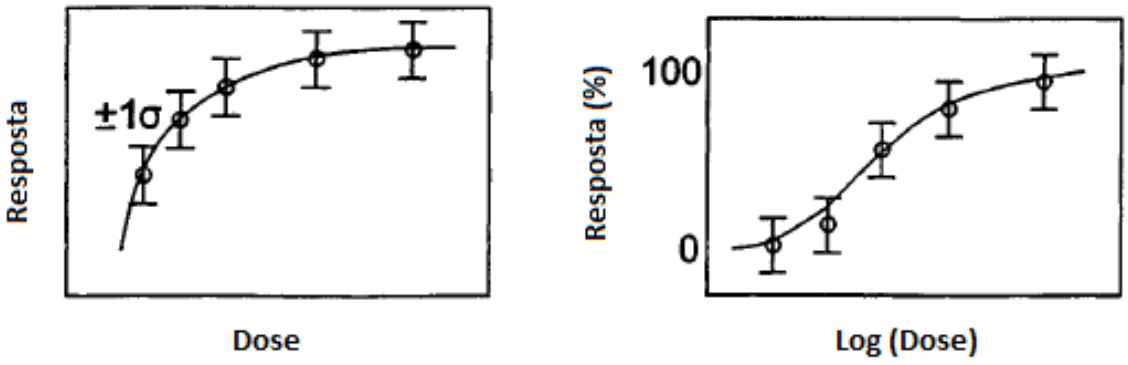


Figura 2.15 Curvas dose-resposta e Log (dose)-resposta tipicamente obtidas. Fonte: AICHE (2000).

A função PROBIT é então utilizada com o objetivo de se obter uma função linear da variável “Log(Dose)” por meio da seguinte transformação envolvendo a variável Pr e a variável resposta P (expressa em probabilidade de dano):

$$P = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\Pr-\mu} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \,, \tag{2.36}$$

Claramente trata-se de uma distribuição normal cumulativa, de média μ e variância σ, sendo u a variável de integração. Os valores de μ e σ são, respectivamente, 5 e 1. A tabela 2.2 mostra a relação entre porcentagem de dano e valor de PROBIT obtidos por meio da transformação proposta pela equação 2.36.

Tabela 2.2 Relação entre probabilidade de dano (%) e valores de PROBIT.

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,83	3,87	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,17	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33

A leitura da tabela acima é feita de tal maneira que a dezena do valor da porcentagem de dano é expressa na primeira coluna e a unidade deste valor situa-se na primeira linha. Deste modo, o valor de PROBIT igual a 4,92, por exemplo, corresponde a uma porcentagem de dano igual a 47%.

Por fim, após a linearização logarítmica proposta, as equações de PROBIT assumem a seguinte forma:

$$\Pr = k_1 + k_2 \ln(D) \,, \tag{2.37}$$

Em que k_1 e k_2 são constantes e D representa a dose. A fórmula definida para determinação de D depende diretamente do efeito físico analisado, conforme se pode observar na Tabela 2.3 a seguir.

Tabela 2.3 Fórmulas disponíveis para cálculo da dose na equação de PROBIT.

Efeito físico	Equação para Dose (D)	Variáveis
Sobrepressão	$D = P$	P: Valor de Sobrepressão
Radiação Térmica	$D = I^n.t$	I: Intensidade de radiação térmica n: Constante do modelo t: tempo de exposição
Nuvem tóxica	$D = C^n.t$	C: Concentração n: Constante característica do produto t: Tempo de exposição

Na literatura existem diversas equações de PROBIT, sendo prudente, portanto, a análise da aplicabilidade das mesmas. No caso de substâncias tóxicas, para cada produto são definidas as constantes n, k_1 e k_2, as quais são obtidas de acordo com as respectivas funções dose-resposta.

Para radiação térmica, o "*Purple Book*" (RIVM, 2005) apresenta a equação desenvolvida por Tsao e Perry, a qual será utilizada como referência para o desenvolvimento do presente trabalho. Esta função de PROBIT é dada por:

$$\Pr = -36.38 + 2{,}56\ln(I^{4/3}.t), \tag{2.38}$$

Em que a intensidade de radiação térmica "I" tem unidade W/m^2 e o tempo assume valores em segundos.

Convencionalmente, para definição dos valores dos alcances acidentais (com exceção da tipologia *Flashfire*), são adotadas as distâncias correspondentes à probabilidade de fatalidade de 1%, de acordo com as equações de PROBIT associadas a danos causados por radiação térmica ou por dose tóxica. No caso da sobrepressão, é adotado o valor de 0,1 bar como referência para definição dos alcances acidentais associados à tipologia explosão.

Com relação ao *Flashfire*, o alcance acidental é definido como sendo a máxima distância atingida pela concentração referente ao Limite Inferior de

Inflamabilidade. A Tabela 2.4 a seguir faz a associação dos valores de referência adotados para a definição dos alcances acidentais com as tipologias e os efeitos físicos em questão.

Tabela 2.4 Valores de referência para definição dos alcances acidentais.

Tipologia Acidental	Efeito Físico	Valor de referência
Incêndio em Nuvem (*Flashfire*)	Radiação térmica	Concentração do Limite Inferior de Inflamabilidade (LII).
Incêndio em Poça Jato de Fogo Bola de Fogo	Radiação térmica	Valor de dose térmica referente a 1% de probabilidade de dano (9,83 kW/m^2).
Nuvem tóxica	Concentração tóxica	Valor de dose tóxica referente a 1% de probabilidade de dano.
Explosão	Sobrepressão	Valor de sobrepressão igual a 0,1 bar.

No caso das tipologias acidentais Incêndio em Poça e Jato de Fogo, de acordo com o "*Purple Book*" (RIVM, 2005) deve ser adotado para os cálculos um tempo de exposição de 20 segundos, uma vez que, por se tratarem de incêndios de longa duração, naturalmente há a tendência das pessoas se afastarem do local de ocorrência dos mesmos.

Com relação à Bola de Fogo, por ser um evento de curta duração, o tempo a ser adotado nos cálculos deve ser igual ao tempo de duração do mesmo, sendo limitado ao valor máximo de 20 segundos.

Por fim, no que tange à nuvem tóxica, o tempo de exposição máximo mais comumente adotado para o cálculo da concentração referente a 1% de dano é igual a 10 minutos, conforme preconiza a Norma CETESB P4.261 (CETESB, 2003).

Definidos os alcances acidentais a partir dos valores de referência apresentados na Tabela 2.4 e dos cálculos de efeitos físicos, é feita a análise para verificar se estes alcances são capazes de atingir a população no entorno do empreendimento. Caso ao menos um alcance tenha potencial de atingir pessoas extramuros, os riscos devem ser numericamente calculados, conforme apresentado posteriormente. Do contrário, os riscos associados ao empreendimento são considerados plenamente toleráveis, não sendo necessário dar prosseguimento aos cálculos de risco.

Interessante ressaltar que esta premissa de tolerabilidade dos riscos em função de os alcances acidentais não atingirem a população constitui a motivação do presente trabalho, conforme explicado no item 1.4.

2.2.5 Análise de Frequência

A Análise de Frequência constitui a etapa probabilística do EAR, em que são definidas as chances de ocorrência (frequência) de um determinado cenário acidental analisado, o qual, de acordo com a Análise de Vulnerabilidade, possui potencial de causar danos a pessoas extramuros.

Esta etapa se inicia com a definição dos dados de taxa de falha dos equipamentos e/ou das linhas selecionados, os quais podem ser obtidos por meio de bancos de dados históricos pertinentes ao tipo de instalação analisada. Algumas referências, tais como RIVM (2009) e API (2008) são comumente utilizadas para instalações de processo *onshore*, uma vez que apresentam dados atualizados e para diversos tipos de equipamentos.

Além das taxas de falha, dados referentes à probabilidade de ignição imediata e retardada, a distribuição probabilista de direção do vento, a probabilidade da presença de pessoas dentro (*indoor*) ou fora de casa (*outdoor*), dentre outros parâmetros, são primordiais que sejam definidos durante a Análise de Frequência para subsidiar a etapa posterior de Estimativa dos Riscos.

À exceção dos dados pertinentes às condições meteorológicas do local, os quais são obtidos durante a etapa de Caracterização do Empreendimento, os demais dados citados anteriormente podem ser encontrados em diferentes referências bibliográficas, sendo que o "*Purple Book*" (RIVM, 2005), o Manual BEVI (RIVM, 2009) e o *Loss Prevention in the Process Industries* (LEES, 1996) constituem fontes usualmente empregadas com esta finalidade.

2.2.6 Estimativa e Avaliação dos Riscos

Mediante a realização das etapas de Caracterização do Empreendimento, Identificação de Perigos, Análise de Efeitos Físicos e Vulnerabilidade (consequências) e Análise de Frequência, são conhecidas todas as variáveis necessárias para a quantificação dos riscos do empreendimento em questão, os

quais são expressos, normalmente, na forma de Risco Individual (RI) e Risco Social (RS).

O Risco Individual pode ser definido como sendo o risco a que um indivíduo, situado em um dado ponto de coordenada (x,y) nas proximidades do empreendimento, está submetido em função da possibilidade de ocorrência de um ou mais cenários acidentais cujos alcances têm potencial de atingi-lo. Por ser função da posição (x,y) em que se encontra o indivíduo, o RI tem caráter geográfico, sendo expresso na forma de curvas de iso-risco (ou seja, curvas sobre as quais o risco tem um mesmo valor numérico).

A Figura 2.16, retirada do "*Purple Book*" (RIVM, 2005), exemplifica as curvas de iso-risco referentes a uma planta industrial fictícia.

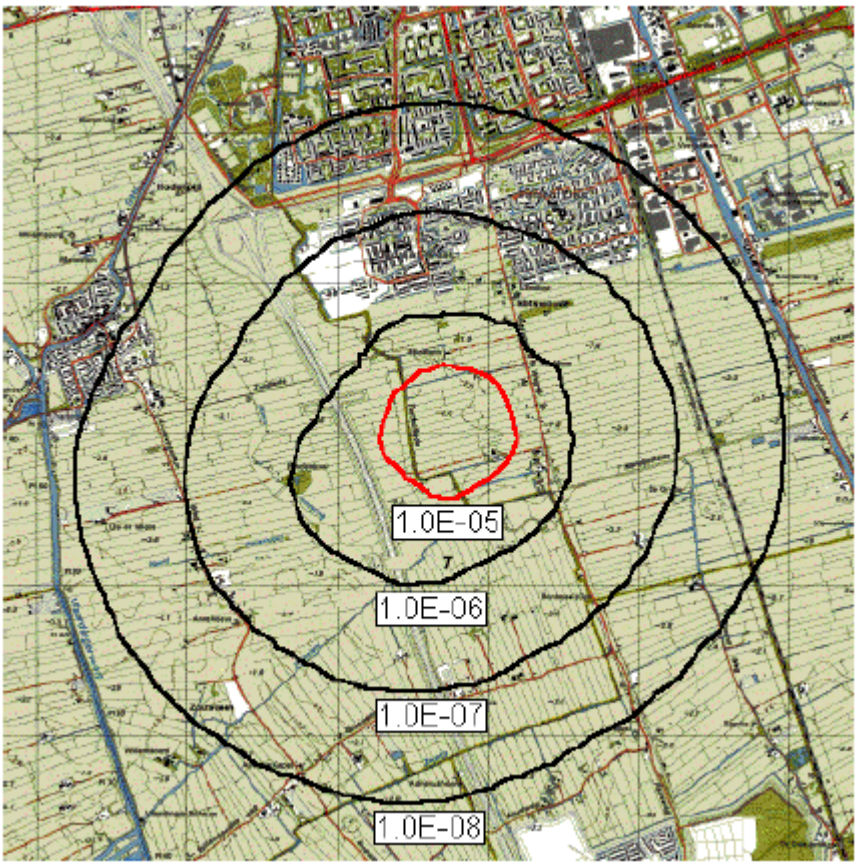


Figura 2.16 Representação das curvas de iso-risco de uma planta industrial fictícia.

Matematicamente, o risco individual é calculado a partir das seguintes equações:

$$RI_{x,y} = \sum_{i=1}^{n} RI_{x,y,i} \,, \qquad (2.39)$$

$$RI_{x,y,i} = F_i . P_{f,i} \,, \qquad (2.40)$$

Em que:

$RI_{x,y}$	Risco Individual total no ponto (x,y).
$RI_{x,y,i}$	Risco individual referente ao cenário acidental "i" no ponto (x,y).
F_i	Frequência do cenário acidental "i".
$P_{f.x,y,i}$	Probabilidade de dano (fatalidade) causado pelo efeito físico referente ao cenário acidental "i" no ponto (x,y).

Por sua vez, o Risco Social é definido como sendo uma quantificação dos riscos a que um determinado número ou agrupamento de pessoas está submetido em função das atividades desenvolvidas por uma dada instalação industrial. A forma mais comum de expressar o RS é através de curvas F-N, as quais são obtidas por meio da plotagem dos dados de frequência acumulada (F) dos cenários acidentais capazes de causar um número de fatalidades maior ou igual a N.

Conforme pode ser observado no exemplo apresentado pela Figura 2.17, as curvas F-N são representadas em gráficos Log x Log e são sempre decrescentes (uma vez que as mesmas tratam de frequências acumuladas).

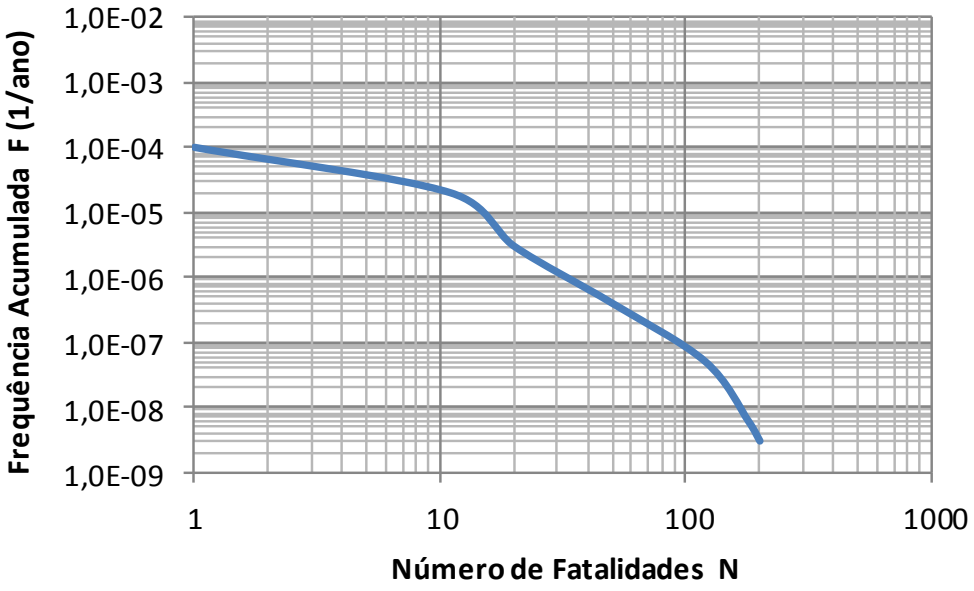


Figura 2.17 Exemplo hipotético de curva F-N para instalações industriais.

Em termos matemáticos, o risco social é calculado de acordo com a equação:

$$F_N = \sum_{i=1}^{n} F_i \,, \tag{2.41}$$

Em que:

F_N Frequência acumulada de todos os cenários acidentais que provocam N ou mais fatalidades.

F_i Frequência de cada cenário acidental "i" que provoca N ou mais fatalidades

N Número de fatalidades

Por fim, após a determinação dos riscos individual e social, é feita a avaliação dos mesmos de acordo com os critérios de tolerabilidade definidos pela agência ambiental responsável pelo licenciamento do empreendimento. Estes critérios podem variar, inclusive, de estado para estado, de país para país, dependendo da metodologia de cálculo adotada e também da percepção dos riscos ou aversão aos mesmos em cada localidade.

No Brasil, destacam-se os critérios de risco estabelecidos nos estados da Bahia (CEPRAM, 2009), do Rio de Janeiro (INEA, 2009) e São Paulo (CETESB, 2003), sendo os critérios estabelecidos neste último estado aqueles que, em geral, servem de referência para os demais estados e para licenciamentos federais, realizados pelo IBAMA.

De maneira geral, os critérios estabelecem três regiões distintas de aceitabilidade dos riscos:

- Região de risco negligenciável: situada abaixo de um dado limite inferior, esta região indica a plena tolerabilidade dos riscos;
- Região de risco intolerável: situada acima de um dado limite superior, esta região indica a não aceitabilidade dos riscos do empreendimento em análise, sendo necessária a revisão do projeto e/ou adoção de medidas mitigadoras para redução dos riscos;
- Região denominada ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*): esta região, intermediária às duas citadas acima, indica a tolerabilidade dos riscos, desde

que sejam adotadas medidas mitigadoras com o intuito de manter os riscos em níveis aceitáveis.

A título de exemplo, em função de sua representatividade em nível nacional, são apresentados os critérios de risco individual e risco social preconizados pela CETESB, respectivamente, nas Figuras 2.18 e 2.19.

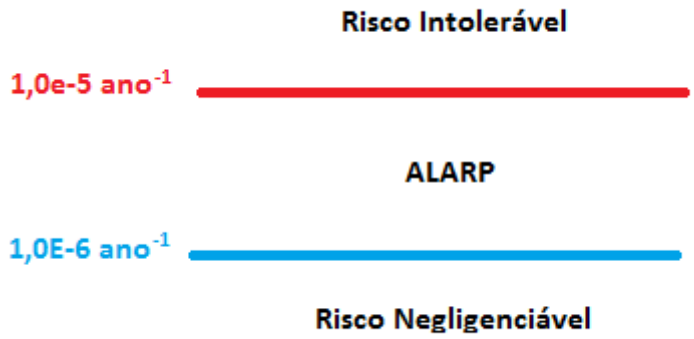


Figura 2.18 Critérios de risco individual adotados pela CETESB.

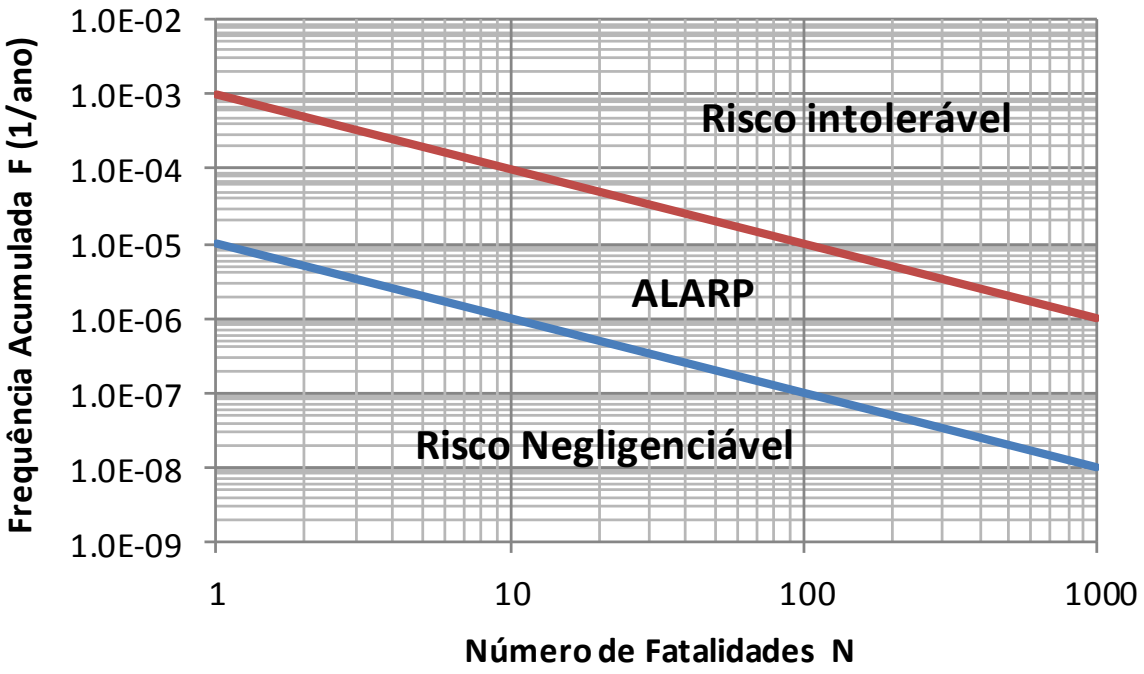


Figura 2.19 Critérios de risco social adotados pela CETESB.

3. MÉTODO DE MONTE CARLO

3.1. Introdução

O termo Método de Monte Carlo é uma expressão genérica empregada para designar procedimentos matemáticos que têm como base a utilização de números aleatórios, amostragens randômicas e geração de estatísticas. Atualmente, verifica-se a aplicação deste método em diversas áreas, incluindo ciências exatas e da terra tais como a física, química e a engenharia, como também áreas relacionadas às ciências humanas e biológicas, como exemplos a economia e a medicina, respectivamente. De maneira geral, segundo WOLLER (1996), para que a metodologia de Simulação de Monte Carlo esteja presente em um dado estudo basta que este faça uso de amostragens com números aleatórios na verificação estatística de algum fenômeno ou comportamento.

Segundo FISHMAN (1996), pelo fato de ser um método conceitualmente simples, sua origem no campo das ciências matemáticas remonta aos séculos XVII e XVIII, quando matemáticos ligados à teoria dos jogos começaram a estudar os resultados possíveis de eventos aleatórios por meio de sucessivas tentativas.

Posteriormente, no final do século XIX e início do século XX, os trabalhos de Lord Rayleigh em 1899 e Courant em 1928 tiveram como alicerce a utilização sistemática dos conceitos básicos de aleatoriedade do Método de Monte Carlo, através da técnica conhecida como "*Random Walk*" (Caminho Aleatório), com a finalidade de se obter soluções aproximadas para equações diferenciais parciais (problema de Dirichlet).

Entretanto, foi a partir do final da Segunda Guerra Mundial que o método se desenvolveu sistematicamente e tomou a forma na qual é conhecido atualmente. Seu desenvolvimento surgiu a partir da necessidade dos cientistas americanos, ligados à área da energia nuclear, de solucionarem problemas relacionados à difusão de nêutrons em meios isotrópicos (meios que possuem as mesmas propriedades em todas as direções). Em função dos trabalhos realizados anteriormente por Kolmogorov em 1931 que mostraram a analogia existente entre processos estocásticos (de natureza aleatória) e certas equações diferenciais parciais, os matemáticos John von Newmann, Stanislaw Ulam e Nicholas Metropolis vislumbraram o potencial do emprego de experimentos aleatórios por meio da aplicação do método *Random Walk* juntamente com os recursos computacionais

incipientes na época (tal como o ENIAC - *Electronic Numerical Integrator and Computer*, cujo projeto havia se iniciado em 1943) para resolver as equações diferenciais que regiam o fenômeno de difusão de nêutrons.

Conforme FISHMAN (1996), esta proposta inverteu o sentido natural que, até então, vinha sendo adotado na matemática. Ao invés de aplicar os resultados determinísticos obtidos por meio das equações diferenciais para prover soluções para problemas probabilísticos, propôs-se a utilização de experimentos aleatórios com a finalidade de se obter solução para equações diferenciais, as quais não necessariamente possuem fundamentos de origem probabilística.

Esta mudança de paradigma culminou com a criação do “Método de Monte Carlo”, cujo nome, o qual faz alusão ao famoso jogo de roleta dos cassinos de Monte Carlo, no Principado de Mônaco, curiosamente foi dado por Metropolis em homenagem ao tio de Ulam.

Por fim, o desenvolvimento da informática a partir da década de 70 e, principalmente, a criação e o aprimoramento dos computadores pessoais a partir das décadas de 80 e 90 permitiram a expansão da aplicabilidade do método às mais diversas áreas da ciência, conforme citado anteriormente.

3.2. Método de Monte Carlo aplicado ao cálculo de áreas

Uma das principais aplicações conhecidas para o Método de Monte Carlo consiste na determinação numérica de áreas ou volumes de figuras geométricas, sobretudo quando a forma da região abrangida por tais figuras dificulta (ou até mesmo torna impossível) a obtenção destes valores por meio da aplicação de métodos analíticos.

De fato, o algoritmo existente para esta finalidade é definido, de forma genérica, para o cálculo do volume de uma figura qualquer pertencente ao espaço euclidiano multi-dimensional de ordem “m” (FISHMAN, 1996), sendo uma particularidade do método o cálculo de áreas (m = 2) ou o cálculo do volume (m = 3) de figuras geométricas. Entretanto, como o objetivo deste trabalho consiste no cálculo de áreas de figuras geométricas planas, será explicado e apresentado apenas o algoritmo aplicável ao caso do espaço bidimensional.

Para tanto, será utilizada uma aplicação prática deste conceito, que consiste na necessidade de se obter, por exemplo, a área A_λ ocupada pela superfície λ de um determinado lago ou reservatório, de formato irregular, por meio de imagens de satélites. A Figura 3.1 exemplifica, esquematicamente, o exemplo em questão.

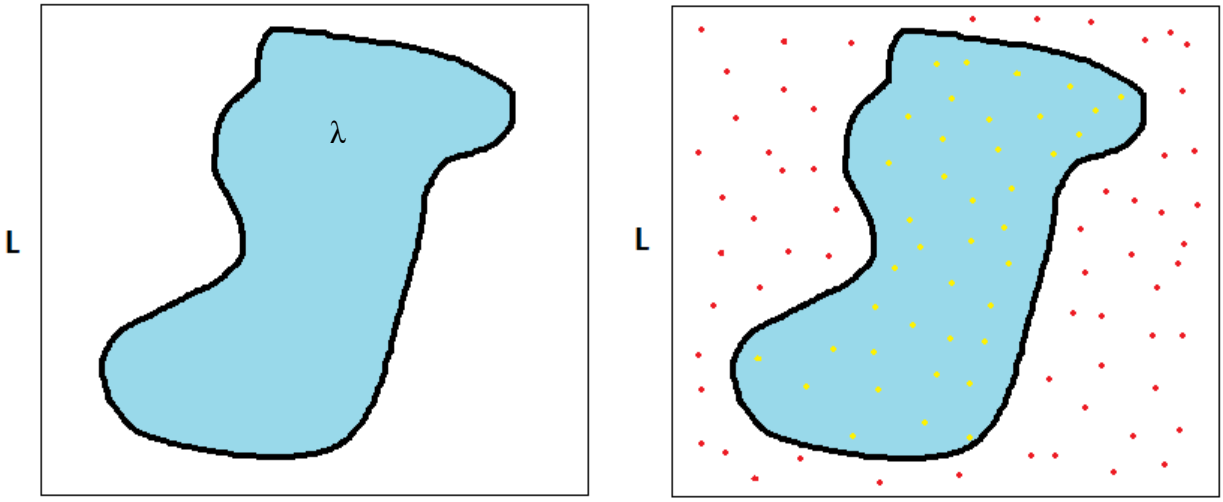


Figura 3.1 Exemplo de aplicação do método de Monte Carlo.

O procedimento de cálculo da área A_λ por meio do Método de Monte Carlo consiste na geração de uma sequência de "n" pontos aleatórios, situados no interior do quadrado de lado L (ou de uma figura geométrica qualquer da qual se conheça o valor de sua área), de tal maneira que eles fiquem bem distribuídos ao longo da área do quadrado em questão. No MATLAB, *software* utilizado neste trabalho, a geração dos pontos aleatórios é feita com auxilio da função "*rand*".

Além disso, é necessário também que sejam definidas relações e/ou inequações capazes de determinar se um dado ponto gerado aleatoriamente se situa no interior ou no exterior da área λ. Por meio desta ferramenta, é definida uma função ϕ, a qual assume valor nulo para pontos situados fora da superfície λ, e valor unitário para pontos situados dentro da mesma. O item 5.2.2.3 apresenta a metodologia utilizada para a determinação da posição relativa dos pontos gerados em relação à área λ.

Como exemplo, a Figura 3.1 mostra esquematicamente um conjunto de pontos gerados aleatoriamente sobre o quadrado citado, fazendo a distinção "n_λ" de pontos situados no interior ($\phi = 1$, cor amarela) e "$n - n_\lambda$" pontos localizados no exterior ($\phi = 0$, cor vermelha) da superfície λ analisada.

De posse destes dados, a área da superfície λ é calculada da seguinte forma:

$$A_\lambda = \frac{n_\lambda}{n} L^2 , \qquad (3.1)$$

Ou seja, a área A_λ é igual à área do quadrado de lado L ponderada pela fração de pontos que se situaram no interior da área da superfície λ.

A seguir é apresentado o Algoritmo 1 que corresponde ao procedimento MC explicado acima.

Algoritmo 1: Método de Monte Carlo – Cálculo de Áreas

Finalidade: Calcular a área A_λ aproximada de uma superfície λ

Entradas: Região que limita a superfície λ e o número n de pontos aleatórios

Saída: Valor estimado da Área A_λ

Algoritmo:

1 $j = 1$ e $S = 0$

2 Enquanto $j \leq n$

   a. Gerar um ponto aleatório x_j

   b. $\phi(x_j) = 0$

   c. Se $x_j \in \lambda \rightarrow \phi(x_j) = 1$

   d. $S = S + \phi(x_j)$

   e. $j = j + 1$

3 $A_\lambda = S/n$

Cabe ressaltar que, logicamente, quanto maior for o valor de "n", maior será a precisão da estimativa a ser obtida para a área A_λ, o que, em contrapartida, se reflete no tempo de processamento necessário para a realização da tarefa.

4. MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO *SIMULATED ANNEALING*

4.1. Introdução

A otimização *Simulated Annealing*, proposta de forma independente por KIRKPATRICK *et alii* (1983) e CERNY (1985), caracteriza-se por ser um método heurístico genérico com a finalidade de solucionar problemas de otimização combinatória, cujo algoritmo tem como base técnicas aleatórias (VAN LAARHOVEN, 1989). O método é heurístico posto que é baseado em critérios de tomada de decisão de natureza não analítica (i.e. não formais), sendo guiado por regras empíricas, tentativa e erro e sorteios.

Tendo como alicerce o trabalho publicado por Metropolis (METROPOLIS *et alii*, 1953), Kirkpatrick propôs este método com base na analogia entre a simulação de um tipo de tratamento térmico aplicado a sólidos (*annealing*) e a resolução de problemas de otimização combinatória (daí a origem do nome do método).

Basicamente, no que tange à física da matéria condensada, o processo *annealing* consiste em se aumentar a temperatura de um sólido até um dado valor T_o em que a estrutura cristalina do mesmo atinge um estado de alta energia, sendo possível a mobilidade aleatória dos átomos que a compõem. Atingindo-se esta dada temperatura, o material é resfriado de forma lenta, permitindo que os átomos se rearranjem em redes cristalinas gradativamente de menor energia livre, culminando no estado de mínima energia no valor final de temperatura T_F.

O citado trabalho de Metropolis consistiu exatamente na modelagem matemática deste processo de tratamento térmico de sólidos, com base no Método de Monte Carlo. Dado um estado inicial do sólido à temperatura T_o, caracterizado pela configuração inicial de sua rede cristalina a qual define, por sua vez, um valor E_o de energia livre, é gerado um segundo estado por meio de uma pequena perturbação (de natureza randômica) no estado inicial, cuja energia livre é dada por E_1. Se a diferença de energia ΔE entre os dois estados ($\Delta E = E_1 - E_o$) for negativa, isto significa que se encontrou um estado de menor energia e o procedimento numérico continua, tendo como referência, agora, o novo estado.

Entretanto, se ΔE for positivo, apesar de se ter encontrado um estado de maior energia, o método assume uma probabilidade de, mesmo assim, aceitar este

estado como referência para a próxima iteração. Esta probabilidade é calculada pelo fator denominado “Critério de Metropolis”, o qual é expresso por:

$$P = \exp\left(\frac{-\Delta E}{k_B T}\right), \tag{4.1}$$

Em que:

P Probabilidade de aceitar o estado de maior energia ($\Delta E > 0$)

k_B Constante de Boltzmann

T Temperatura absoluta em que se encontram os estados em análise

Seguindo este procedimento, após um número razoável de perturbações, o método terá assintoticamente encontrado o estado de menor energia para a temperatura em análise. A etapa seguinte é a redução da temperatura para um valor um pouco menor (resfriamento lento) e a repetição do procedimento descrito acima, obtendo-se o estado de menor energia para este novo valor de temperatura. E, desta forma, o método é realizado até que se atinja o menor valor de temperatura T_F, a qual corresponde ao estado que possui a mínima energia global.

De forma análoga, é possível utilizar-se o algoritmo de Metropolis para gerar sequências de configurações referentes a um dado problema de otimização combinatória. Neste caso, a configuração faz o papel da estrutura cristalina do sólido, enquanto que uma dada “função C” a ser minimizada e o “parâmetro de controle c” representam, respectivamente, a energia livre E e a temperatura T.

Assim, o algoritmo genérico do método *Simulated Annealing*, apresentado esquematicamente a seguir, pode ser considerado como uma variação do Algoritmo de Metropolis, na qual se avalia a função C numa sequência sucessiva e decrescente do parâmetro de controle “c”. Além disso, alguns parâmetros devem ser definidos previamente, tais como o valor inicial “c_o” do parâmetro de controle, bem como a configuração inicial “config.$_o$” do sistema e a função perturbação “PERTURB”, que, a cada iteração, gerará uma nova configuração “config.j” a partir da configuração “config.i” em análise.

No que tange ao critério de Metropolis, o mesmo assume a seguinte forma:

$$P = \exp\left(\frac{-\Delta C_{ij}}{c}\right), \tag{4.2}$$

Em que:

P Probabilidade de aceitar a configuração j em detrimento da configuração i

ΔC_{ij} $C(j) - C(i)$ (valores da função C para cada uma das configurações)

Como se nota, a constante de Boltzmann k_B assume valor unitário. A cada iteração, o método utiliza uma função randômica com a finalidade de gerar um valor aleatório pertencente ao intervalo [0,1) e o compara com o valor dado pelo critério de Metropolis. Caso o valor de P seja maior que o valor aleatório obtido, aceita-se a configuração j em detrimento da configuração i, independente do fato de $C(i)$ ser menor que $C(j)$.

Por fim, é necessário também se definir uma função $f(c)$ responsável por reduzir gradativamente o valor do parâmetro de controle. O Algoritmo 2 a seguir reflete a implementação SA usada nesta dissertação:

Algoritmo 2: Método de Otimização *Simulated Annealing*

Finalidade: Minimizar a função C

Entradas: c_o e config.$_o$

Saída: Valor mínimo C_{min} (ótimo) da função C

Algoritmo:

1 $m = 1$, $c_1 = c_o$ e config.$_1$ = config.$_o$

2 Enquanto o critério de parada não for satisfeito

  a. Enquanto o equilíbrio não for atingido para um dado c

    I. PERTURB (config.i) = config.j e ΔC_{ij}

    II. Se $\Delta C_{ij} \leq 0 \rightarrow$ config.i = config.j

    III. Se $\Delta C_{ij} > 0$

      i. Se $exp(-\Delta C_{ij}/c) >$ Random [0,1) $\rightarrow$ config.i = config.j

  b. $c_{m+1} = f(c_m)$

  c. $m = m + 1$

3 $C_{min} = C_i$

Algumas características importantes merecem ser destacadas. Primeiramente, segundo VAN LAARHOVEN (1989), a obtenção da solução mediante a aplicação do método *Simulated Annealing* não depende da configuração inicial c_o, e o mesmo geralmente converge para valores muito próximos do mínimo global. Isto se deve, principalmente, à aplicação do Critério de Metropolis, o qual, durante o processo de minimização da função objetivo C, permite que a mesma assuma valores maiores que aqueles obtidos em iterações anteriores. Esta propriedade tende a evitar que o algoritmo resulte em uma solução de ótimo local.

Entretanto, apesar das vantagens citadas, o fato de se tratar de um método relativamente simples, heurístico e genérico é contraposto pelo esforço computacional requerido, implicando em tempos de processamento relativamente extensos quando comparado com outros métodos de otimização (VAN LAARHOVEN, 1989).

4.2. Problemas de *Layout* de Instalações Industriais

O Problema de *Layout* de Instalações Industriais, conhecido na literatura pela sigla FLP (*Facility Layout Problem,* conforme KUSIAK, 1987), consiste na determinação da organização física de um dado sistema de produção. Segundo SINGH *et al* (2005), este tipo de otimização é aplicado nas mais diversas áreas, tais como na determinação do *design* de placas de circuito eletrônicos; na definição da planta de hospitais, escolas e aeroportos; armazenagem de produtos; projeto de turbinas hidráulicas, etc.

Neste caso, o foco da aplicação do FLP consiste no estudo do *layout* de plantas industriais, composto por “n” unidades independentes de formato fixo (blocos), em função de uma característica intrínseca das plantas analisadas.

Na grande maioria das referências pesquisadas, a característica intrínseca analisada é o custo, o qual pode estar associado a diversas questões inerentes às plantas de processo. POVOA *et al* (2002) apresentam uma abordagem com enfoque nos custos fixos relacionados à quantidade de equipamentos e à extensão de tubulação necessária para interligá-los, e nos custos variáveis referentes ao transporte de substâncias entre os mesmos mediante bombeamento durante a operação da planta. Neste caso, por se tratar de uma planta simples (composta apenas por uma unidade), cada bloco representou um dos equipamentos.

GEORGIADIS *et alii* (1999), além dos custos analisados por POVOA *et al* (2002), também incluiu em sua análise custos relacionados ao valor da terra em termos de área necessária para a construção da planta.

Além dos custos citados acima, PATSIATZIS *et alii* (2004), MEDINA *et al* (2009) e LÓPEZ-MOLINA *et alii* (2012) adicionalmente incluíram em suas análises custos referentes a danos possíveis de ocorrer à propriedade industrial devido ao efeito dominó, ou seja, dado um vazamento de produto inflamável em um dado equipamento, há a possibilidade de os efeitos físicos gerados pela ignição desta substância ocasionarem acidentes em equipamentos ou unidades vizinhas dentro da planta. Nestes casos, portanto, o assunto segurança é abordado em termos financeiros e com enfoque na propriedade.

Outros autores, entretanto, tais como VÁZQUEZ-ROMAN *et alii* (2010), DÍAZ-OVALLE *et alii* (2010) e JUNG *et alii* (2010) consideram em suas respectivas análises custos referentes a danos (fatalidades) causados a pessoas mediante vazamento de substâncias tóxicas, sendo que nos dois primeiros trabalhos citados a preocupação se dá em relação ao público interno (trabalhadores), e no último artigo o alvo é o público externo (população). Especificamente para este último caso, a associação da questão de segurança da população a custos irremediavelmente resultou na questão da valoração monetária da vida humana, a qual, apesar de válida em países tais como a Inglaterra para justificar situações em que o risco se situa na região ALARP, ainda é bastante incipiente e delicada em países como o Brasil.

Por este motivo, no presente trabalho a **Função Objetivo** a ser minimizada durante o processo de otimização de *layout* é uma métrica associada à segurança das pessoas extramuros (e não ao custo associado ao valor da vida). O termo principal deste objetivo é a medida da área dada pela intersecção do **Polígono Populacional** (referente à ocupação do solo por populações extramuros, podendo ser, na verdade, uma união de polígonos populacionais) com a **Área de Interesse**. A Função Objetivo também poderá receber contribuição de outros termos (Penalidades, Área de Interesse sem intersecção com Polígono Populacional, etc) que deverão ingressar com apropriados fatores de proporcionalidade escolhidos para cada caso.

A Área de Interesse, por sua vez, é dada pela **diferença** de dois conjuntos de pontos sobre o domínio R^2 do problema de *layout* em discussão, a saber:

- União de todas as áreas abrangidas pelos alcances acidentais referentes a cada unidade de processo; e
- O **Polígono Limite do Empreendimento** em análise.

Em suma, a **Área de Interesse** é a união de todos os pontos atingidos pelos alcances acidentais que estão **fora** do polígono de definição da planta em análise, ao passo que a **Função Objetivo** a ser minimizada contém em papel central a extensão da **Área de Interesse** que também pertence ao **Polígono Populacional** (ou união de polígonos populacionais).

4.3. *Simulated Annealing* aplicado ao FLP

Após a definição do problema, é necessário utilizar uma ferramenta de otimização de forma a encontrar a configuração física da planta que minimize a função objetivo dada pela intersecção do **Polígono Populacional** e a **Área de Interesse**, eventualmente adicionada de outras contribuições.

Durante a pesquisa bibliográfica, verificou-se que são diversos os tipos de algoritmos de otimização utilizados para resolução de FLP. SINGH *et al* (2005) apresenta um vasto levantamento de artigos com esta finalidade durante os últimos 20 anos e, dentre os métodos definidos como “meta-heurísticos”, a técnica *Simulated Annealing* foi utilizada em 18 deles.

Analisando-se as características dos Problemas de *Layout* de Instalações Industriais, verifica-se que os mesmos possuem uma característica altamente combinatória por natureza, e geralmente exibe muitos mínimos locais (MELLER *et al*, 1992).

Neste contexto, esta última propriedade dos FLPs foi de fato decisiva na seleção do método *Simulated Annealing* para a aplicação neste trabalho, uma vez que métodos analíticos, como por exemplo os que aplicam Programação Inteira Mista (tanto linear – MILP quanto não Linear – MINLP), dificilmente conseguem identificar mínimos globais. No caso do *Simulated Annealing*, a aplicação do critério de Metropolis tem como objetivo evitar que se atinja um mínimo local durante o processo de otimização, sendo, portanto, comparativamente mais eficiente na busca do mínimo global.

Além disso, segundo SINGH *et al* (2005), a aplicação de Algoritmo Genético para a resolução de problemas deste tipo ao longo do tempo não se mostrou satisfatória, já que a performance do algoritmo é fortemente dependente de cada caso (ou seja, não é um método robusto, de larga aplicabilidade na solução deste tipo de problema). Por sua vez, segundo a mesma referência, o método Colônia de Formigas (também meta-heurístico, a exemplo do *Simulated Annealing* e do Algoritmo Genético) foi empregado em apenas uma das mais de cem referências bibliográficas levantadas pelo autor, demonstrando, portanto, que este método também tem aplicabilidade restrita na resolução de problemas de otimização de layout.

5. METODOLOGIA

5.1. Introdução

A metodologia proposta no presente trabalho consiste na elaboração de uma ferramenta computacional escrita em código MATLAB R12, na qual é feita implementação conjunta do método de otimização heurística "*Simulated Annealing*" (SA) e do Método de Monte Carlo (MC) com o objetivo de minimizar os riscos impostos pelas instalações industriais às comunidades localizadas em suas proximidades.

Conforme apresentado anteriormente por meio da equação 2.1, o risco basicamente é função de três fatores fundamentais: eventos acidentais possíveis (e); frequências (f) de ocorrência dos eventos (probabilidade); e as consequências (c) decorrentes dos eventos. Estas últimas se referem aos potenciais danos a pessoas extramuros resultantes dos referidos eventos e que, matematicamente, são representadas nos Estudos de Análise de Riscos pelos alcances obtidos para cada tipologia acidental referente a cada evento.

Tendo em vista o exposto, é importante ressaltar que este trabalho teve como foco a redução dos riscos por meio da minimização da intersecção do **Polígono Populacional** (ou Polígonos Populacionais) com a chamada **Área de Interesse**, ou seja, aquela abrangida pelos alcances acidentais (consequências) que extrapolam os limites de propriedade das instalações industriais e que podem atingir comunidades extramuros localizadas em suas proximidades no **Polígono Populacional**. A redução das frequências, portanto, não foi explorada no presente estudo.

A demonstração da aplicabilidade e da eficácia da ferramenta proposta foi feita através de três estudos de caso, os quais são relacionados tanto à escolha do arranjo mais apropriado para as unidades que compõem uma dada instalação industrial na etapa de projeto (portanto, um problema do tipo FLP – *Facility Layout Problem*), quanto também à identificação da melhor área disponível para a implantação de um dado empreendimento (etapa de seleção de áreas).

De forma a estruturar a explanação da metodologia adotada, primeiramente será apresentado o algoritmo proposto para a quantificação das várias áreas necessárias e, posteriormente, será exposto cada um dos estudos de caso

analisados juntamente com os respectivos algoritmos do tipo *Simulated Annealing* adotados para a minimização das áreas abrangidas pelos alcances acidentais e que possam atingir a população.

5.2. Algoritmo para cálculo das áreas

Conforme apresentado no Capítulo 3, foi utilizado o Método de Monte Carlo para quantificar as áreas de interesse citadas anteriormente, uma vez que as instalações industriais a serem analisadas, bem como as populações presentes em suas proximidades, podem apresentar as mais diversas formas geométricas no domínio R^2, incluindo polígonos convexos e não convexos. Esta característica dificulta a quantificação das áreas por meio de métodos analíticos, sendo mais prática a aplicação do método estocástico MC.

Com o intuito de auxiliar no entendimento do algoritmo proposto para a quantificação das áreas, considere-se o exemplo genérico apresentado na Figura 5.1.

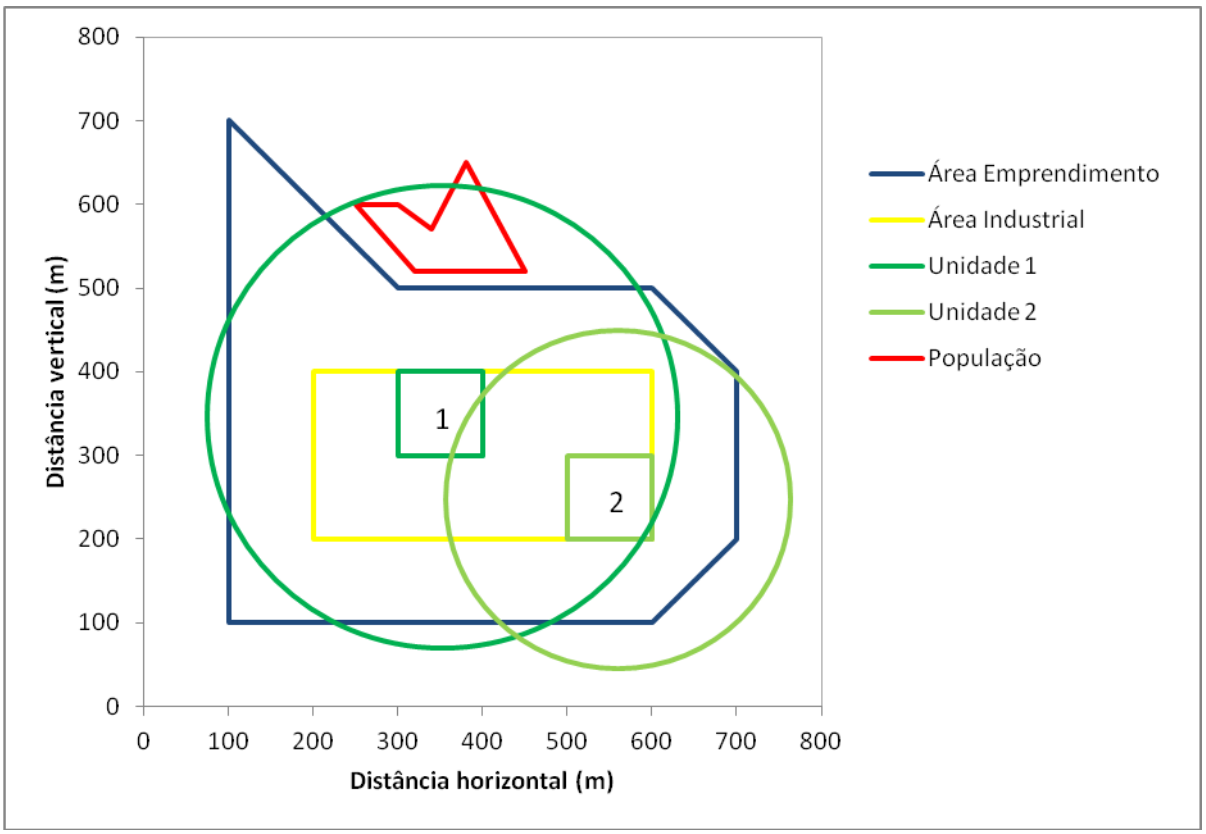


Figura 5.1 Exemplo de aplicação do método de Monte Carlo.

Nesta figura, o polígono azul representa o Polígono do Empreendimento analisado. O Polígono Populacional é representado pelo polígono vermelho nas

vizinhanças do Polígono do Empreendimento. Os quadrados em verde representam unidades industriais (de processo ou de tancagem) que geram os alcances acidentais representados pelos círculos de mesma cor. O polígono em amarelo define a área do empreendimento reservada às instalações industriais. Como se nota, ambas as áreas selecionados para representar o Polígono do Empreendimento e o Polígono Populacional são polígonos não-convexos, o que torna a análise mais complexa e demonstra, por conseguinte, o potencial da ferramenta desenvolvida.

A Área de Interesse, portanto, é definida pela diferença da união de todos os círculos verdes com o polígono azul, uma vez que, por definição, só há a possibilidade de ocorrência de pessoas extramuros (público externo) fora do Polígono Limite do Empreendimento.

Entretanto, no âmbito da Área de Interesse acima, é importante diferenciar a parcela que, além de extrapolar os limites do empreendimento, também atinge parte (ou a totalidade) das populações extramuros presentes nas circunvizinhanças, uma vez que o algoritmo priorizará a minimização desta parcela da Área de Interesse, tornando mínimo, consequentemente, o número estimado das potenciais vítimas decorrentes dos cenários acidentais considerados (risco social).

5.2.1. Aplicação do Método de Monte Carlo

Definidas as premissas e as condições de contorno (dados de entrada) específicas para cada caso, o algoritmo se inicia por meio da aplicação do Método de Monte Carlo para a geração de "*n*" pontos aleatórios presentes na área do menor retângulo capaz de abranger todos os alcances acidentais em análise. Este retângulo é denominado de **Retângulo Base**. A determinação das coordenadas do Retângulo Base é feita em função da dimensão dos alcances (raio dos círculos), bem como das coordenadas (x,y) dos pontos nos quais os mesmos são centralizados (centros_unidades_x e centros_unidades_y), conforme apresentado no Algoritmo 3 a seguir.

Algoritmo 3: Definição do Retângulo Base
Finalidade: Obter coordenadas do Retângulo Base para geração de pontos
Entradas: centros_unidades_x, centros_unidades_y e alcances
Saída: Coordenadas (x,y) dos 4 vértices do Retângulo Base

Algoritmo:

1 Para i = 1 até num_unidades

vetor_min_ret_x_i = centro_unidades_x_i – alcance$_i$

vetor_max_ret_x_i = centro_unidades_x_i + alcance$_i$

vetor_min_ret_y_i = centro_unidades_y_i – alcance$_i$

vetor_max_ret_y_i = centro_unidades_y_i + alcance$_i$

2 min_ret_x = mínimo(vetor_min_ret_x)

max_ret_x = máximo(vetor_max_ret_x)

min_ret_y = mínimo(vetor_min_ret_y)

max_ret_y = máximo(vetor_max_ret_y)

3 coordenadas_ret_x = [min_ret_x min_ret_x max_ret_x max_ret_x]

coordenadas_ret_y = [min_ret_y max_ret_y max_ret_y min_ret_y]

A título de ilustração, a Figura 5.2 apresenta o Retângulo Base citado anteriormente (linha pontilhada), gerado especificamente para o caso apresentado na Figura 5.1, bem como 1000 pontos gerados aleatoriamente no interior do mesmo mediante a aplicação do Método de Monte Carlo.

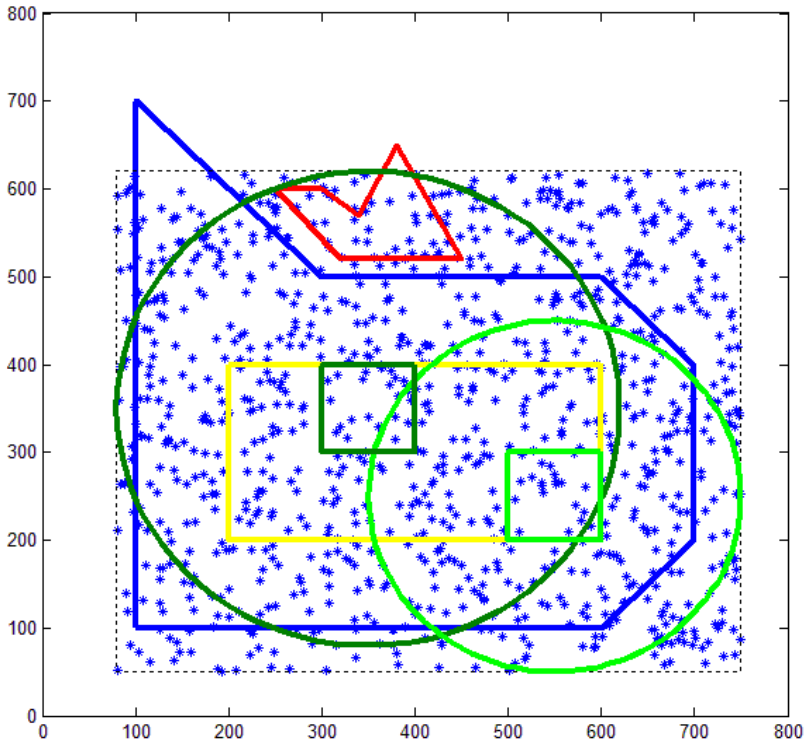


Figura 5.2 Pontos gerados pelo Método de Monte Carlo para quantificação das áreas.

Com o intuito de quantificar a área que extrapola o Polígono Limite do Empreendimento, bem como a parcela que atinge o Polígono Populacional, foi necessário elaborar uma função, definida como FUNCAO_AREA, capaz de identificar a localização relativa de cada um dos pontos gerados pela rotina de Monte Carlo e obter, desta forma, a quantidade de pontos pertencentes a cada uma das regiões de interesse.

Uma vez conhecidas as somas dos pontos de cada região, a quantificação de cada uma das áreas é realizada através da aplicação da equação 3.1, visto que o número total de pontos (*n*) e a área do Retângulo Base são conhecidos.

5.2.2. Definição da FUNCAO_AREA

A FUNCAO_AREA tem como objetivo definir a posição relativa de cada ponto gerado pelo Método de Monte Carlo no interior do Retângulo Base. Ou seja, esta função identifica se um dado ponto está dentro ou fora do Polígono do Empreendimento e, estando fora, se o mesmo pertence ou não à Área de Interesse, bem como se o ponto pertence ou não ao Polígono Populacional.

De forma a ser possível trabalhar com polígonos dos mais diversos tipos e formatos (convexos e não-convexos), foi necessário incluir na rotina de cálculo a denominada “Triangulação de Delaunay”, disponível no MATLAB R12 através da função *DelaunayTri*.

5.2.2.1 Triangulação de Delaunay

Basicamente, a Triangulação de Delaunay é um algoritmo que fará a decomposição de um polígono qualquer (convexo ou não-convexo) em triângulos, de tal forma que a circunferência gerada pelos três pontos de um dado triângulo não compreenda nenhum outro ponto pertencente a qualquer um dos demais triângulos, conforme mostrado no exemplo da Figura 5.3 aplicado a um polígono de 7 lados (vértices em vermelho). Desta forma, a Triangulação de Delaunay maximiza o menor ângulo de todos os triângulos na triangulação, tendendo a evitar triângulos com ângulos internos muito pequenos.

Uma vez que todo triângulo é um polígono convexo, a principal vantagem obtida na aplicação do algoritmo de Delaunay é que o mesmo permite decompor qualquer polígono não-convexo em um conjunto de polígonos convexos, o que

facilita sobremaneira a manipulação matemática deste tipo de figura geométrica, inclusive no que tange aos objetivos deste trabalho.

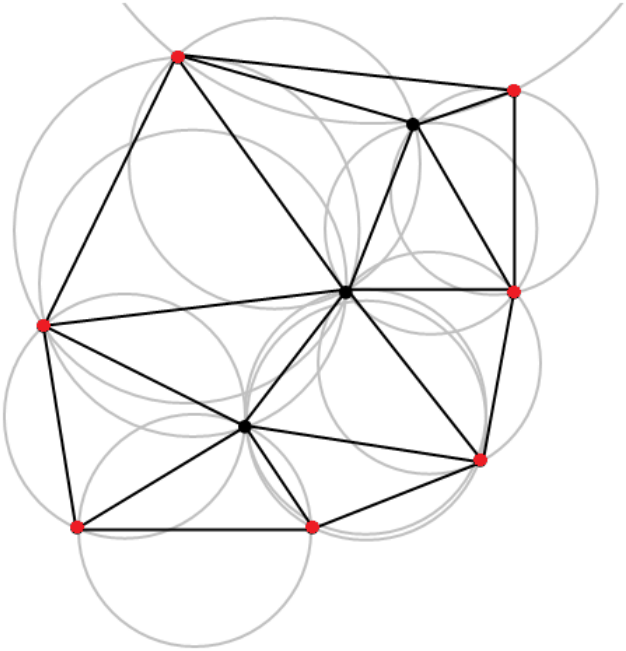


Figura 5.3 Exemplo da aplicação da Triangulação de Delaunay.

O primeiro passo, portanto, para a identificação da localização relativa de um ponto é a decomposição do Polígono Limite do Empreendimento pela aplicação do algoritmo de Delaunay, conforme exemplificado na Figura 5.4.

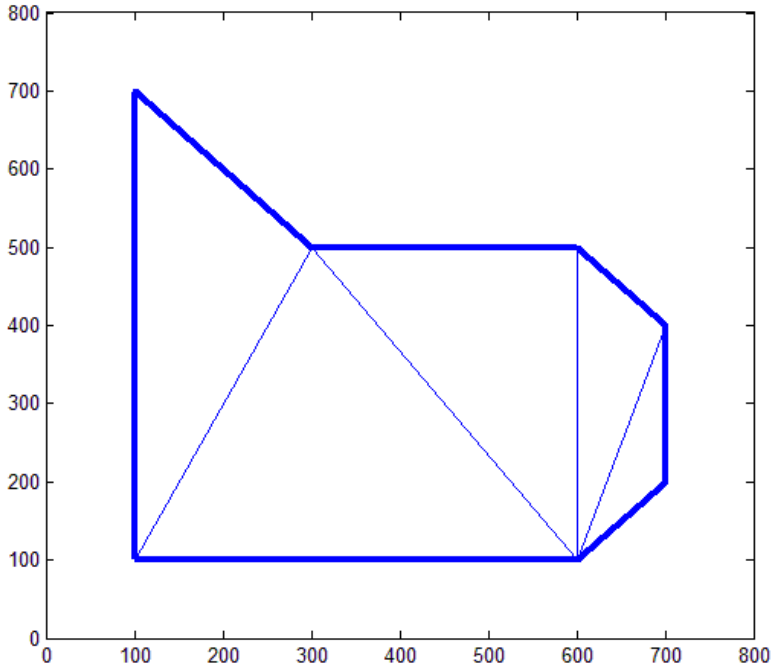


Figura 5.4 Aplicação da Triangulação de Delaunay no exemplo em análise.

De posse das coordenadas dos triângulos obtidos na decomposição, o passo seguinte é verificar se um dado ponto pertence ou não ao Polígono do Empreendimento. Para tanto, basta identificar se o mesmo está situado no interior de pelo menos um dos triângulos resultantes da sua decomposição Delaunay.

Para realizar esta verificação, são definidos os segmentos de reta orientados formados pelos seguintes pontos, para cada um dos triângulos que formam o Polígono do Empreendimento:

- Segmento 1: definido pelo centro geométrico do triângulo e pelo ponto em análise;

- Segmentos 2, 3 e 4: definidos pelos vértices, tomados dois a dois, do triângulo selecionado.

Para definir o centroide de cada triângulo, foram utilizadas as seguintes equações derivadas da geometria analítica, as quais são aplicáveis a qualquer polígono convexo composto por n lados:

$$C_x = \frac{1}{6A}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i + x_{i+1}\right)\left(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i\right), \tag{5.1}$$

$$C_y = \frac{1}{6A}\sum_{i=1}^{n}\left(y_i + y_{i+1}\right)\left(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i\right), \tag{5.2}$$

$$A = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i\right), \tag{5.3}$$

Em que:

C_x ,C_y Coordenadas x e y, respectivamente, do centro geométrico do polígono.

x_i, y_i Coordenadas dos vértices do polígono

A Área do polígono

Conforme evidenciado na Figura 5.5, para que o ponto analisado se situe fora de um dado triângulo, é necessário e suficiente que o segmento de reta orientado formado pelo seu centro geométrico e o ponto (Segmento 1) cruze pelo menos um dos demais segmentos de reta orientados que correspondem às arestas deste triângulo.

Neste contexto, foi utilizada uma subfunção da FUNCAO_AREA, denominada DUAS_RETAS, para auxiliar na determinação do ponto em que as retas geradas pelos segmentos orientados acima se cruzam, conforme explicitado a seguir.

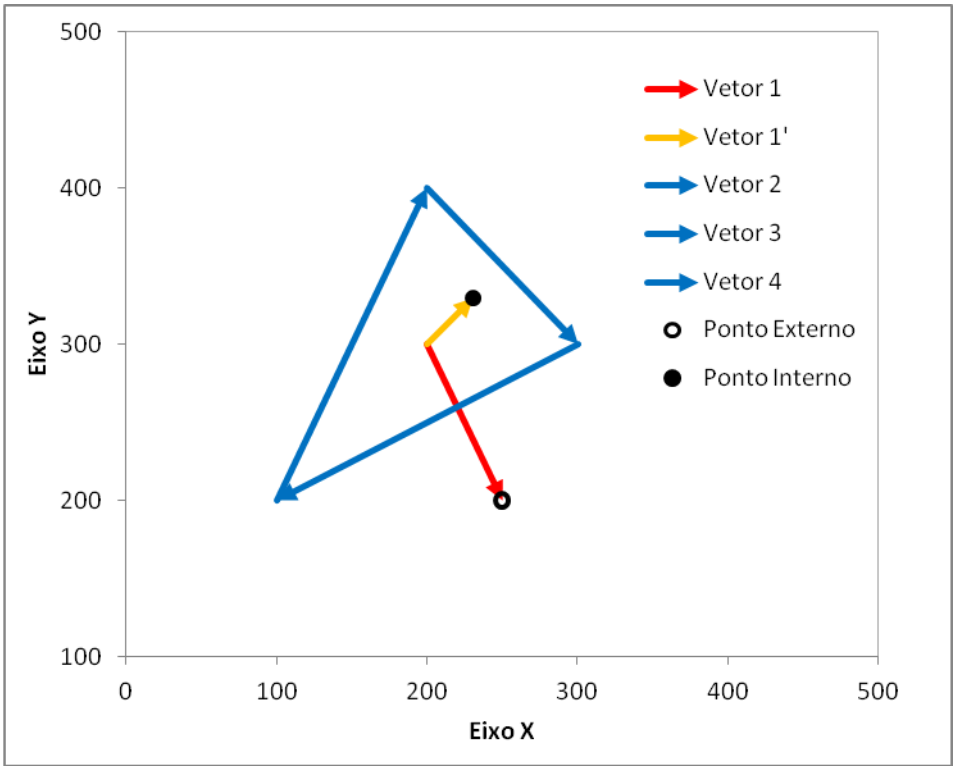


Figura 5.5 Análise da localização do ponto em relação ao triângulo selecionado.

5.2.2.2 Subfunção DUAS_RETAS

A subfunção DUAS_RETAS tem como dados de entrada os pontos que definem os dois segmentos de reta orientados a serem analisados, no intuito de se determinar em qual ponto as retas geradas pelos mesmos se cruzam.

A partir da geometria analítica, é conhecido que, para se obter a equação de uma dada reta no espaço R^2, é necessário definir um ponto $\underline{P}$ pertencente a esta reta, o vetor diretor $\underline{V}$ da mesma, e um parâmetro escalar α que representa o único grau de liberdade disponível.

Assim sendo, tem-se a seguinte equação genérica para retas dispostas no R^2:

$$\underline{r} = \underline{P} + \alpha \underline{V}, \tag{5.4}$$

Para cada par de pontos que definem os segmentos em análise, a equação das respectivas retas é obtida de forma direta, uma vez que o vetor diretor $\underline{V}$ é o

próprio vetor definido pela diferença dos dois pontos ($\underline{P_2} - \underline{P_1}$), e o ponto $\underline{P}$ é qualquer um destes pontos. Neste trabalho foi definido que $\underline{P}$ é sempre $\underline{P_1}$.

Entretanto, apesar da definição das retas ser direta, sem necessidade de praticamente nenhuma manipulação matemática, salienta-se que isto é de suma importância para o objetivo da subfunção em questão, uma vez que o valor assumido pelo parâmetro α de uma dada reta indicará a posição de um dado ponto pertencente a esta reta em relação ao seu vetor diretor.

É fácil mostrar que, para uma dada reta, o valor de $\alpha = 0$ corresponde ao ponto $\underline{P_1}$ (ponto inicial que define o vetor diretor) e, para $\alpha = 1$, o ponto resultante é igual ao ponto $\underline{P_2}$ (ponto final que define o vetor diretor), conforme mostrado abaixo:

Por definição:	Se $\alpha = 0$	Se $\alpha = 1$
$\underline{r} = \underline{P_1} + \alpha(\underline{P_2} - \underline{P_1})$	$\underline{r} = \underline{P_1} + 0.(\underline{P_2} - \underline{P_1})$	$\underline{r} = \underline{P_1} + 1.(\underline{P_2} - \underline{P_1})$
$\underline{r} = \underline{P} + \alpha\underline{V}$	$\underline{r} = \underline{P_1}$	$\underline{r} = \underline{P_2}$

Assim sendo, caso o valor do parâmetro α se situe entre 0 e 1, evidencia-se que o ponto obtido se situa entre os pontos $\underline{P_2}$ e $\underline{P_1}$ e, assim, o mesmo pertence ao segmento definido pelo vetor diretor $\underline{V}$.

Esta propriedade permite, portanto, verificar se dois segmentos de reta quaisquer se cruzam, sendo suficiente para tal apenas identificar em qual ponto as respectivas retas se interceptam e fazer a análise dos valores de α obtidos para ambas as retas. Caso ambos os valores de α se situem entre 0 e 1, fica evidenciado que os segmentos têm intersecção.

A subfunção DUAS_RETAS, portanto, por meio da resolução de um sistema linear simples, identifica o ponto de interseção das retas definidas pelos dois conjuntos de dados de entrada e informa quais os valores de α obtidos.

5.2.2.3 Identificação da posição dos pontos gerados por Monte Carlo

De posse da subfunção DUAS_RETAS, procede-se à identificação da posição de cada ponto em relação a todos os triângulos gerados pela Triangulação de Delaunay referentes ao Polígono do empreendimento.

Considerando-se um determinado ponto e um dado triângulo, são determinados os segmentos orientados 1 a 4 (conforme definido anteriormente) e

analisados os valores de α obtidos. Se para pelo menos um dos segmentos que definem as arestas do triângulo (segmentos 2 a 4) forem obtidos dois valores de α situados no intervalo entre 0 e 1, conclui-se que o ponto se localiza fora deste triângulo.

O mesmo procedimento é realizado para os demais triângulos gerados pela triangulação, para o mesmo ponto. Este ponto é identificado como sendo externo ao Polígono do Empreendimento se e somente se for verificado que ele se situa fora de todos os triângulos considerados. Caso contrário, o ponto pertence a pelo menos um dos triângulos e, assim, localiza-se no interior do Polígono do Empreendimento. A Figura 5.6 mostra a imagem resultante desta primeira filtragem (pontos no interior do Polígono do Empreendimento em azul escuro, e pontos externos ao mesmo em azul claro).

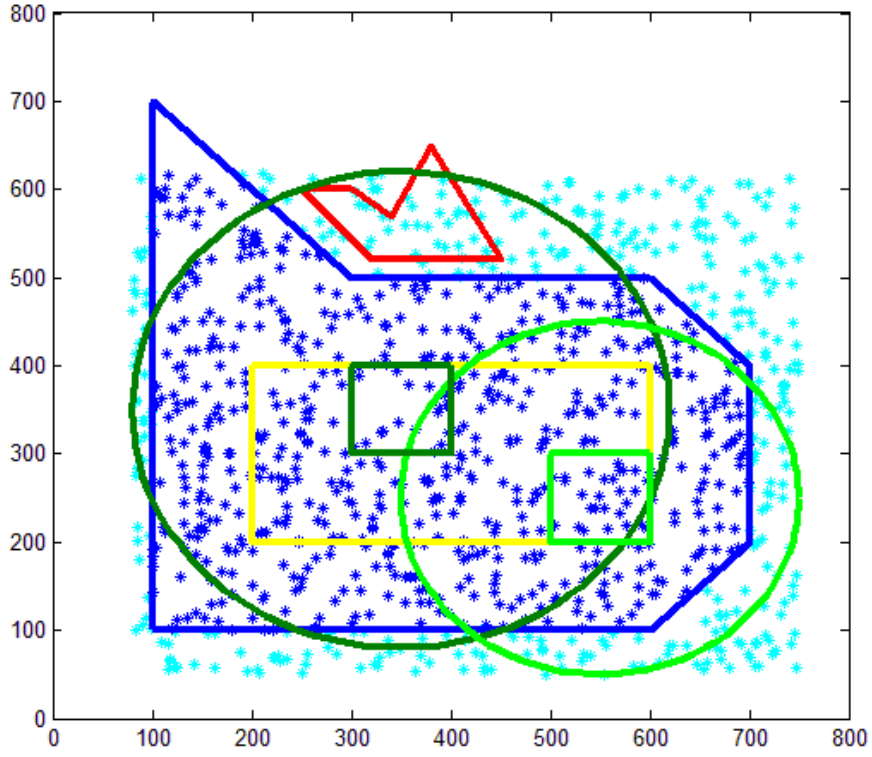


Figura 5.6 Identificação da localização dos pontos dentro e fora do Polígono do Empreendimento.

O próximo passo é identificar quais pontos, situados no exterior do Polígono do Empreendimento, pertencem à Área de Interesse, ou seja, também pertencem à união das áreas definidas pelos alcances acidentais (círculos verdes).

Esta etapa é relativamente simples em comparação à anterior. Dado que o ponto em análise é externo ao Polígono do Empreendimento, basta verificar, para cada unidade de processo/ tancagem considerada, se a distância entre o ponto e o centro da unidade é menor ou igual ao respectivo alcance acidental. A Figura 5.7, então, ilustra a aplicação desta premissa para identificação dos pontos na Área de Interesse (apresentados em verde).

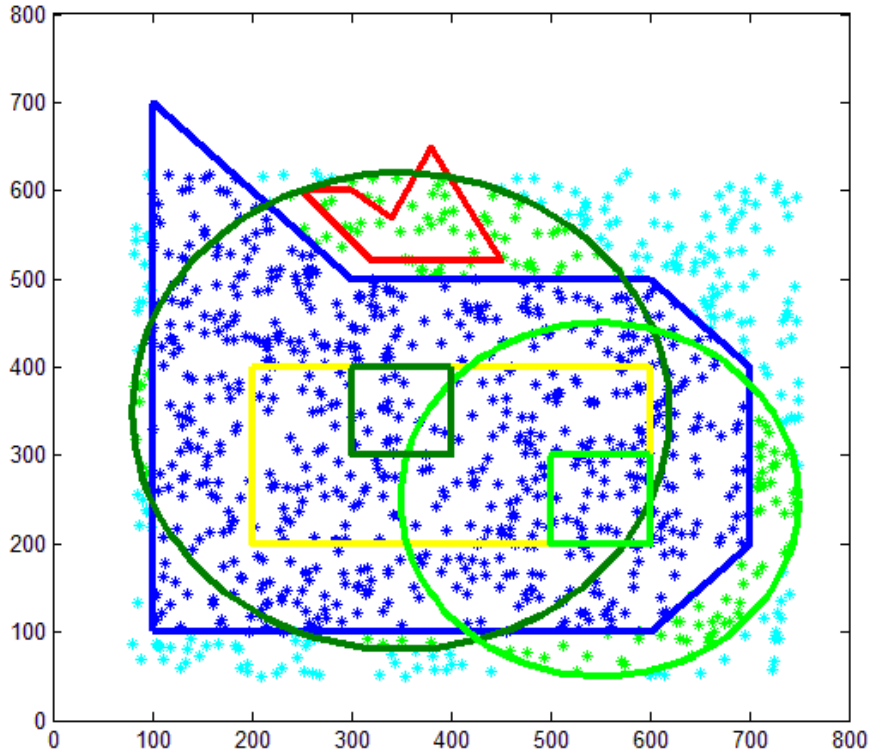


Figura 5.7 Identificação dos pontos localizados na Área de Interesse.

Por fim, resta identificar quais pontos pertencem ao Polígono Populacional (ou à união de todos os polígonos populacionais) situado nas cercanias do Polígono do Empreendimento. Neste caso, é realizado um procedimento semelhante àquele aplicado na verificação se o ponto pertence ou não ao Polígono do Empreendimento, mas tendo-se como foco, logicamente, o Polígono Populacional (polígono vermelho) e somente os pontos que já foram previamente identificados como pertencentes à Área de interesse.

Assim, é efetuada a Triangulação Delaunay do Polígono Populacional (ou de todos os polígonos populacionais) em questão e obtidos os triângulos que o (os) compõe(m). Em seguida, utiliza-se a função DUAS_RETAS para identificar se cada

ponto candidato pertence a um de tais triângulos Delaunay. Em caso positivo, o ponto é contabilizado como pertencente ao Polígono Populacional.

A Figura 5.8 mostra o resultado final obtido através da aplicação da FUNCAO_AREA para o exemplo ilustrado na Figura 5.1, destacando-se que os pontos situados no interior do Polígono Populacional são agora apresentados na cor vermelha.

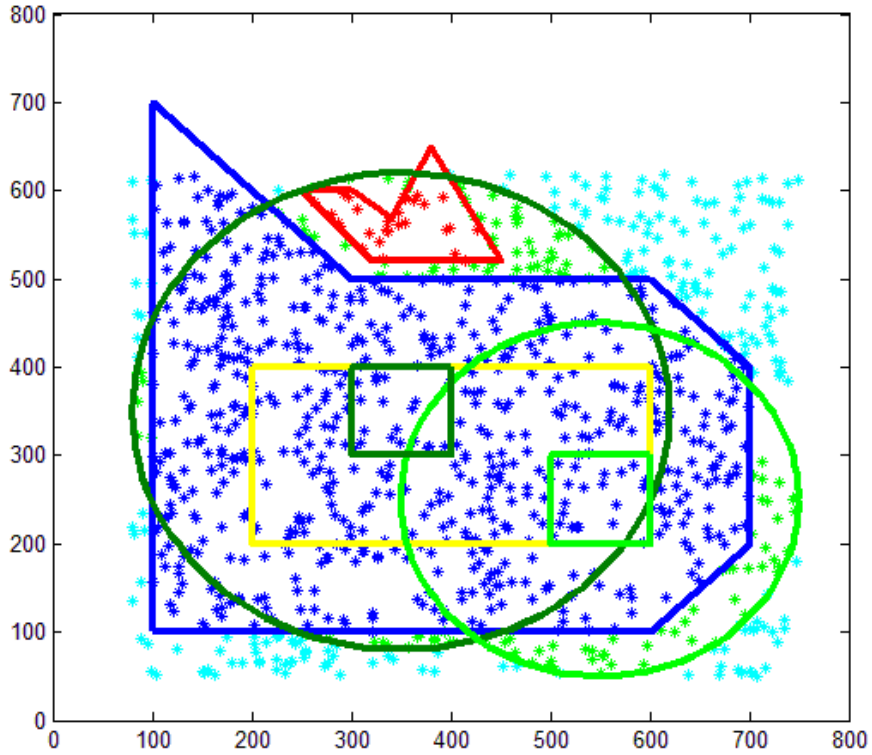


Figura 5.8 Resultado final obtido mediante a aplicação da FUNCAO_AREA.

Em termos numéricos, a FUNCAO_AREA retorna a área do Retângulo Base, o número de pontos na Área de Interesse e, especificamente, o número de pontos que atingiu o Polígono Populacional (ou a união dos polígonos populacionais).

A título de exemplo, para a Figura 5.8 foram obtidos os seguintes resultados:

- Total de pontos: 1000
- Pontos na Área de Interesse (pontos em verde e em vermelho) = 156
- Pontos no Polígono Populacional (pontos em vermelho) = 29
- Área base (Retângulo Base) = 381900 m^2

Os dados fornecidos por esta função alimentarão as funções objetivo específicas para cada um dos estudos de caso, conforme exposto adiante.

De forma a resumir a metodologia empregada para o cálculo das diversas áreas relevantes, é apresentado o algoritmo da FUNCAO_AREA de forma esquemática, a qual já contempla inclusive o algoritmo de Monte Carlo para geração dos pontos aleatórios MC dentro do Retângulo Base.

Algoritmo 4: Algoritmo da FUNCAO_AREA

Finalidade: Cálculo da Área de Interesse e da Intersecção desta com o Polígono Populacional

Entradas:

coord_emp: matriz de coordenadas dos vértices do Polígono do Empreendimento

coord_pop: matriz de coordenadas dos vértices do(s) Polígono(s) Populacional(is)

centro_unid: matriz de coordenadas dos centros das unidades

num_unidades: número de unidades de processo/tancagem

alcances: valores dos respectivos alcances acidentais

n_total: numero total de pontos a serem gerados

Saídas:

n_area_int: número de pontos na Área de Interesse

n_area_pop: número de pontos no(s) Polígono(s) Populacional(is)

area_ret_base: área do Retângulo Base.

Algoritmo:

1 ret_base = **ALGORITMO 3** (centro_unid, alcances)
area_base = aresta_horizontal_ret_base * aresta_vertical_ret_base
pontos_area_interesse = 0
pontos_populacao = [ ]

2 **Para** i = 1 até n_total

a. Ponto P_i = MONTE CARLO(ret_base)
b. triangulos_emp = DELAUNAYTRI(coord_emp)
c. centroides_triangulos_emp = CENTROIDE(triangulos_emp)
d. teste_fora_emp = 0

% Verificação se o ponto gerado está dentro ou fora do empreendimento

e. **Para** j = 1 até num_triangulos_emp

I. $vetor_1_i = P_i$ – $centroides_triangulos_emp_j$

II. teste_fora_triangulo = 0

III. **Para** k = 1 até 3

i. vetor_aresta$_k$ = k-ésima aresta do triângulo j em análise

ii. [α_1,α_2] = DUAS_RETAS(vetor_1, vetor_aresta$_k$)

iii. **Se** 0 < α_1< 1 e 0 < α_2 < 1

1. teste_fora_triangulo = teste_fora_triangulo + 1

IV. **Se** teste_fora_triangulo > 0

i. teste_fora_emp = teste_fora_emp + 1

f. **Se** teste_fora_emp = num_triangulos_emp

I. ponto_fora_emp = 1

g. **Senão**

I. ponto_fora_emp = 0

% Verificação se o ponto gerado está dentro ou fora da área de interesse

h. **Se** ponto_fora_emp = 1

I. teste_pt_interesse = 0

II. **Para** m = 1 até num_unidades

i. vetor$_m$ = P$_i$ – centro_unid$_m$

ii. distancia$_m$ = NORM(vetor$_m$)

iii. **Se** distancia$_m$ < alcances$_m$

1. teste_pt_interesse = teste_pt_interesse + 1

iv. **Senão**

1. teste_pt_interesse = teste_pt_interesse + 0

III. **Se** teste_pt_interesse > 0

i. ponto_de_interesse = 1

ii. pontos_area_interesse = pontos_area_interesse + 1

IV. **Senão**

i. ponto_de_interesse = 0;

% Verificação se o ponto gerado está dentro ou fora da área de população

i. **Se** ponto_de_interesse = 1

I. **Para** n = 1 até num_populacoes

i. triangulos_pop$_n$ = DELAUNAYTRI(coord_pop$_n$)

ii. centroides_triangulos_pop$_n$ = CENTROIDE(triangulos_pop$_n$)

iii. teste_fora_pop$_n$ = 0

iv. **Para** j = 1 até $num_triangulos_pop_n$

1. $vet_1_{n,i} = P_i - centroides_triangulos_pop_{n,j}$
2. $teste_fora_tri_n = 0$
3. **Para** k = 1 até 3
    a. $vetor_aresta_{n,k}$ = k-ésima aresta do triângulo j
    b. $[\alpha_1,\alpha_2] = DUAS_RETAS(vet_1_{n,i}, vetor_aresta_{n,k})$
    c. **Se** $0 < \alpha_1 < 1$ e $0 < \alpha_2 < 1$
        i. $teste_fora_tri_n = teste_fora_tri_n + 1$
4. **Se** $teste_fora_tri_n > 0$
    a. $teste_fora_pop_n = teste_fora_pop_n + 1$

v. **Se** $teste_fora_pop_n < num_triangulos_pop_n$

1. $pontos_populacao_n = pontos_populacao_n + 1$

vi. **Senão**

1. $pontos_populacao_n = pontos_populacao_n + 0$

Observações: O símbolo [ ] significa “vetor nulo”
NORM denota uma função interna do MATLAB e é utilizada para calcular a norma (ou módulo) de um dado vetor.

5.3. Estudos de caso

Os estudos de caso tiveram como propósito demonstrar a aplicabilidade da ferramenta proposta neste trabalho durante a etapa de projeto de empreendimentos que envolvam a manipulação, o processo e/ ou o armazenamento de substâncias perigosas (inflamáveis e/ou tóxicas).

De forma a tentar abranger diferentes questões que surgem durante o projeto de uma instalação industrial e que envolvem a variável “risco ao público externo” – tais como qual o melhor arranjo (*layout*) para as unidades que comporão o empreendimento, qual a melhor localização de uma dada unidade quando da expansão de uma instalação industrial existente, ou qual o melhor local em uma dada região para se implantar a instalação em análise – foram propostas, respectivamente, as seguintes situações, as quais foram abordadas em cada um dos estudos de caso:

1) Determinação do melhor *layout* para um novo Terminal Marítimo de líquidos inflamáveis, cuja localização já foi pré-estabelecida;

2) Determinação da melhor localização para um novo Parque de Esferas de GLP a ser construído em uma refinaria já existente;
3) Determinação do melhor local para a instalação de uma estação de tratamento de água a cloro gasoso (Cl_2) para fornecimento de água a uma dada região.

Em todos os estudos de caso abordados, a FUNCAO_AREA definida anteriormente foi utilizada para se calcular a função objetivo em cada uma das situações estudadas.

Entretanto, como cada função objetivo e cada algoritmo "*Simulated Annealing*" é específico para cada estudo de caso, optou-se por apresentar cada um deles durante a descrição dos respectivos estudos, conforme exposto a seguir.

5.3.1 Estudo de Caso 1: Terminal de Líquidos Inflamáveis

Este estudo de caso tem como foco a determinação do melhor arranjo, do ponto de vista do risco ao público externo, para um hipotético Terminal Marítimo de Líquidos Inflamáveis. Este é composto por seis unidades de tancagem distintas, cuja localização e cuja área já foram pré-estabelecidas por questões de logística e proximidade com o mercado consumidor, tendo como ponto de partida um arranjo inicial também já pré-determinado pelos projetistas.

As seis áreas de tancagem armazenam os seguintes produtos: petróleo, gasolina, óleo diesel, querosene de aviação (QAV), óleos lubrificantes e água de lastro de navios (água oleosa). Pelo fato de o Terminal armazenar substâncias perigosas, conforme classificação posteriormente apresentada neste item, e também pelo fato de haver populações próximas à área do empreendimento (em função da proximidade com o mercado consumidor), torna-se imprescindível a determinação do melhor arranjo que corresponda à minimização dos riscos ao público externo.

A Figura 5.9 ilustra as características do Terminal Marítimo e da região em que o mesmo se insere, conforme descrito acima.

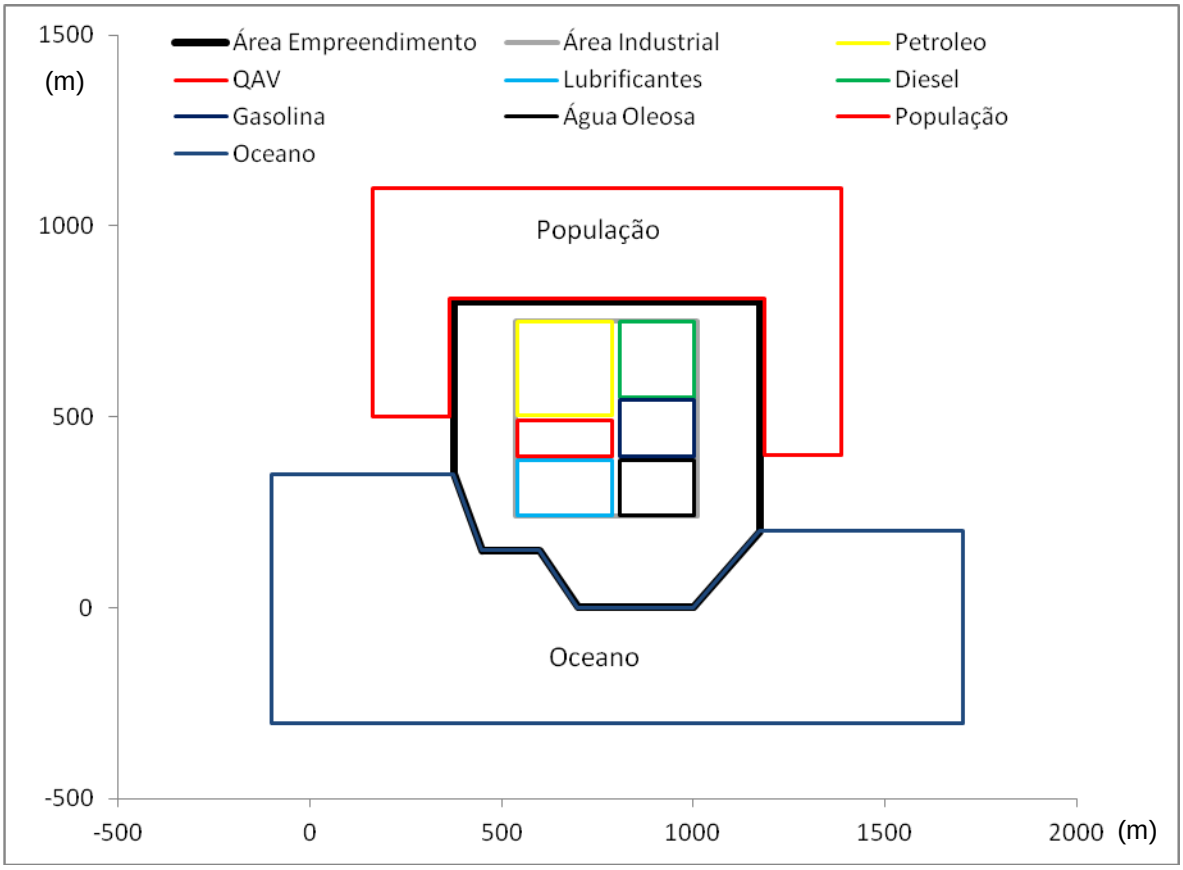


Figura 5.9 Configuração inicial do Terminal Marítimo e circunvizinhanças.

De forma a proceder à análise para a determinação do *layout* que minimiza o risco, é necessário estimar os alcances acidentais de cada uma das unidades que compõem o Terminal. As premissas utilizadas e os resultados obtidos são demonstrados no item a seguir.

5.3.1.1 Estimativa dos Alcances Acidentais

A primeira etapa para se estimar os alcances acidentais referentes às diferentes tancagens analisadas consiste em determinar quais inventários são considerados perigosos do ponto de vista de risco ao público externo. Para tanto, foram utilizados os critérios estabelecidos pelo manual BEVI (RIVM, 2009), apresentados na página 20 do referido documento. Por estes critérios os inventários são classificados de acordo com as respectivas inflamabilidades. Esta classificação, apresentada na Tabela 5.1, tem como base o ponto de fulgor (P.F.) e o ponto de ebulição (P.E.) dos produtos em análise.

Tabela 5.1 Classificação de líquidos inflamáveis conforme manual BEVI.

Categoria	Classificação	Limites
Categoria 0	Extremamente Inflamável	Substâncias ou misturas líquidas com ponto de fulgor inferior a 0^{o}C e ponto de ebulição (ou ponto inicial de ebulição, no caso de misturas) menor ou igual a 35^{o}C.
Categoria 1	Altamente Inflamável	Substâncias ou misturas líquidas com ponto de fulgor inferior a 21^{o}C e que não sejam Extremamente Inflamáveis.
Categoria 2	Inflamável	Substâncias ou misturas líquidas com ponto de fulgor no intervalo 21^{o}C a 55^{o}C.
Categoria 3	-	Substâncias ou misturas líquidas com ponto de fulgor no intervalo 55^{o}C a 100^{o}C.
Categoria 4	-	Substâncias ou misturas líquidas com ponto de fulgor superior a 100^{o}C.

De acordo com o manual em questão, apenas os produtos classificados como inflamáveis, altamente inflamáveis ou extremamente inflamáveis (categorias de 0 a 2) têm potencial de causar danos extramuros, devendo ser consideradas no estudo de risco. Ou seja, é necessário quantificar os alcances acidentais apenas para estes inventários.

Neste âmbito, a Tabela 5.2 apresenta os dados pertinentes e as respectivas classificações dos produtos armazenados no Terminal Marítimo de acordo com os critérios da Tabela 5.1.

Tabela 5.2 Classificação dos inventários presentes no Terminal Marítimo.

Item	Dados	Classificação
Petróleo	P.F. = 7^{o}C	Categoria 1
QAV	P.F. = 40^{o}C	Categoria 2
Lubrificantes	P.F. > 150^{o}C	Categoria 4
Óleo Diesel	P.F. = 38^{o}C	Categoria 2
Gasolina	P.F. = -43^{o}C	Categoria 1
Água Oleosa	Não pertinente	Categoria 4

Com a classificação na Tabela 5.2, verifica-se que apenas os lubrificantes e a água oleosa (categoria 4) representam inventários que não são de interesse, de modo que se admite que os respectivos alcances acidentais são iguais a zero.

Após a constatação das características inflamáveis do petróleo, da gasolina, do QAV e do Óleo Diesel, os respectivos alcances acidentais devem ser estimados. Para tal, é necessário conhecer as variáveis operacionais sob as quais eles são armazenados, bem como os respectivos inventários disponíveis para liberação em caso de acidente e as áreas dos respectivos diques de contenção (uma vez que todos são líquidos). Estas informações estão na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Dados hipotéticos das tancagens que compõem o Terminal.

Item	Inventário por tanque	Número de tanques	Condições de armazenamento	Área dos respectivos diques
Petróleo	65.000 m^3	6	T = 25^oC P = 1 atm	62500 m^2
QAV	20.000 m^3	3		25000 m^2
Lubrificantes	20.000 m^3	6		37500 m^2
Óleo Diesel	30.000 m^3	4		40000 m^2
Gasolina	20.000 m^3	4		30000 m^2
Água Oleosa	10.000 m^3	6		30000 m^2

Com relação aos dados meteorológicos, foram adotados, tanto para este estudo de caso como para os demais, os dados genéricos sugeridos pela Norma CETESB P4.261, de maio de 2003. Estes dados são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 Dados meteorológicos adotados nas simulações.

Parâmetro	Período diurno	Período noturno
Velocidade do vento	3,0 m/s	2,0 m/s
Umidade relativa do ar	80%	80%
Temperatura do ar	25^oC	20^oC
Classe de estabilidade Pasquill	C	E
Temperatura do solo	30^oC	20^oC
Rugosidade do terreno	0.17	0.17

Informa-se ainda que, por se tratar de uma instalação industrial, foi adotado o solo do tipo “concreto” para os cálculos de evaporação de poça de produto inflamável.

Para os cálculos referentes à explosão, foi utilizado o modelo multi-energia com fator de confinamento igual a 0,08 (conforme sugerido pelo *Purple Book*) e curva 5 (valor condizente com as características do local). O centro da explosão foi considerado como sendo igual ao centro da nuvem inflamável.

No que tange ao PROBIT referente a efeitos de radiação, foi utilizada a equação 2.38, conforme sugerido pelo *Purple Book*.

De posse dos dados e das premissas apresentadas, foi utilizado o *software* EFFECTS 9.0.13, desenvolvido pelo TNO, para o cálculo das consequências (alcances acidentais). É interessante destacar que este *software* emprega exatamente as equações do *Yellow Book* e premissas do *Purple Book*, referências citadas anteriormente no capítulo 2 de autoria do próprio TNO.

Ressalta-se ainda que foram simuladas apenas as hipóteses acidentais referentes à ruptura catastrófica de apenas um dos tanques de cada produto analisado, de forma independente. Esta premissa foi adotada pelo fato de que a ruptura dos tanques teoricamente geram os maiores alcances acidentais, e também porque a hipótese de haver ruptura simultânea de dois tanques pertencentes a uma dada tancagem (exemplo: ruptura de dois tanques de petróleo) é extremamente improvável.

Os resultados obtidos para as tipologias acidentais possíveis para líquidos inflamáveis, as quais foram destacadas na árvore de eventos apresentada na Figura 2.6, são apresentados na Tabela 5.5. Os valores de referência apresentados nesta tabela coincidem com aqueles citados na Tabela 2.4.

Tabela 5.5 Alcances acidentais por tipologia.

Tancagem	Alcances (Diurno / Noturno)					
	Incêndio em poça (9,83 kW/m^2)		Flashfire (LII)		Explosão (0,1 bar)	
Petróleo	**340 m**	330 m	-	-	-	-
Óleo Diesel	**300 m**	293 m	-	-	-	-
Gasolina	**260 m**	258 m	-	208 m	-	168 m
QAV	**240 m**	238 m	-	-	-	-
Lubrificantes	-	-	-	-	-	-
Água Oleosa	-	-	-	-	-	-

Por fim, para realização da otimização de *layout* no MATLAB utilizando-se o algoritmo *Simulated Annealing* a seguir, foram adotados como alcances representativos para cada tancagem os valores referentes à tipologia que geraram as maiores repercussões acidentais, destacados em negrito na Tabela 5.5.

5.3.1.2 Algoritmo *Simulated Annealing*

De posse dos alcances acidentais, das características construtivas do Terminal e da configuração da região ao redor do mesmo, o próximo passo para a obtenção do *layout* otimizado é a elaboração da função objetivo e do algoritmo *Simulated Annealing* para minimizá-la.

A função objetivo tem como finalidade contabilizar a Área de Interesse, distinguindo a parcela que atinge a população ao redor do Terminal. Esta segregação se faz necessária porque, além de visar à minimização da área abrangida pelos alcances acidentais que extrapolam os limites da instalação, objetiva-se prioritariamente evitar que estas áreas atinjam a população extramuros.

Assim sendo, a função objetivo nada mais faz do que somar, de forma ponderada, duas contribuições: (i) a intersecção da Área de Interesse com o Polígono Populacional; e (ii) Área de Interesse sem intersecção com o Polígono Populacional (ou seja, traçando-se um paralelo entre este estudo de caso e o exemplo mostrado na Figura 5.8, somam-se ponderadamente as áreas representadas pelos pontos verdes e pelos pontos vermelhos). As áreas em questão

são obtidas mediante a utilização da FUNCAO_AREA descrita anteriormente. A equação 5.5 apresenta a definição da função objetivo FOB:

$$FOB = \left\{ \left[\sum_{i=1}^{numpop} \left(fator_i . npop_i \right) + fator_{comp} \cdot \left(narea_{\text{int}} - \sum_{i=1}^{npop} npop_i \right) \right] / ntotal \right\} . area_ret \quad ,(5.5)$$

Em que:

$numpop$	Número de áreas com população presentes no entorno da instalação.
$fator_i$	Fator de ponderação para cada área de população “i” (proporcional à respectiva densidade populacional)
$npop_i$	Número de pontos situados no interior de cada área de população “i”.
$fator_{comp}$	Fator de ponderação para a área de interesse complementar às áreas com população
$narea_{int}$	Número de pontos situados na área de interesse.
$ntotal$	Número total de pontos.
$area_ret$	Área do Retângulo Base determinado pela FUNCAO_AREA.

Ressalta-se que no presente algoritmo o oceano situado ao sul do Terminal foi considerado como “área populacional” com $fator_i$ nulo ($fator_i = 0$), uma vez que não há habitações permanentes (população fixa) nesta área.

Após apresentação da função objetivo, a próxima etapa é definir o próprio algoritmo *Simulated Annealing*. Analisando-se o Algoritmo 2 apresentado no capítulo 4, é necessário completá-lo determinando-se a função PERTURB, a qual tem a finalidade de gerar um novo *layout*, de forma aleatória, a partir do arranjo referente à iteração anterior, permitindo a avaliação da sua respectiva função objetivo e a submissão do valor obtido ao critério de Metropolis.

Neste sentido, foram propostos basicamente três movimentos possíveis para as unidades que compõem o *layout* em análise:

1) Rotação em 90º de uma das unidades, a qual é selecionada aleatoriamente. O sentido de rotação é irrelevante, sendo feita com respeito ao centro geométrico da unidade;
2) Translação de uma das unidades, a qual é selecionada aleatoriamente;
3) Troca de posição entre duas unidades selecionadas aleatoriamente.

Tais movimentos são executados de forma excludente em cada iteração, ou seja, só é permitido fazer um movimento dos três citados acima por iteração. Além disso, a seleção de qual movimento será executado também é feita de forma aleatória utilizando-se sorteios de igual probabilidade com a função *rand* do MATLAB. É importante destacar ainda que as unidades foram consideradas independentes, não havendo relações de interdependência entre elas.

Adicionalmente, também é importante destacar que todos os movimentos são restritos à área industrial previamente definida no *layout*, a qual está destacada em cinza nas Figuras 5.9 e 5.10. Desta forma, caso, por exemplo, seja selecionada uma dada unidade e escolhido que a mesma efetuará o movimento de translação, se as coordenadas finais após o movimento excederem a área industrial, o algoritmo retornará a unidade aos limites definidos pela área industrial, mas de tal forma que a mesma se situe no local mais próximo possível às coordenadas geradas anteriormente. A Figura 5.10 exemplifica isto para a unidade de tancagem de gasolina, bem como um movimento de rotação para a tancagem de QAV.

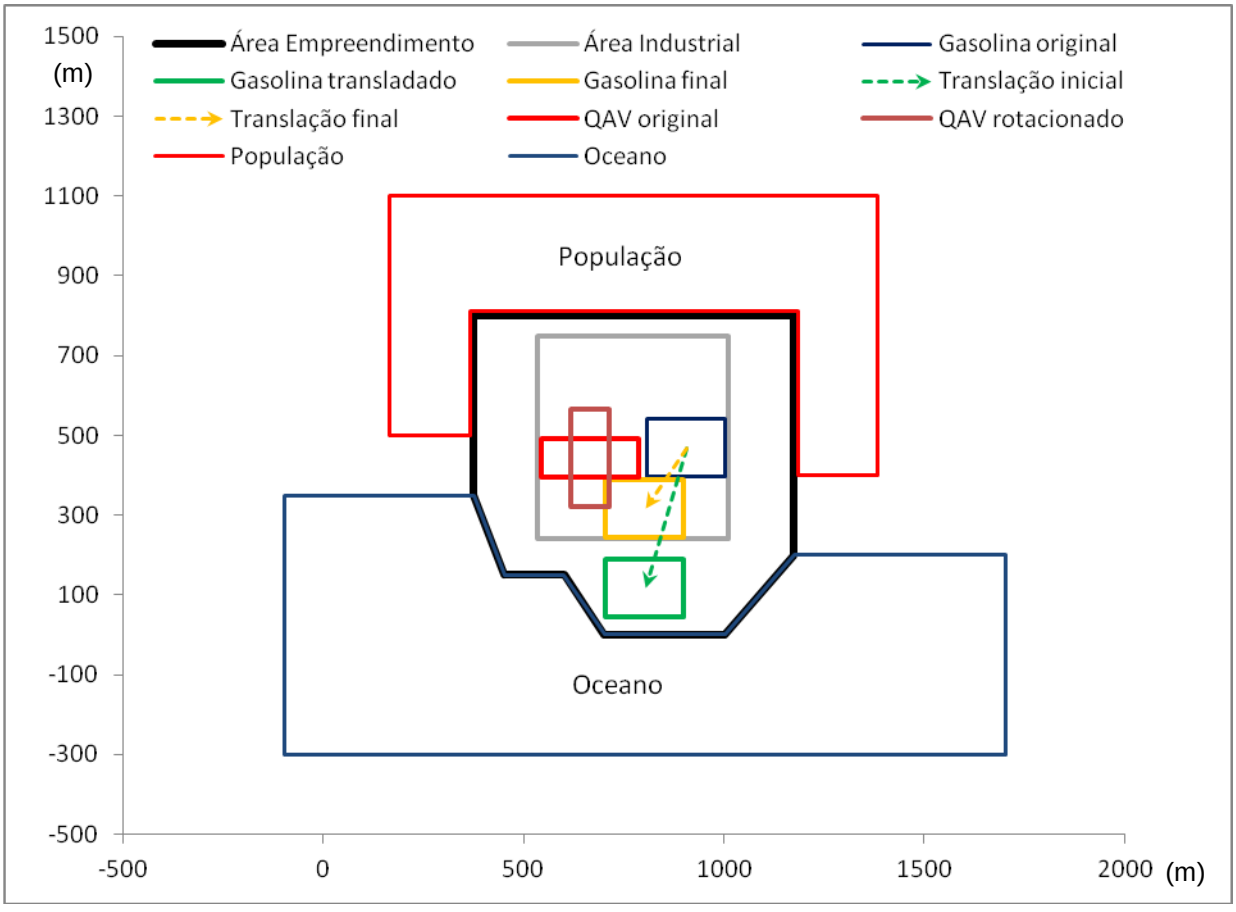


Figura 5.10 Exemplo dos movimentos de rotação e de translação propostos.

Destaca-se que a restrição é aplicada não só à translação das unidades, mas também aos demais movimentos possíveis (rotação e troca de posições de unidades). A seguir são apresentados os respectivos algoritmos para as três movimentações possíveis de unidades. Em todos os algoritmos o termo *rand* corresponde a um escalar de ponto flutuante no intervalo [0,1) gerado aleatoriamente pela função *rand* do MATLAB R12. Para a obtenção de *n* números inteiros gerados aleatoriamente no intervalo [n_1,n_2], sendo n_1 e n_2 dois números inteiros quaisquer, foi utilizada uma variação da função rand, denominada *randint*(1,*n*,[n_1,n_2]).

Algoritmo 5: Algoritmo para rotação de unidades

Finalidade: Rotação da unidade selecionada

Entradas:

dimensoes_unid: matriz de 2 linhas contendo as dimensões horizontal (linha 1) e vertical (linha 2) das unidades em análise.

unid_selec: número da unidade selecionada.

Saídas:

dimensoes_unid_rot: matriz dimensoes_unid atualizada, contendo a rotação da unidade selecionada.

Algoritmo:

```
1  dimensoes_unid_rot = dimensoes_unid
2  dimensões_unid_rot(1, unid_selec) =  dimensoes_unid(2, unid_selec)
3  dimensões_unid_rot(2, unid_selec) =  dimensoes_unid(1, unid_selec)
```

Algoritmo 6: Algoritmo para translação de unidades

Finalidade: Translação da unidade selecionada

Entradas:

centro_unid: matriz de 2 linhas contendo as coordenadas x (linha 1) e y (linha 2) dos centros das unidades em análise.

coord_area_ind: matriz de 2 linhas contendo as coordenadas x (linha 1) e y (linha 2) dos pontos do polígono que define a área industrial

unid_selec: número da unidade selecionada.

Saídas:

centro_unid_trans: matriz centro_unid atualizada, contendo a translação da unidade

selecionada.

Algoritmo:

1 centro_unid_trans = centro_unid

angulo_trans = 2.π.*rand*

aresta_horizontal_ind = max(coord_area_ind(1,:)) – min(coord_area_ind(1,:))

aresta_vertical_ind = max(coord_area_ind(2,:)) – min(coord_area_ind(2,:))

passo_trans = max([aresta_horizontal_ind aresta_vertical_ind]).*rand*

2 centro_unid_trans(1, unid_selec) = centro_unid(1, unid_selec) + passo_trans cos(angulo_trans)

3 centro_unid_trans(2, unid_selec) = centro_unid(2, unid_selec) + passo_trans sen(angulo_trans)

Algoritmo 7: Algoritmo para intercâmbio de posição de unidades

Finalidade: Realizar a troca de posição de duas unidades selecionadas

Entradas:

centro_unid: matriz de 2 linhas contendo as coordenadas x (linha 1) e y (linha 2) dos centros das unidades em análise.

unids_selec: vetor contendo os números das 2 unidades distintas selecionadas.

Saídas:

centro_unid_troca: matriz centro_unid atualizada, contendo as coordenadas das unidades selecionadas já trocadas.

Algoritmo:

1 centro_unid_troca = centro_unid

2 centro_unid_troca (1, unids_selec(1)) = centro_unid(1, unids_selec(2))

centro_unid_troca (1, unids_selec(2)) = centro_unid(1, unids_selec(1))

centro_unid_troca (2, unids_selec(1)) = centro_unid(2, unids_selec(2))

centro_unid_troca (2, unids_selec(2)) = centro_unid(2, unids_selec(1))

Algoritmo 8: Algoritmo para verificar se as unidades estão na Área Industrial

Finalidade: Verificar se todas as unidades, após realização de uma das movimentações citadas anteriormente, estão contidas na área industrial. Na versão atual este Algoritmo 8 é restrito a ser a Área Industrial de forma retangular.

Entradas:

centro_unid: matriz de 2 linhas contendo as coordenadas x (linha 1) e y (linha 2) dos

centros das unidades em análise.

dimensoes_unid: matriz de 2 linhas contendo as dimensões horizontal (linha 1) e vertical (linha 2) das unidades em análise.

coord_area_ind: matriz de 2 linhas contendo as coordenadas x (linha 1) e y (linha 2) dos pontos do retângulo que define a área industrial.

num_unidades: número de unidades que compõem o Terminal.

Saídas:

centro_unid_verif: matriz centro_unid atualizada, contendo as coordenadas das unidades em análise todas dentro da área industrial.

Algoritmo:

```
1  centro_unid_verif = centro_unid
   limite_inferior_x = min(coord_area_ind(1,:))
   limite_superior_x = max(coord_area_ind(1,:))
   limite_inferior_y = min(coord_area_ind(2,:))
   limite_superior_y = max(coord_area_ind(2,:))
2  Para i = 1 até num_unidades
     a. Se centro_unid_verif(1,i) < limite_inferior_x + dimensoes_unid(1,i) / 2
            centro_unid_verif(1,i) = limite_inferior_x + dimensoes_unid(1,i) / 2
     b. Se centro_unid_verif(1,i) > limite_superior_x - dimensoes_unid(1,i) / 2
            centro_unid_verif(1,i) = limite_superior_x - dimensoes_unid(1,i) / 2
     c. Se centro_unid_verif(2,i) < limite_inferior_y + dimensoes_unid(2,i) / 2
            centro_unid_verif(2,i) = limite_inferior_y + dimensoes_unid(2,i) / 2
     d. Se centro_unid_verif(2,i) > limite_superior_y - dimensoes_unid(2,i) / 2
            centro_unid_verif(2,i) = limite_superior_y - dimensoes_unid(2,i) / 2
```

Outra característica importante da otimização SA de *layouts* é que há a possibilidade de unidades se sobreporem ao ocorrerem os movimentos citados nos Algoritmos 5, 6, 7 e 8. Apesar de isto ser aceitável durante o processo de otimização (pois quanto mais entropia gerada, maior é a chance de se atingir o ótimo global), o *layout* final não pode apresentar sobreposição de unidades, pois isto é fisicamente impossível. Neste contexto, foi proposta uma complementação da função objetivo FOB, de forma a penalizar as parcelas das áreas das unidades que se sobrepõem. Esta complementação nada mais é do que a soma de tais áreas ponderadas por um $fator_{sobrep}$ de magnitude maior do que os fatores empíricos propostos anteriormente,

uma vez que é aceitável no *layout* otimizado que os alcances ainda atinjam a população, mas é inadmissível haver sobreposição de unidades.

Portanto, a função objetivo final (FOB_{final}) de fato utilizada no processo de minimização está representada a seguir:

$$FOB_{final} = FOB + fator_{sobrep} \sum areas_unids_{sobrep}, \quad (5.6)$$

Em que:

FOB	Parcela da função objetivo definida na equação 5.5.
$fator_{sobrep}$	Fator de ponderação para as áreas das unidades que se sobrepõem.
$areas_unids_{sobrep}$	Áreas das unidades que se sobrepõem, as quais também são calculadas pela FUNCAO_AREA.

A Tabela 5.6 explicita os valores dos fatores de ponderação empíricos utilizados no Estudo de Caso 1.

Tabela 5.6 Fatores de ponderação pertinentes ao Estudo de Caso 1.

Fator de Ponderação	Valor
Área populacional ($fator_{i_pop}$ – Eq. 5.5)	10
Área ocupada pelo oceano ($fator_{i_oceano}$ – Eq. 5.5)	0
Área de interesse complementar ($fator_{comp}$ – Eq. 5.5)	1
Áreas de sobreposição das unidades ($fator_{sobrep}$ – Eq. 5.6)	100

Definidas as movimentações possíveis das unidades e da própria função objetivo, o passo final é a explanação referente do algoritmo *Simulated Annealing*.

Analisando-se o Algoritmo 2 apresentado no Capítulo 4, nota-se que há a necessidade de explicação dos critérios que definem:

1) Quando o equilíbrio é atingido para um dado valor do parâmetro de controle "c";
2) Quando o critério de parada é satisfeito.

Considerou-se que o equilíbrio é atingido em um dado nível do parâmetro "c" caso seja gerada uma configuração favorável (incumbente) e nas 50 iterações

subsequentes não seja obtida nenhuma outra mais favorável segundo o critério de Metropolis, considerando-se um máximo de 100 iterações possíveis em um dado nível do parâmetro de controle "c". Ou seja, o algoritmo passará para o próximo valor "c" se ocorrerem 100 iterações no valor atual de "c"; ou se a configuração incumbente se mantiver imutável no nível "c" por 50 iterações consecutivas.

Além disso, como critério de término do algoritmo, admitiu-se que a configuração ótima terá sido atingida quando o parâmetro de controle "c" se tornar menor que o valor final pré-estipulado; ou se a configuração incumbente se mantiver imutável após 500 iterações consecutivas.

Os parâmetros para a otimização *Simulated Annealing* do Estudo de Caso 1 estão na Tabela 5.7. O parâmetro "c" segue a proposição original de Metropolis conforme a equação 5.7. A taxa de resfriamento na Tabela 5.7 diz respeito à função f citada no Capítulo 4 responsável por reduzir gradativamente o parâmetro de controle, sendo adotada a forma mostrada na equação 5.8.

$$c = k_B T \tag{5.7}$$

$$T_{i+1} = \alpha_r T_i \tag{5.8}$$

Tabela 5.7 Parâmetros pertinentes à otimização *Simulated Annealing*.

Parâmetro	Valor
Temperatura Inicial (T_o)	500
Temperatura Final (T_{final})	T_o / 1000
"Constante de Boltzmann" (k_B)	1000
Taxa de resfriamento (α_r)	0.95

Definidas todas as premissas para a elaboração do algoritmo SA, o mesmo é apresentado no Algoritmo 9 a seguir.

Algoritmo 9: *Simulated Annealing* – Estudo de Caso 1

Finalidade: Minimizar a função objetivo FOB_{final}

Entradas:

coord_emp: matriz de coordenadas do polígono da área do empreendimento.

coord_pop: matriz de coordenadas das áreas de população e do oceano.

coord_area_ind: matriz contendo as coordenadas da área industrial.

centro_unid: matriz de coordenadas dos centros das unidades em análise.

dimensoes_unid: matriz contendo as dimensões das unidades.

alcances: vetor contendo os respectivos alcances de cada unidade.

num_unids: número de unidades de tancagem analisadas.

Fatores apresentados na Tabela 5.6 e parâmetros constantes na Tabela 5.7.

Saída:

centro_unid_ot: matriz de coordenadas otimizadas dos centros das unidades.

dimensoes_unid_ot: matriz com as dimensões correspondentes às coordenadas otimizadas dos centros das unidades.

Algoritmo:

1 areas = FUNCAO_AREA(num_unids, dimensoes_unid, centro_unid, alcances)

   a. Fob = FOB_{final}(areas)
   b. centro_unid_ot = centro_unid
   c. dimensoes_unid_ot = dimensoes_unid
   d. i = 0, j = 0

2 **Enquanto** T > T_{final} & j < 500

   a. i = i + 1
   b. **Se** i > 100 ou it_rej_eq > 50
      I. T = α_r T
      II. i = 1, it_rej_eq = 0
   c. movimentacao = *randint*(1,1,[0,2])
      I. centro_unid_iteracao = centro_unid_ot
      II. dimensoes_unid_iteracao = dimensoes_unid_ot
   d. **Se** movimentação = 0
      I. unid_selec = *randint*(1,1,[1,num_unids])

% Executar rotação com a unidade selecionada

      II. dimensoes_unid_iteracao = ALGORITMO_5 (unid_selec)

   e. **Se** movimentação = 1
      I. unid_selec = *randint*(1,1,[1,num_unids])

%Executar translação com a unidade selecionada

      II. centro_unid_iteracao = ALGORITMO_6 (unid_selec)

   f. **Se** movimentação = 2

I. unids_selec = *randint*(1,2,[1,num_unids])

II. **Enquanto** unids_selec (1) = unids_selec(2)

i. unids_selec = *randint*(1,2,[1,num_unids])

%Executar troca de unidades com as que foram selecionadas

III. centro_unid_iteracao = ALGORITMO_7 (unids_selec)

%Verificar se as unidades estão dentro da área industrial

g. centro_unid_iteracao = ALGORITMO_8(centro_unid_iteracao)

h. areas_iteracao = FUNCAO_AREA(num_unids, dimensoes_unid_iteracao, centro_unid_iteracao, alcances)

i. $Fob_{iteracao}$ = FOB(areas_iteracao)

j. Delta_Fob = $Fob_{iteracao}$ – Fob

k. **Se** Delta_FOB < 0

I. centro_unid_ot = centro_unid_iteracao

II. dimensoes_unid_ot = dimensoes_unid_iteracao

III. Fob = $Fob_{iteração}$

IV. j = 0

l. **Senão se** Delta_FOB >= 0

%Aplicação do critério de Metropolis

I. **Se** exp(-Delta_FOB / (k_B.T)) > *rand*

i. centro_unid_ot = centro_unid_iteracao

ii. dimensoes_unid_ot = dimensoes_unid_iteracao

iii. Fob = $Fob_{iteração}$

iv. j = 0

II. **Senão**

i. j = j + 1

ii. it_rej_eq = it_rej_eq + 1

5.3.2 Estudo de Caso 2 – Novo Parque de Esferas de GLP

O Estudo de Caso 2 tem como meta a determinação da melhor localização, do ponto de vista do risco ao público externo, para um novo Parque de Esferas a ser construído em uma refinaria hipotética já existente. Assim como no Estudo de Caso 1, o ponto de partida consiste no arranjo existente da instalação industrial em questão, contendo a indicação pré-determinada do Parque de Esferas segundo

critérios estabelecidos pelos projetistas responsáveis. A Figura 5.11 ilustra a refinaria, sua região de inserção e a localização pré-definida do Parque de Esferas.

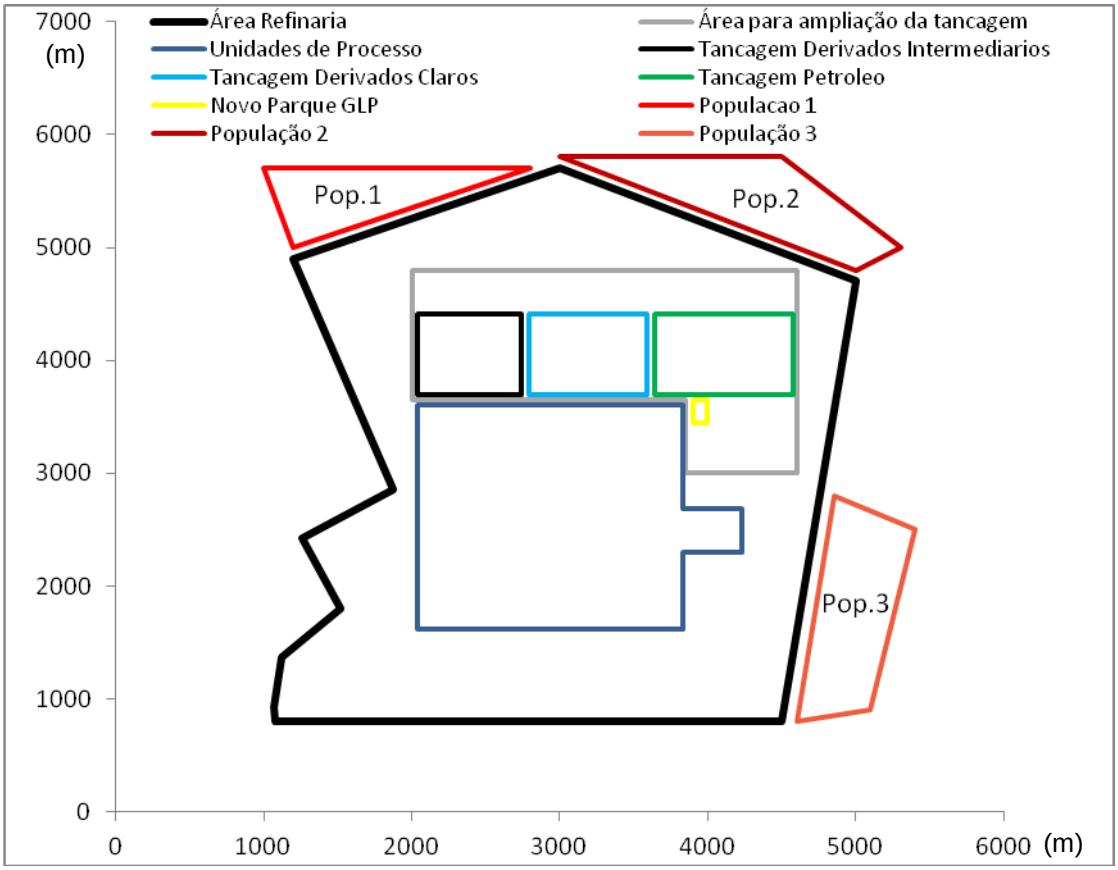


Figura 5.11 Refinaria, circunvizinhanças e localização inicial do Parque de Esferas.

Da mesma forma que no Estudo de Caso 1, a análise da melhor localização para o Parque de Esferas se faz necessária devido à proximidade da população aos limites do empreendimento, sendo importante a determinação da melhor configuração durante a etapa de projeto da nova tancagem de GLP.

O primeiro passo para iniciar tal análise é a estimativa dos alcances acidentais para o Parque de Esferas, conforme descrito a seguir.

5.3.2.1 Estimativa dos alcances acidentais

Como a presente análise é focada no Parque de Esferas, uma vez que as demais unidades de tancagem / processo já existem fisicamente e, portanto, não possuem flexibilidade de mudança de localização, o único produto de interesse é o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). Assim, para efeito de otimização, os alcances referentes às demais unidades foram considerados nulos.

De acordo com as premissas do BEVI apresentadas na Tabela 5.1, o GLP é classificado como de categoria 0, uma vez que se trata de um gás liquefeito inflamável cujo ponto de ebulição é igual a 2^{o}C e cujo ponto de fulgor é menor que -60^{o}C, dependendo da sua composição.

No que se refere às variáveis operacionais do GLP dentro das três esferas que compõem o novo Parque, o produto é armazenado a uma pressão de 15bar e à temperatura de 25^{o}C, tendo cada esfera volume total de 3200 m^{3}.

As demais premissas pertinentes aos cálculos das consequências, referentes aos dados meteorológicos, tipo de solo, parâmetros para cálculos de explosão e equação de PROBIT foram mantidas idênticas às do Estudo de Caso 1. Além disto, pelo mesmo motivo exposto para o estudo de caso anterior, os alcances acidentais foram calculados considerando-se a ruptura catastrófica de apenas uma das esferas, supondo-se que a mesma estivesse com inventário igual à sua capacidade máxima operacional.

Por fim, os resultados obtidos para as tipologias acidentais possíveis para liberações instantâneas de gases liquefeitos – as quais foram destacadas na árvore de eventos apresentada na Figura 2.5 – são apresentados na Tabela 5.8. Os valores de referência apresentados nesta tabela coincidem com aqueles da Tabela 2.4.

Tabela 5.8 Alcances acidentais por tipologia.

Tancagem	Alcances (Diurno / Noturno)					
	Bola de Fogo (9,83 kW/m^{2})		Flashfire (LII)		Explosão (0,1 bar)	
GLP	1080 m	**1110 m**	910 m	960 m	640 m	610 m

À semelhança do que foi adotado para o Terminal Marítimo, o alcance representativo utilizado na otimização *Simulated Annealing* neste estudo de caso é aquele que apresenta o maior valor, o qual foi destacado em negrito na Tabela 5.8.

5.3.2.2 Algoritmo *Simulated Annealing*

O algoritmo *Simulated Annealing* construído para o Estudo de Caso 2 é semelhante ao utilizado no Estudo de Caso 1, excetuando-se a adoção dos dados específicos do caso: características construtivas, configuração das circunvizinhanças

e alcances acidentais. Nos demais aspectos as premissas de cálculo são as anteriores.

A função objetivo empregada é exatamente a descrita pela equação 5.6. Porém, como agora não existe o oceano e há um maior número de áreas populacionais próximas, foi necessário definir fatores de ponderação distintos daqueles da Tabela 5.6. Adicionalmente, tais áreas populacionais apresentam densidades demográficas distintas. Os fatores adotados para o Estudo de Caso 2 são mostrados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 Fatores de ponderação pertinentes ao Estudo de Caso 2.

Fator de Ponderação	Valor
Área populacional 1 ($fator_{i_pop1}$ – Eq. 5.5)	10
Área populacional 2 ($fator_{i_pop2}$ – Eq. 5.5)	20
Área populacional 3 ($fator_{i_pop3}$ – Eq. 5.5)	5
Área de interesse complementar ($fator_{comp}$ – Eq. 5.5)	1
Áreas de sobreposição das unidades ($fator_{sobrep}$ – Eq. 5.6)	100

No que tange aos movimentos possíveis das unidades durante o processo de otimização, em função das características da instalação em análise somente é permitida mobilidade ao Parque de Esferas, uma vez que as demais unidades por hipótese já existem fisicamente.

Destarte, dos três movimentos propostos no estudo de caso anterior, dois deles, rotação e translação, foram mantidos e permitidos apenas ao Parque de Esferas de GLP, não sendo possível, portanto, a troca de posição entre as unidades existentes e entre as mesmas e o Parque. Com relação à área disponível para ampliação da tancagem (analogamente correspondente à “área industrial” do Estudo de Caso 1), foi mantida a premissa de que a localização do Parque de Esferas é restrita a esta área. Porém, como há a limitação no algoritmo SA proposto de que a mesma seja retangular (não sendo possível representá-la no algoritmo no formato em “L” da Figura 5.11), foi considerada a área equivalente vista na Figura 5.12.

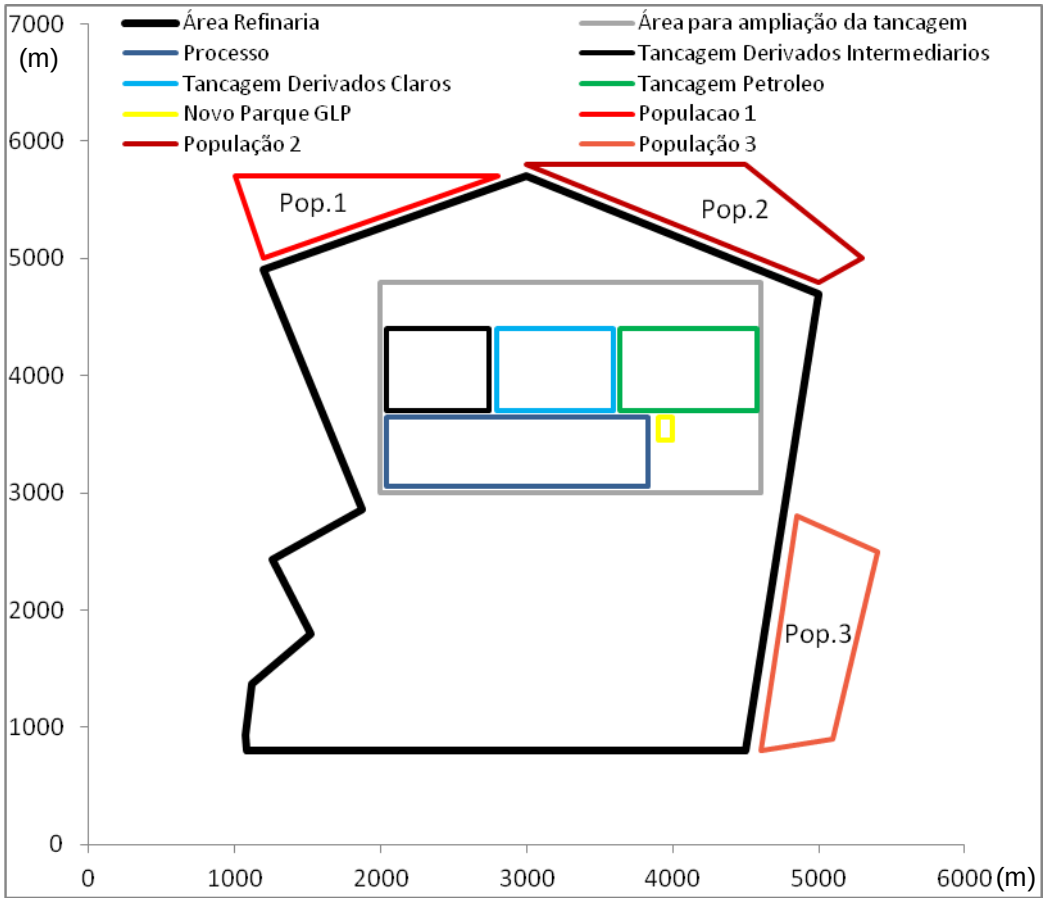


Figura 5.12 Área disponível para implantação do Parque de Esferas.

As demais premissas do algoritmo *Simulated Annealing* foram mantidas, inclusive as que dizem respeito aos parâmetros da Tabela 5.7. O Algoritmo 10 apresenta esquematicamente a rotina de cálculo para a otimização SA do Estudo de Caso 2.

Algoritmo 10: Algoritmo *Simulated Annealing* – Estudo de Caso 2

Finalidade: Minimizar a função objetivo FOB_{final}

Entradas:

coord_emp: matriz de coordenadas do polígono da área da refinaria.

coord_pop: matriz de coordenadas das áreas de população.

coord_area_tan: matriz com as coordenadas da área de ampliação da tancagem

centro_unid: matriz de coordenadas dos centros das unidades em análise.

dimensoes_unid: matriz contendo as dimensões das unidades.

alcances: vetor com os alcances de cada unidade.

num_unids: número de unidades presentes na área de ampliação.

Fatores apresentados na Tabela 5.9 e parâmetros constantes na Tabela 5.7.

Saída:

centro_unid_ot: matriz de coordenadas otimizadas dos centros das unidades.

dimensoes_unid_ot: matriz com as dimensões correspondentes às coordenadas otimizadas dos centros das unidades.

Algoritmo:

1 areas = FUNCAO_AREA(num_unids, dimensoes_unid, centro_unid, alcances)

a. Fob = FOB_{final}(areas)
b. centro_unid_ot = centro_unid
c. dimensoes_unid_ot = dimensoes_unid
d. i = 0, j = 0

2 **Enquanto** T > T_{final} & j < 500

a. i = i + 1
b. **Se** i > 100 ou it_rej_eq > 50
   I. T = α_r T
   II. i = 1, it_rej_eq = 0
c. movimentacao = *randint*(1,1,[0,1])
   I. centro_unid_iteracao = centro_unid_ot
   II. dimensoes_unid_iteracao = dimensoes_unid_ot
d. **Se** movimentação = 0
   I. unid_selec = 1

% Executar rotação com a unidade selecionada

   II. dimensoes_unid_iteracao = ALGORITMO_5 (unid_selec)

e. **Se** movimentação = 1
   I. unid_selec = 1

%Executar translação com a unidade selecionada

   II. centro_unid_iteracao = ALGORITMO_6 (unid_selec)

%Verificar se a unidade está dentro da área industrial

f. centro_unid_iteracao = ALGORITMO_8(centro_unid_iteracao)
g. areas_iteracao = FUNCAO_AREA(num_unids, dimensoes_unid_iteracao, centro_unid_iteracao, alcances)
h. $Fob_{iteracao}$ = FOB(areas_iteracao)
i. Delta_Fob = $Fob_{iteracao}$ – Fob
j. **Se** Delta_FOB < 0

I. centro_unid_ot = centro_unid_iteracao
II. dimensoes_unid_ot = dimensoes_unid_iteracao
III. Fob = $Fob_{iteração}$
IV. j = 0

k. **Senao se** Delta_FOB >= 0

%Aplicação do critério de Metropolis

I. **Se** exp(-Delta_FOB / (k_B.T)) > *rand*
    i. centro_unid_ot = centro_unid_iteracao
    ii. dimensoes_unid_ot = dimensoes_unid_iteracao
    iii. Fob = $Fob_{iteração}$
    iv. j = 0
II. **Senão**
    i. j = j + 1
    ii. it_rej_eq = it_rej_eq + 1

5.3.3 Estudo de Caso 3 – Estação de Tratamento de Água

O Estudo de Caso 3 é filosoficamente diferente dos anteriores, uma vez que o objetivo é determinar a melhor localização, do ponto de vista do risco ao público externo, de uma hipotética Estação de Tratamento de Água a cloro gasoso (Cl_2) em uma dada região habitada. Ou seja, neste caso não se visa determinar o *layout* ótimo da instalação por meio da mudança da localização de suas unidades, mas sim definir o melhor local para se construir o empreendimento em uma dada região, mantendo-se fixo o seu *layout*.

Esta mudança de filosofia se deve, principalmente, ao fato do valor do alcance acidental gerado para a hipótese referente à ruptura de um cilindro de cloro ser muito superior às dimensões do polígono que define a área do empreendimento, de forma que é inútil tentar restringir as repercussões acidentais à referida área.

Além disso, outro fator importante e que é pertinente apenas a este estudo de caso consiste na distância entre o local onde se localizará o empreendimento e a adutora que fornecerá a água a ser tratada com o cloro na Estação. Quanto maior for esta distância, maiores serão o custo fixo (extensão do ramal de interligação da instalação à adutora e porte da bomba) e o custo variável (energia necessária ao bombeamento, manutenção da bomba, etc) associados a este empreendimento.

Partindo-se destes pressupostos, a Figura 5.13 ilustra as características da região na qual será inserida a Estação de Tratamento, bem como a localização previamente determinada para esta instalação segundo outros critérios de projeto.

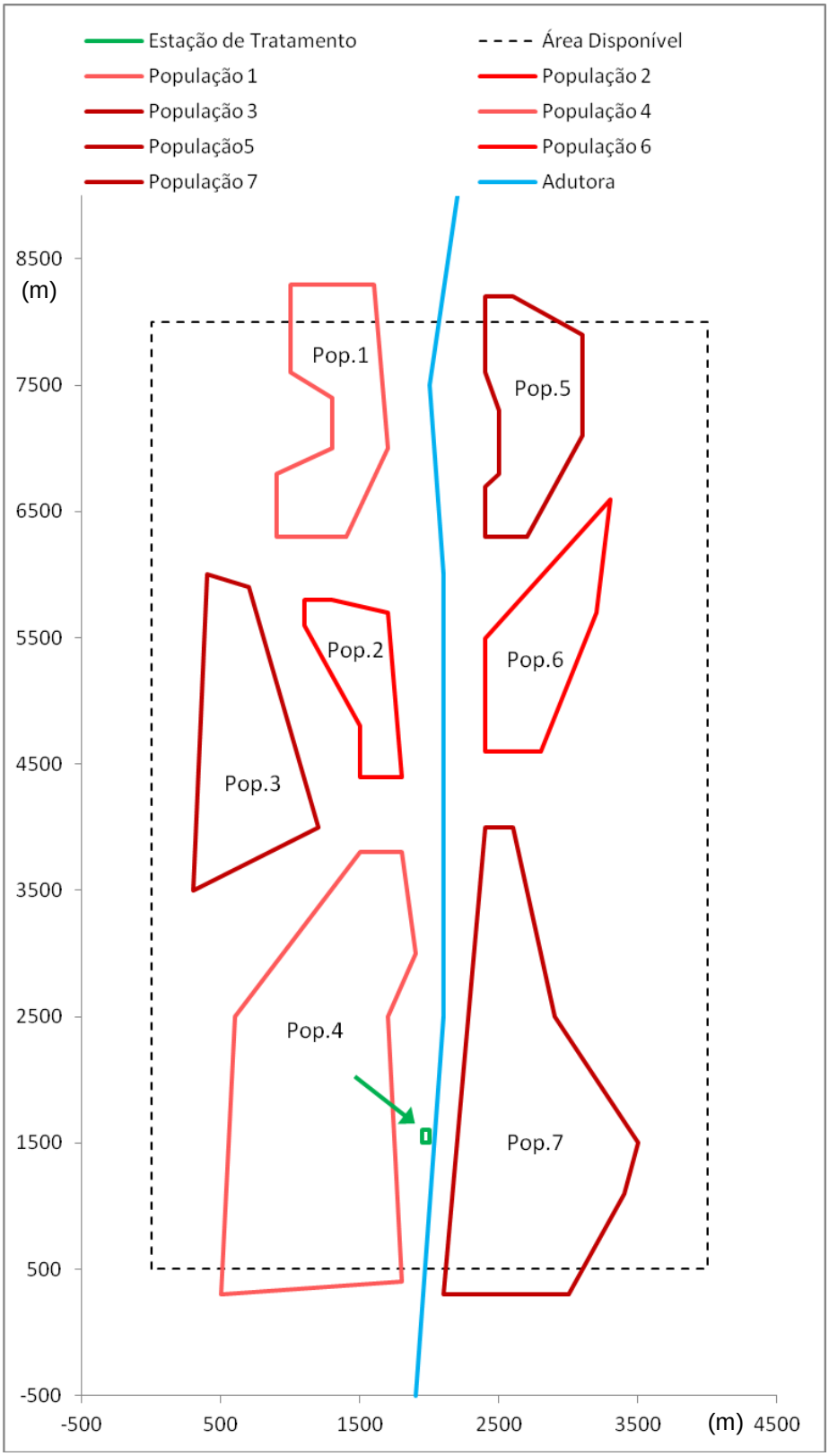


Figura 5.13 Estação de Tratamento de Cloro e circunvizinhanças.

Como se nota pela Figura 5.13, por se tratar de uma região densamente povoada, torna-se importante a determinação da melhor localização para a Estação de Tratamento de Água durante a etapa de projeto. Para tanto, foi realizada a estimativa dos alcances acidentais para a instalação em questão, conforme descrito a seguir.

5.3.3.1 Estimativa dos alcances acidentais

Em função de cloro (Cl_2) ser o único produto químico presente na Estação de Tratamento em quantidade e periculosidade suficientes para causar danos ao público externo, só há necessidade de cálculo de alcances acidentais associados a este produto.

Diferentemente dos outros produtos tratados anteriormente, a periculosidade do cloro está associada à toxicidade, e não à inflamabilidade. Neste caso, segundo preconizado no manual da CETESB (CETESB, 2003), os parâmetros que devem ser analisados para definir o nível de toxicidade de uma dada substância consistem na pressão de vapor a 25^{o}C (que deve ser maior que 10 mmHg) e a concentração letal 50 (CL_{50}), via respiratória, para rato ou camundongo. As categorias de toxicidades definidas pela CETESB são apresentadas na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 Classificação de substâncias tóxicas conforme manual da CETESB.

Nível de toxicidade	C (ppm.h)
4 – Muito tóxica	C < 500
3 – Tóxica	500 < C < 5000
2 – Pouco tóxica	5000 < C < 50000
3 – Praticamente não tóxica	50000 < C < 150000

Na Tabela 5.10, o parâmetro C refere-se à integral de concentração (ppm) no tempo (h) de exposição, correspondendo ao produto entre o valor CL_{50} característico da substância e o tempo de exposição sob esta concentração. Os respectivos valores destas grandezas, definidas para o cloro pelo Instituto Nacional da Segurança e Saúde Ocupacional dos Estados Unidos (NIOSH), bem como o valor da pressão de vapor desta substância a 25^{o}C e sua classificação segundo os critérios definidos na Tabela 5.10 estão relacionados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 Classificação do cloro segundo a sua toxicidade.

Substância	Dados	Classificação
Cloro	CL_{50} (camundongo, 1 hora) = 137 ppm C = 137 ppm . 1 h = 137 ppm.h Pressão da vapor (25^{o}C) = 5842 mmHg	4 – Muito Tóxica

No que se refere às condições operacionais nas quais o cloro é armazenado nos 4 cilindros que compõem a Estação de Tratamento de Água, o produto é mantido a uma pressão de aproximadamente 8 bar e temperatura de 25^{o}C. Além disso, cada cilindro tem um inventário de cloro igual a 900 kg.

Evidentemente, não foram adotadas premissas referentes ao cálculo de explosão, uma vez que o produto não é inflamável. Com relação à equação de PROBIT para o cálculo da vulnerabilidade das pessoas ao cloro, foi utilizada a equação disponibilizada pelo manual do BEVI (RIVM, 2009):

$$\Pr = -6{,}35 + 0{,}5 \ln \int_0^t C^{2,75} dt \,, \tag{5.9}$$

Em que:

C Concentração do produto no ambiente, em mg/m^3.

t Tempo de exposição à concentração C, em minutos.

Adicionalmente, para os cálculos dos alcances acidentais adotou-se 10 minutos como tempo máximo de exposição à nuvem tóxica, conforme preconizado pelo manual da CETESB (CETESB, 2003). As demais premissas pertinentes aos cálculos das consequências, referentes aos dados meteorológicos e tipo de solo foram mantidas idênticas às estabelecidas para os estudos anteriores. Além disso, pelo mesmo motivo exposto nos casos anteriores, os alcances acidentais foram calculados considerando-se ruptura catastrófica de apenas um dos cilindros com quantidade de cloro igual à capacidade máxima (900 kg).

Os resultados obtidos para nuvens tóxicas referentes a liberações instantâneas de gás cloro são apresentados na Tabela 5.12. Os valores de dose correspondentes à vulnerabilidade de 1%, considerando-se 10 minutos como limite máximo de exposição, foram determinados internamente pelo *software* EFFECTS.

Tabela 5.12 Alcances acidentais para nuvem tóxica de cloro.

Tancagem	Alcances (Diurno / Noturno)	
	Nuvem tóxica (dose referente a 1% de letalidade)	
Cloro	340 m	**565 m**

De forma semelhante ao que foi adotado para o Terminal Marítimo e para a Refinaria, o alcance representativo utilizado na otimização *Simulated Annealing* no Estudo de Caso 3 é aquele destacado em negrito na Tabela 5.12 (maior valor).

5.3.3.2 Algoritmo *Simulated Annealing*

A principal característica do algoritmo do Estudo de Caso 3, e que difere dos demais, consiste em permitir a movimentação da instalação industrial em análise na região em que a mesma se encontra em meio às áreas populacionais presentes. Além disso, tal movimentação tem como limites a área demarcada pelo retângulo tracejado na Figura 5.13 (denominada área disponível) e a distância máxima entre o traçado da adutora e o ponto onde se situará a instalação.

Entretanto, os Algoritmos 5 e 6, referentes aos movimentos de rotação e translação, continuam sendo válidos para este caso. Porém, ao invés de serem aplicados à movimentação de unidades, serão utilizados para modificar a posição do empreendimento. Da mesma forma, o Algoritmo 8 também é aplicável para limitar a área de movimentação, porém neste caso aplica-se à área disponível para implantação do empreendimento, e não à área industrial.

As principais mudanças, em termos de algoritmo, foram feitas na definição da função objetivo devido aos seguintes pontos:

- Retirada da parcela da função objetivo referente à área de interesse complementar às áreas de população (segunda parcela no primeiro termo da equação 5.5);
- Modificação da parcela referente à sobreposição, uma vez que agora esta se refere à sobreposição entre área do empreendimento e as áreas populacionais;
- Inclusão de uma nova parcela com a finalidade de penalizar a função objetivo no caso de a distância entre a adutora e a instalação ser maior que 100 m.

$$FOB = \sum_{i=1}^{numpop} \left(fator_i . areapop_i + fator_{sobrep} . areas_pop_{sobrepi} \right) + fator_{ad} . d_{ad} \quad (5.10)$$

Em que:

FOB	Função objetivo referente ao Estudo de Caso 3.
$numpop$	Número de áreas com população presentes na região em análise.
$fator_i$	Fator de ponderação para cada área de população “i” (proporcional à respectiva densidade populacional).
$areapop_i$	Área abrangida pelo alcance acidental pertencente à área de população “i”.
$fator_{sobrep}$	Fator de ponderação para a parcela da área do empreendimento que se sobrepõe à área de população “i”.
$areas_pop_{sobrepi}$	Parcela da área do empreendimento que se sobrepõe à área de população “i” (calculada pela FUNCAO_AREA).
$fator_{ad}$	Fator de ponderação para a distância entre a adutora e a instalação. Assume valor nulo caso d_{ad} seja menor ou igual a 100m e 10^5 caso d_{ad} seja maior que este valor.
d_{ad}	Distância entre a adutora e a Estação de Tratamento de Água, fornecida pela FUNCAO_DISTANCIA.

A função utilizada para calcular a distância entre a adutora e a Estação de Tratamento de Água, denominada FUNCAO_DISTANCIA, tem como ponto de referência o centro da instalação em questão. Este algoritmo calcula a distância deste referencial à linha poligonal (adutora).

Os fatores adotados para o Estudo de Caso 3 explicitados na equação 5.10 são apresentados na Tabela 5.13. As demais premissas referentes ao algoritmo *Simulated Annealing* foram mantidas, inclusive no que diz respeito aos parâmetros relacionados na Tabela 5.7.

O Algoritmo 11 apresenta esquematicamente o algoritmo *Simulated Annealing* para otimização SA do Estudo de Caso 3.

Tabela 5.13 Fatores de ponderação pertinentes ao Estudo de Caso 3.

Fator de Ponderação	Valor
Área populacional 1 ($fator_{i_pop1}$)	5
Área populacional 2 ($fator_{i_pop2}$)	10
Área populacional 3 ($fator_{i_pop3}$)	20

Área populacional 4 ($fator_{i_pop4}$)	5
Área populacional 5 ($fator_{i_pop5}$)	20
Área populacional 6 ($fator_{i_pop6}$)	10
Área populacional 7 ($fator_{i_pop7}$)	20
Áreas de sobreposição ($fator_{sobrep}$)	100
Distância entre adutora e instalação ($fator_{ad}$)	Se $d_{ad} =< 100 \rightarrow 0$ Se $d_{ad} > 100 \rightarrow 10^5$

Algoritmo 11: Algoritmo *Simulated Annealing* – Estudo de Caso 3

Finalidade: Minimizar a função objetivo FOB_{final}

Entradas:

coord_pop: matriz de coordenadas das áreas de população.

coord_area_disp: matriz contendo as coordenadas da área disponível para implantação da Estação de Tratamento de Água

centro_emp: vetor de coordenadas do centro do empreendimento em análise.

dimensoes_emp: vetor contendo as dimensões do empreendimento.

vetor_adutora: vetor contendo as coordenadas da linha poligonal que define o traçado da adutora.

alcance: valor do alcance referente à ruptura do cilindro de cloro.

Fatores apresentados na Tabela 5.13.

Parâmetros constantes na Tabela 5.7.

Saída:

centro_emp_ot: vetor de coordenadas otimizadas do centro do empreendimento.

Dimensões_emp_ot: vetor com as dimensões otimizadas do empreendimento.

Algoritmo:

1 areas = FUNCAO_AREA(centro_emp, dimensoes_emp, alcance)

2 distancia = FUNCAO_DISTANCIA(centro_emp, vetor_adutora)

   a. Fob = FOB(areas,distancia)
   b. centro_emp_ot = centro_emp
   c. dimensoes_emp_ot = dimensoes_emp
   d. i = 0, j = 0

3 **Enquanto** $T > T_{final}$ & $j < 500$

l. i = i + 1

m. **Se** i > 100 ou it_rej_eq > 50

I. T = α_r T

II. i = 1, it_rej_eq = 0

n. movimentacao = *randint*(1,1,[0,1])

I. centro_emp_iteracao = centro_emp_ot

II. dimensoes_emp_iteracao = dimensoes_emp_ot

o. **Se** movimentação = 0

I. unid_selec = 1

% Executar rotação com a unidade selecionada

II. dimensoes_emp_iteracao = ALGORITMO_5 (unid_selec)

p. **Se** movimentação = 1

I. unid_selec = 1

%Executar translação com a unidade selecionada

II. centro_emp_iteracao = ALGORITMO_6 (unid_selec)

%Verificar se a unidade está dentro da área disponível na região analisada

q. centro_emp_iteracao = ALGORITMO_8(centro_emp_iteracao)

r. areas_iteracao = FUNCAO_AREA(centro_emp_iteracao, dimensoes_emp_iteracao, alcance)

s. distancia_iteracao = FUNCAO_DISTANCIA(centro_emp_iteracao, vetor_adutora)

t. $Fob_{iteracao}$ = FOB(areas_iteracao, distancia_iteracao)

u. Delta_Fob = $Fob_{iteracao}$ – Fob

v. **Se** Delta_FOB < 0

I. centro_emp_ot = centro_emp_iteracao

II. dimensoes_emp_ot = dimensoes_emp_iteracao

III. Fob = $Fob_{iteração}$

IV. j = 0

w. **Senão se** Delta_FOB >= 0

%Aplicação do critério de Metropolis

I. **Se** exp(-Delta_FOB / (k_B.T)) > *rand*

i. centro_emp_ot = centro_emp_iteracao

ii. dimensoes_emp_ot = dimensoes_emp_iteracao

iii. Fob = $Fob_{iteração}$

iv. j = 0

II. **Senão**

i. j = j + 1

ii. it_rej_eq = it_rej_eq + 1

Os resultados obtidos mediante a elaboração e posterior execução no MATLAB dos algoritmos referentes aos três estudos de caso estão apresentados no capítulo seguinte.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados e as discussões para os três estudos de casos em análise, iniciando-se com o Terminal Marítimo, em seguida a Refinaria e no final a Estação de Tratamento de Água.

Em todos os casos, a estrutura utilizada para apresentar os resultados tem como base a configuração inicial proposta pelos projetistas a ser otimizada pelo algoritmo; a configuração otimizada após a aplicação do algoritmo; e, por fim, a curva que demonstra o "caminho" seguido pelo algoritmo *Simulated Annealing* durante o processo de otimização da função objetivo, a qual é representada em gráfico contendo no eixo das abscissas o número da iteração e, no eixo das ordenadas, o respectivo valor assumido pela função objetivo correspondente.

6.1. Estudo de Caso 1 – Terminal de Líquidos Inflamáveis

A Figura 6.1 apresenta a configuração inicial do Terminal Marítimo e suas circunvizinhanças (mostrada na Figura 5.9) segundo a aplicação da ferramenta gráfica intrínseca do *software* MATLAB.

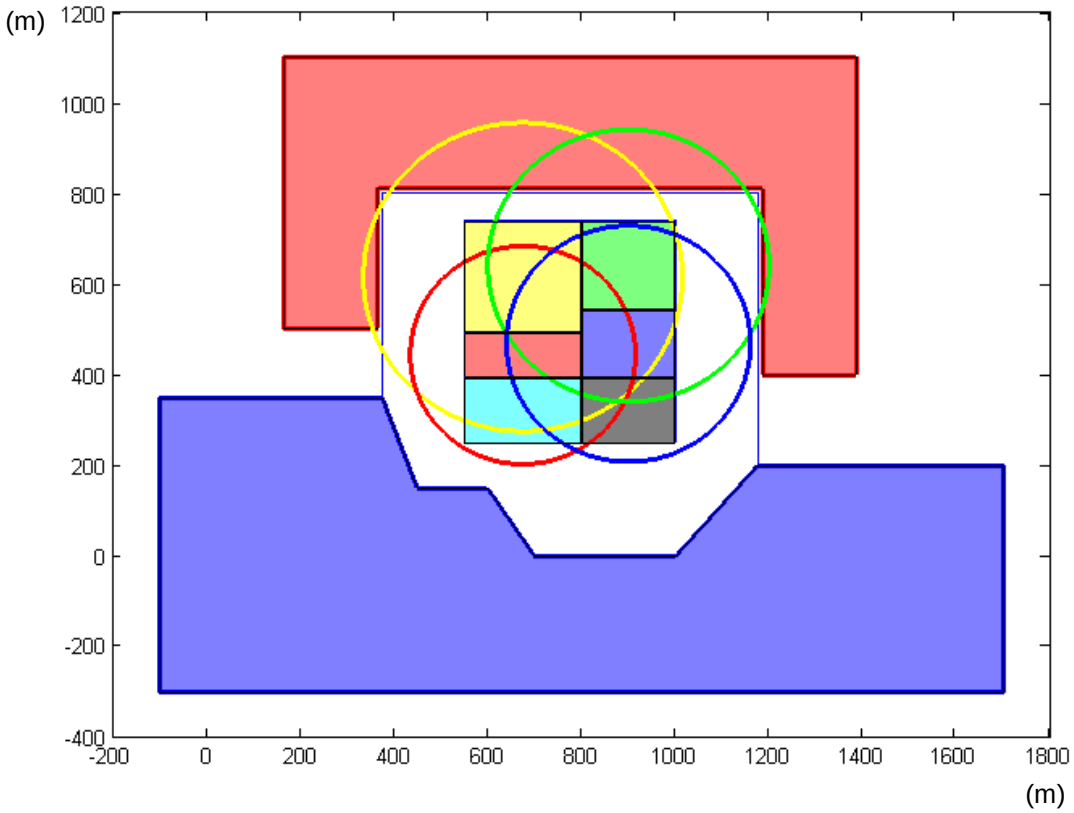


Figura 6.1 Configuração Inicial do Terminal mediante plotagem no MATLAB.

Os círculos presentes na Figura 6.1 representam os alcances acidentais das unidades analisadas, descritos na Tabela 5.5, e cujas cores coincidem com as cores das unidades a qual pertencem.

Mediante a aplicação do Algoritmo 9 a esta configuração inicial, segundo as premissas já descritas anteriormente, foi obtido o seguinte resultado de otimização de risco ao público externo para o *layout* do Terminal mostrado na Figura 6.2.

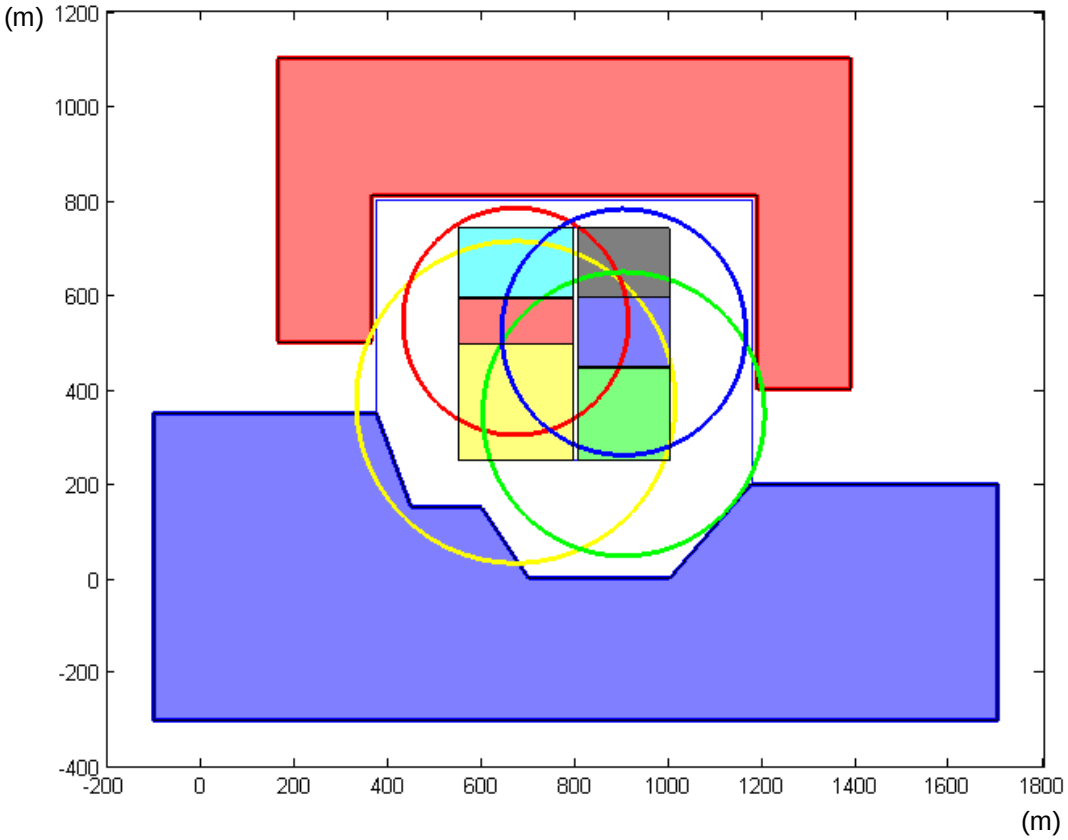


Figura 6.2 Configuração Otimizada para o Terminal mediante a aplicação do algoritmo.

A Tabela 6.1, por sua vez, compara as coordenadas dos centros das unidades que compõem o Terminal para as configurações inicial e otimizada.

Tabela 6.1 Coordenadas dos arranjos Inicial e Otimizado referentes ao Terminal.

Tancagem (Unidade)	Coordenadas dos centros (m)				
	Cor	*Layout* inicial (x,y)		*Layout* otimizado (x,y)	
Petróleo		675	615	647.5	372.5
QAV		675	443	647.5	546.3
Lubrificantes		675	320	647.5	667.5
Óleo Diesel		900	640	877.5	322.5
Gasolina		900	468	877.5	496.5
Água Oleosa		900	320	877.5	667.5

A Figura 6.3 apresenta a curva iteração x valor da função objetivo, demonstrando o caminho percorrido pelo algoritmo para obter a configuração otimizada demonstrada na Figura 6.2. A Tabela 6.2 mostra os valores da função objetivo para as configurações inicial e final, bem como o número máximo de iterações.

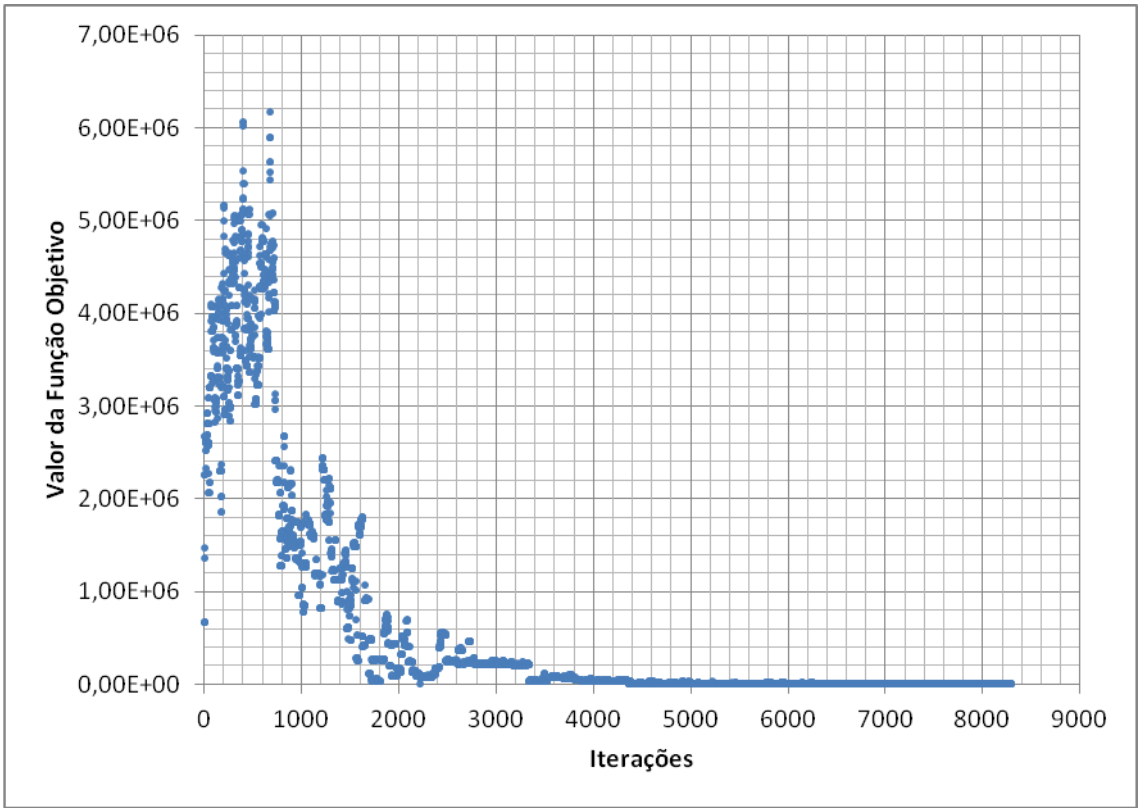


Figura 6.3 Gráfico do comportamento da função objetivo ao longo da otimização.

Tabela 6.2 Dados referentes à otimização do *layout* do Terminal.

Parâmetro	Valor
Fob *layout* inicial	6,65E+05
Fob *layout* otimizado	1,31E+03
Número máximo de iterações	8290

Como se nota pela comparação entre as Figuras 6.1 e 6.2, houve uma redução significativa da área compreendida pelos alcances acidentais que extrapolam os limites do Terminal, principalmente em relação à parcela que atinge a população circunvizinha. Este resultado visual é corroborado pelos valores da

função objetivo correspondentes ao *layout* inicial e ao *layout* otimizado constantes na Tabela 6.2, os quais apontam uma redução em duas ordens de grandeza.

Analisando-se as mudanças de posicionamento de cada tancagem mediante a comparação das figuras, nota-se uma clara tendência de afastamento das unidades que possuem maiores alcances acidentais (petróleo e óleo diesel) em relação à população vizinha, bem como uma aproximação das tancagens de alcance nulo (lubrificantes e água oleosa) em relação à mesma. Esta tendência é reflexo dos fatores de ponderação adotados que compõem a função objetivo, citados na Tabela 5.6. Além disso, é importante se observar também que o *layout* otimizado não apresentou sobreposição de nenhuma das unidades em análise, remetendo, portanto, a uma solução viável fisicamente.

No que tange ao gráfico apresentado na Figura 6.3, verifica-se que a curva obtida demonstra um comportamento típico de algoritmos do tipo *Simulated Annealing*. No estágio inicial do processo de otimização observa-se uma grande entropia nos pontos obtidos, remetendo à etapa em que o parâmetro "c" (temperatura) possui valores elevados. Entretanto, à medida que o número de iterações aumenta (implicando, portanto, na contínua redução da temperatura), as oscilações nos valores da função objetivo se tornam cada vez menos acentuadas, culminando, no final do processo, em uma configuração cuja função objetivo é mínima.

Por fim, ressalta-se que os resultados obtidos implicam na redução tanto do risco individual (RI) como do risco social (RS) relacionados à operação do Terminal, uma vez que os alcances ficaram praticamente restritos aos limites da instalação industrial (resultando na redução do RI), minimizando inclusive a área populacional atingida pelos alcances (provocando a redução do RS).

6.2. Estudo de Caso 2 – Novo Parque de Esferas de GLP

A Figura 6.4 a seguir mostra a configuração inicial da Refinaria a qual será ampliada mediante a implantação de um novo Parque de Esferas de GLP e suas circunvizinhanças (mostrada na Figura 5.11) segundo aplicação de ferramenta gráfica intrínseca do MATLAB.

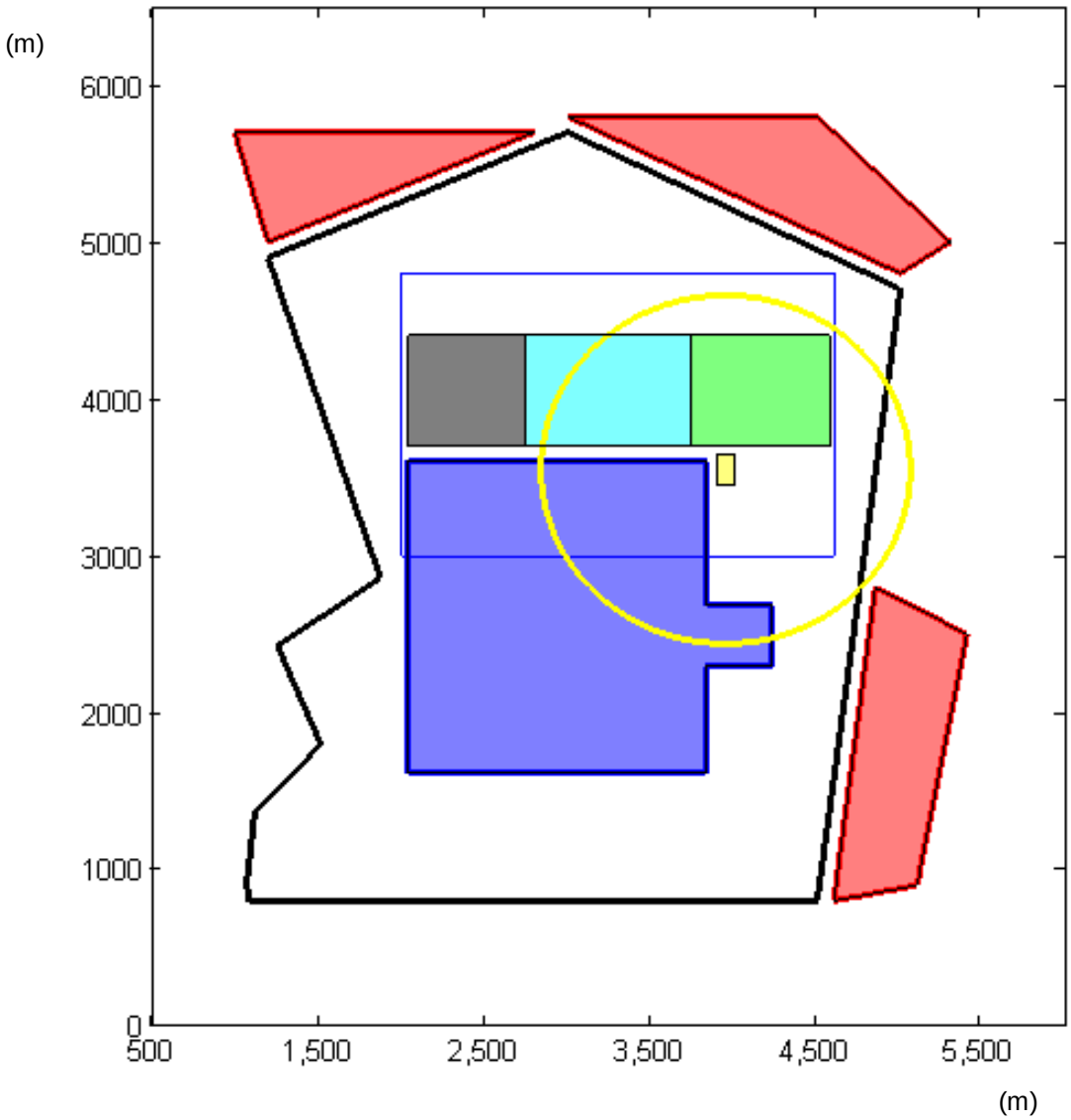


Figura 6.4 Configuração Inicial da Refinaria mediante plotagem no MATLAB.

O círculo amarelo representado na figura anterior indica o alcance acidental referente ao Parque de Esferas, presente na Tabela 5.8, unidade esta que constitui o foco deste estudo de caso.

Mediante a aplicação do Algoritmo 10 a esta configuração inicial, segundo as premissas anteriores, foi obtido o resultado de otimização de risco ao público externo para o *layout* da Refinaria mostrado na Figura 6.5.

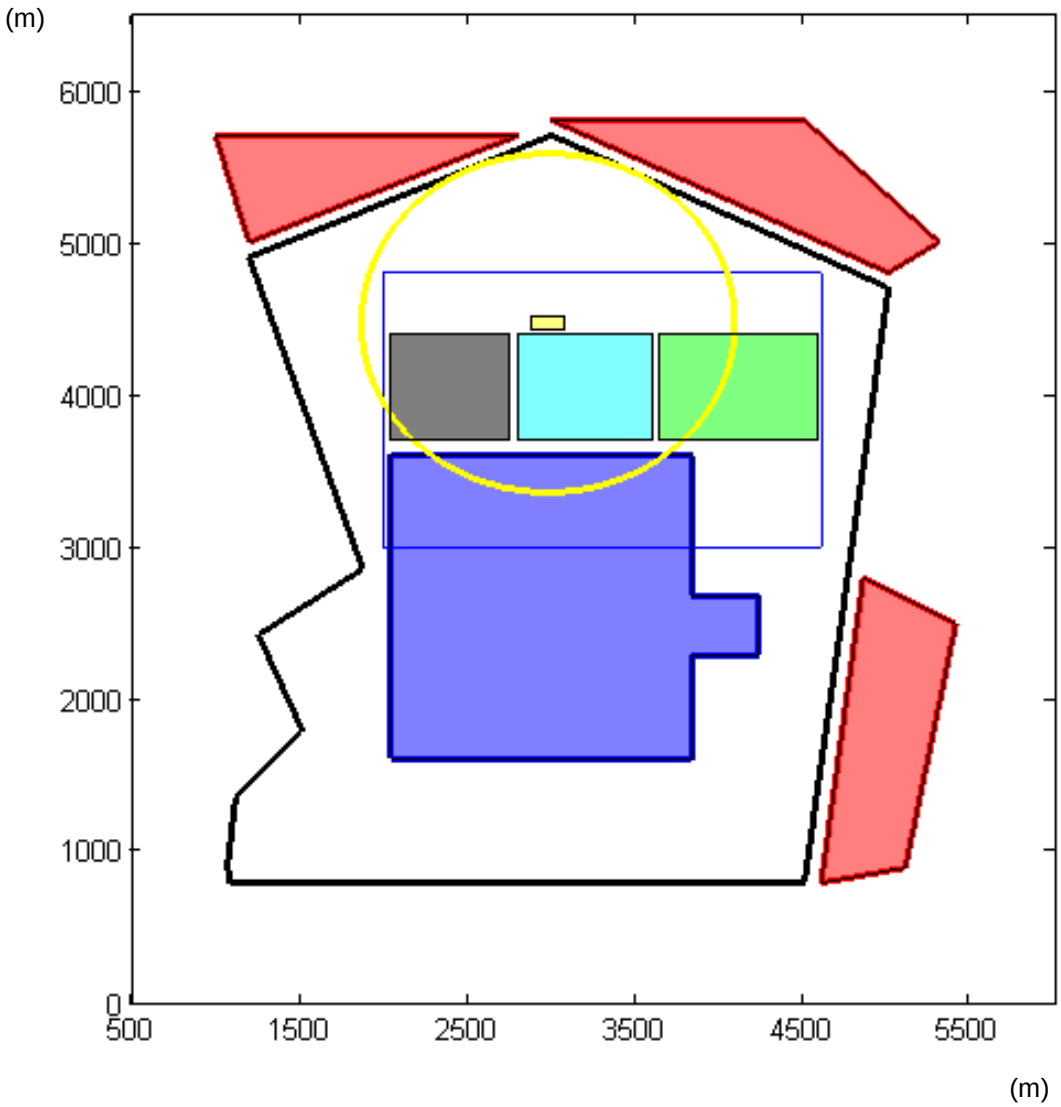


Figura 6.5 Layout mostrando a localização otimizada do Parque de Esferas de GLP.

Adicionalmente, a Figura 6.6 e a Tabela 6.3 apresentam, respectivamente, a curva iteração x função objetivo e os valores que a mesma assume para as configurações inicial e final. Na referida tabela também é relacionado o número máximo de iterações obtido durante o processo de otimização.

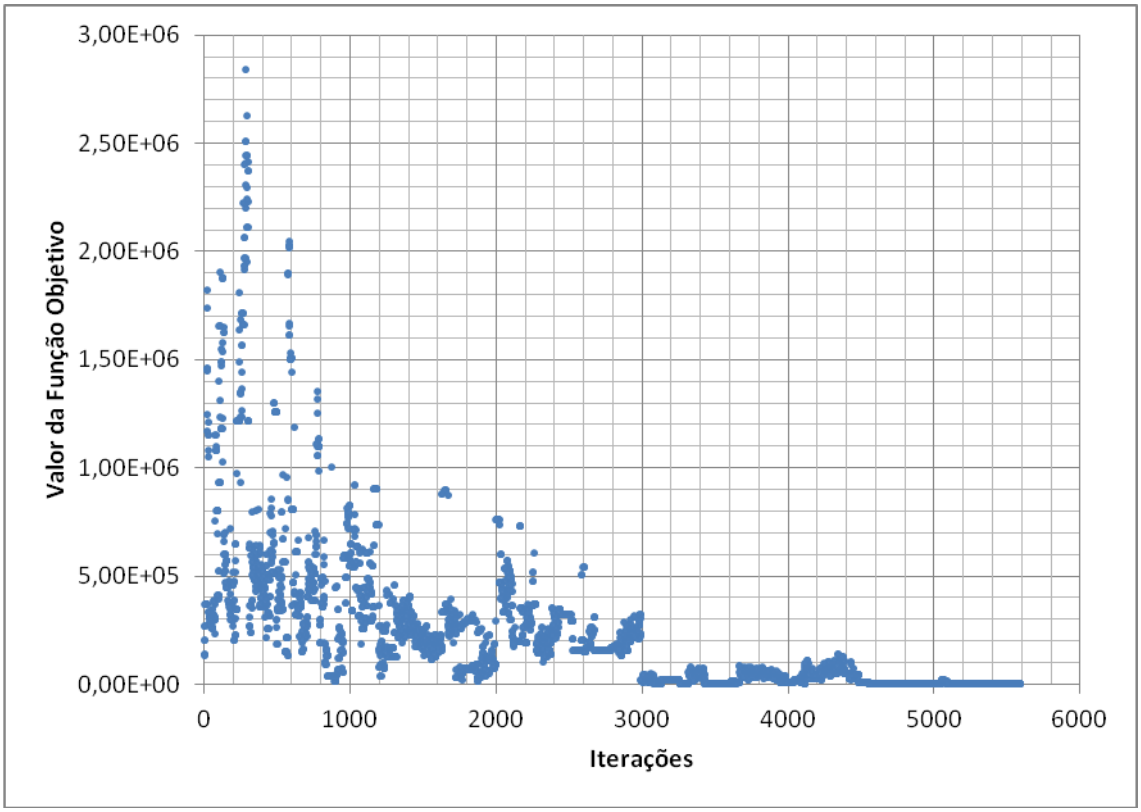


Figura 6.6 Gráfico do comportamento da função objetivo ao longo da otimização.

Tabela 6.3 Dados referentes à otimização da localização do Parque de Esferas.

Parâmetro	Valor
Fob *layout* inicial	2,67E+05
Fob *layout* otimizado	0
Número máximo de iterações	5592

Este estudo de caso se mostra bastante interessante pelo fato de que, conforme pode ser constatado na Figura 6.4, apesar do alcance acidental extrapolar os limites da Refinaria, o mesmo não atinge a população presente no entorno no momento da análise.

Como para a configuração inicialmente proposta o alcance acidental não atingiu população, intuitivamente isto pode levar à conclusão de que não há necessidade de se buscar uma localização ótima para o Parque de Esferas no âmbito da variável risco ao público externo.

Entretanto, é importante lembrar que a configuração da população ao redor de uma dada instalação industrial não constitui um cenário estático, mas sim

dinâmico. Ou seja, mesmo que no instante “atual” não haja população sendo atingida pelo referido alcance, ao longo do tempo há a possibilidade de expansão da população em direção à área abrangida pelo círculo amarelo considerando a localização inicialmente proposta. Isto significa que não há como garantir a tolerabilidade dos riscos ao longo dos anos caso o Parque de Esferas seja implantado na posição indicada na Figura 6.4.

Entretanto, tal incerteza não procede para a localização obtida após o emprego da metodologia proposta, cujo resultado é explicitado na Figura 6.6. Isto porque, para esta configuração, o alcance acidental ficou completamente restrito aos limites de propriedade da Refinaria.

Desse modo, o *layout* otimizado obtido no presente estudo de caso não só reduz como também garante a plena tolerabilidade dos riscos (individual e social) pertinentes ao Parque de Esferas para esta configuração, não havendo possibilidade de danos ao público externo.

Da mesma forma que foi destacado no caso anterior, é importante se observar que o *layout* otimizado não apresentou sobreposição do Parque de Esferas com nenhuma outra unidade situada dentro dos limites da área disponível para expansão da tancagem, remetendo, portanto, a uma solução viável fisicamente.

No que tange ao gráfico apresentado na Figura 6.6, verifica-se novamente que a curva obtida demonstra um comportamento típico de algoritmos do tipo *Simulated Annealing*, conforme os mesmos motivos já expostos para o Estudo de Caso 1.

6.3. Estudo de Caso 3 – Estação de Tratamento de Água

Analogamente aos estudos de caso anteriores, são apresentadas nas Figuras 6.7 e 6.8 a configuração da região na qual se insere a Estação de Tratamento de Água com a localização inicial (Figura 5.13) e a localização final obtida pelo Algoritmo 11 via ferramenta gráfica do MATLAB. Os círculos verdes representados nas referidas figuras indicam o alcance acidental pertinente à ruptura de um dos cilindros de cloro que compõem a Estação de Tratamento, enquanto que as linhas pontilhadas delimitam a região permitida para localização da instalação (100 metros de distância para cada lado da adutora).

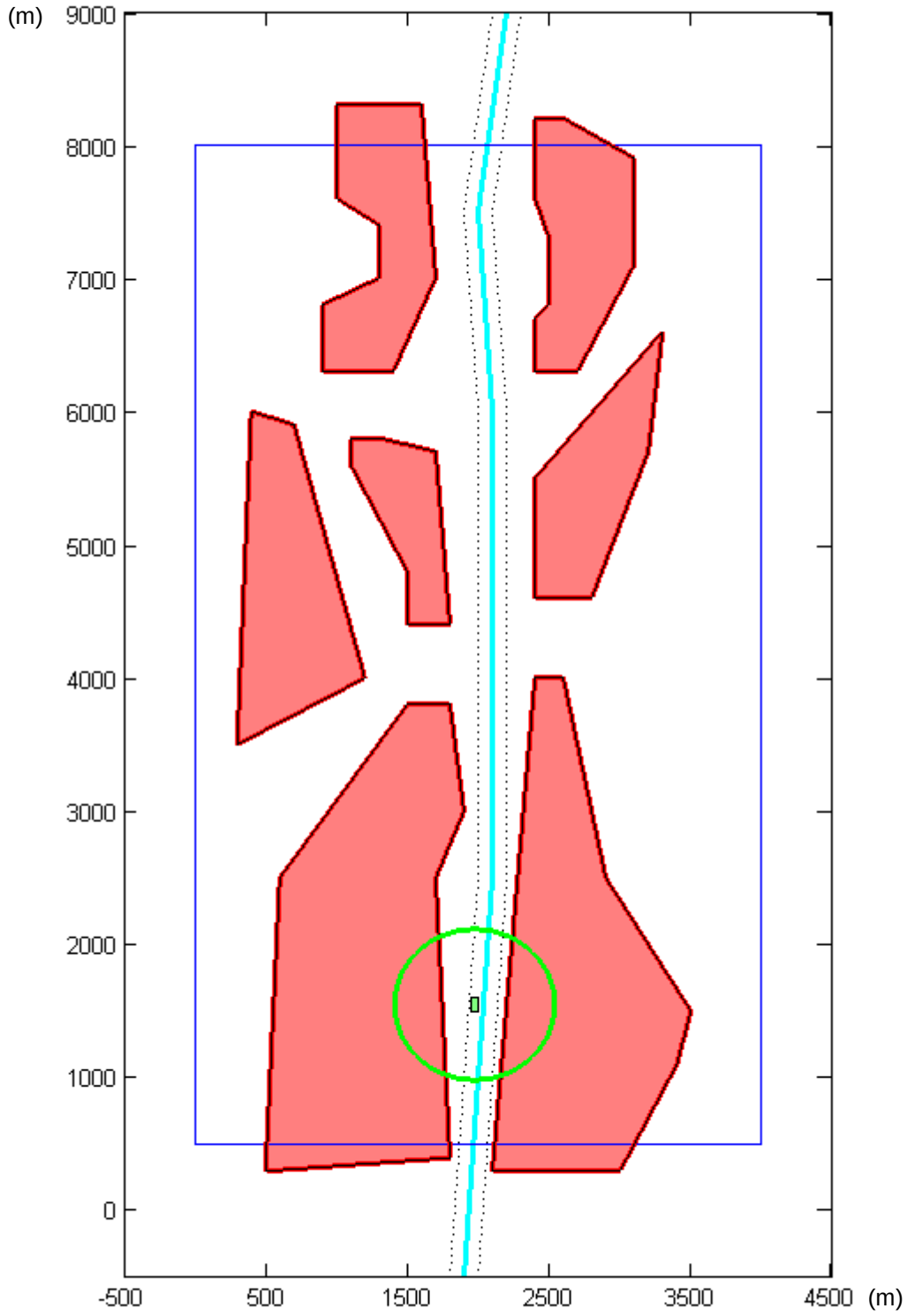


Figura 6.7 Localização inicial da Estação de Tratamento e circunvizinhanças.

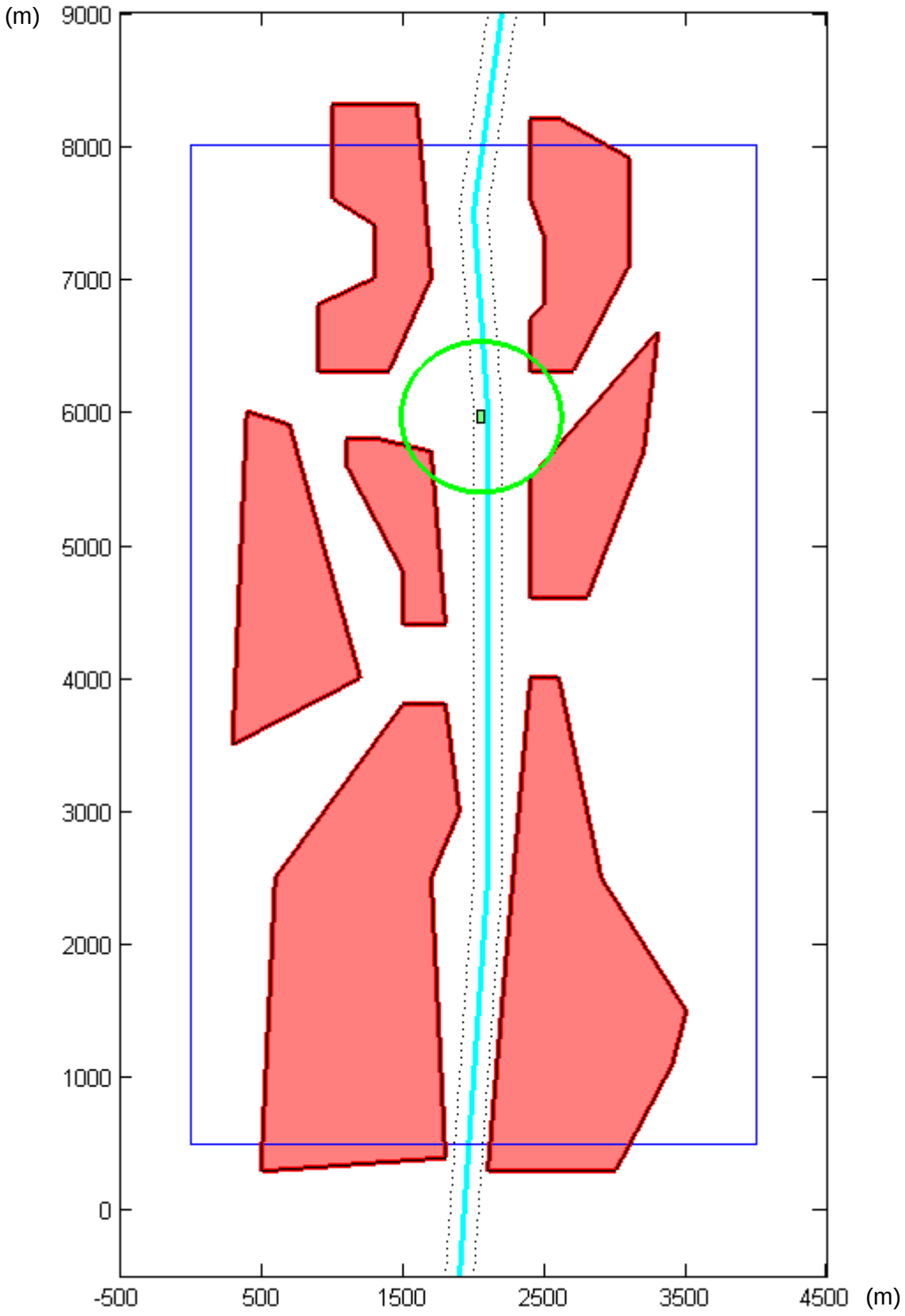


Figura 6.8 Localização otimizada da Estação de Tratamento e circunvizinhanças.

De forma complementar, a Figura 6.9 e a Tabela 6.4 mostram, nesta ordem, a curva iteração x função objetivo e os valores que a mesma assume para as localizações inicial e final. Na referida tabela também é relacionado o número máximo de iterações obtido durante o processo de otimização.

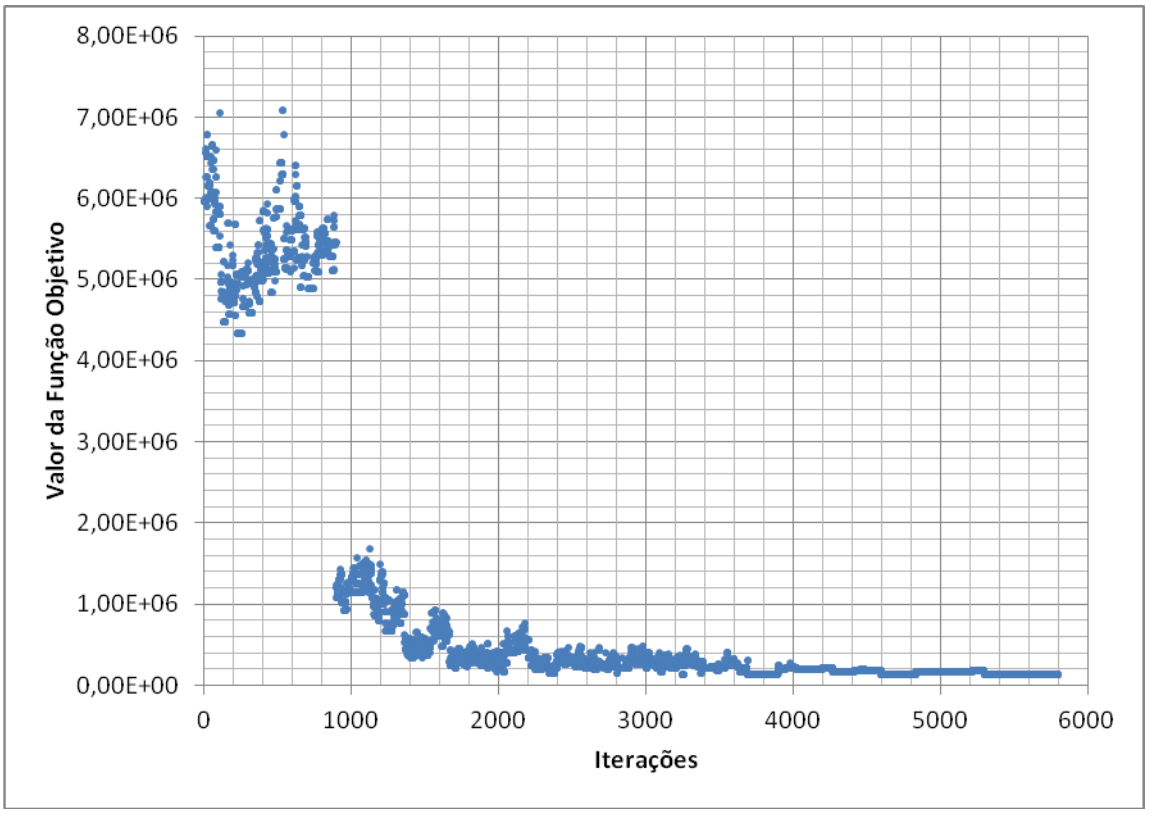


Figura 6.9 Gráfico do comportamento da função objetivo ao longo da otimização.

Tabela 6.4 Dados referentes à otimização da localização da Estação de Tratamento.

Parâmetro	Valor
Fob localidade inicial	5,96E+06
Fob localidade otimizada	1,40E+05
Número máximo de iterações	5800

Observando-se a Figura 6.8, a qual apresenta a localização final obtida após a utilização do algoritmo, verifica-se que o processo de otimização de fato convergiu para a localidade mais favorável em termos de risco ao público externo, levando-se em consideração a restrição de distância máxima (100 metros) entre a Estação de Tratamento e a adutora, imposta à função objetivo. Nenhuma outra localidade nas proximidades da adutora apresenta uma ausência maior de população em um raio equivalente ao alcance acidental considerado.

Comparando-se especificamente as situações inicial (Figura 6.7) e final (Figura 6.8), constata-se que, após a utilização do Algoritmo 11, houve uma sensível redução da área de população abrangida pelo alcance acidental. Este resultado visual é confirmado pelos valores da função objetivo correspondentes às localidades inicial e otimizada apresentadas na Tabela 6.4, os quais apontam uma redução com magnitude acima de uma ordem de grandeza.

É importante ressaltar, assim como feito para os demais estudos de caso, que a localização otimizada não apresentou sobreposição com nenhuma das populações em análise, remetendo, portanto, a uma solução fisicamente viável.

No que se refere ao gráfico apresentado na Figura 6.9, verifica-se que a curva obtida demonstra um comportamento semelhante aos apresentados para os estudos de caso anteriores, no que se refere à maior oscilação dos dados no início do processo de otimização. Entretanto, neste caso específico, as oscilações se tornaram menos intensas relativamente rápido (aproximadamente a partir da iteração 1000), possivelmente indicando que o algoritmo identificou a região mais favorável em termos de risco já no início da otimização devido à restrição de distância em relação à adutora (100 metros).

Adicionalmente, informa-se que, especificamente para este estudo de caso referente à escolha da melhor localização para se construir uma dada instalação industrial, também foi realizada uma simulação para se encontrar o local ótimo considerando um valor superior para o limite da distância entre a instalação e o traçado da adutora.

O objetivo foi verificar se o algoritmo conseguiria identificar uma localização melhor em termos de risco ao público externo ao se variar a máxima distância permitida da adutora à instalação, ou se o mesmo continuaria convergindo para o resultado apresentado na Figura 6.8

Para tanto, foram mantidas todas as premissas estabelecidas para o Estudo de Caso 3 originalmente proposto (inclusive a configuração inicial proposta hipoteticamente em projeto, conforme mostrado na Figura 5.13), alterando-se apenas o valor do limite da distância Estação-Adutora de 100m para 1100m.

Após a execução do Algoritmo 11 para esta nova situação, foram obtidos os resultados apresentados nas Figuras 6.10 e 6.11 e na Tabela 6.5.

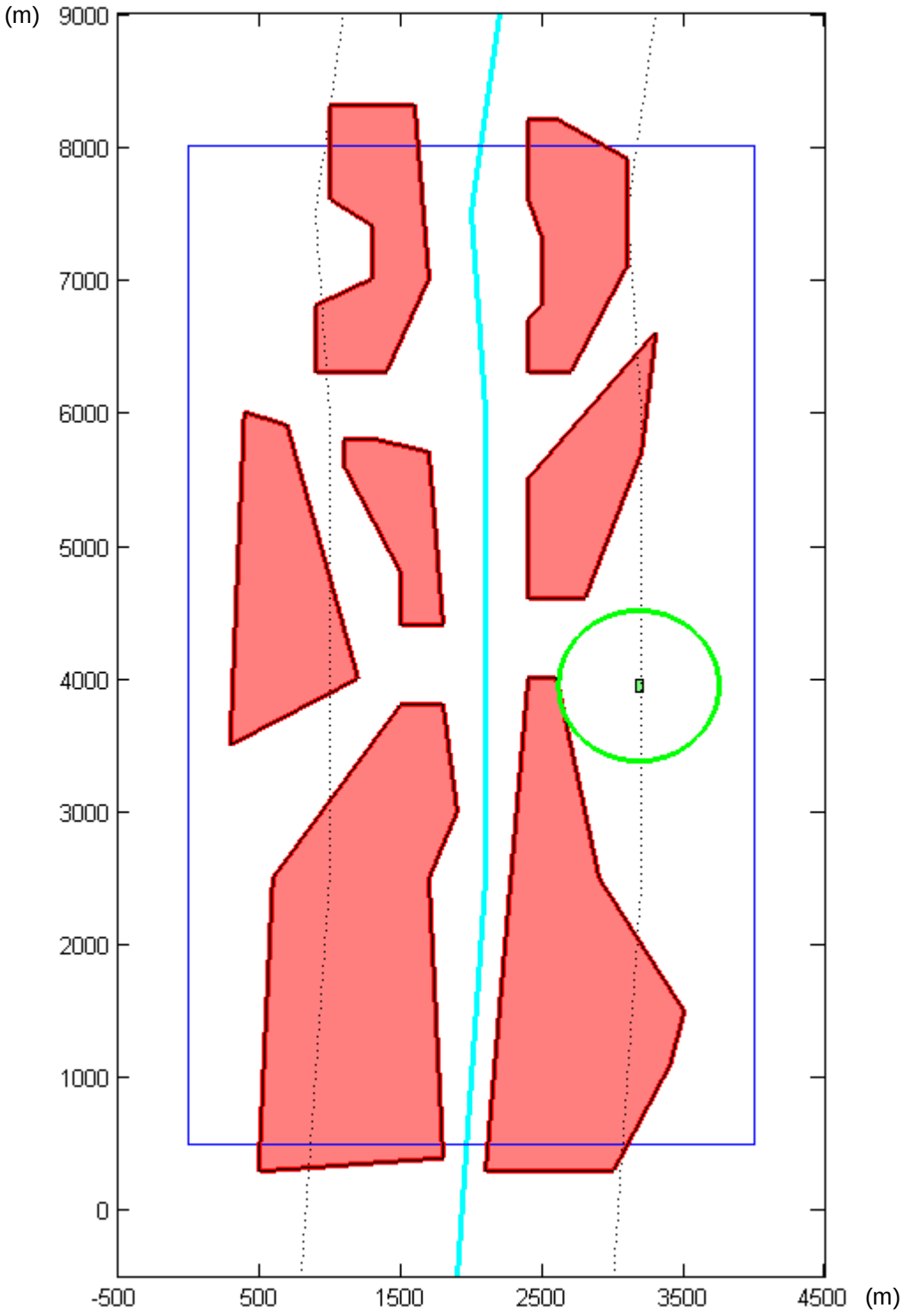


Figura 6.10 Nova localização otimizada da Estação e circunvizinhanças.

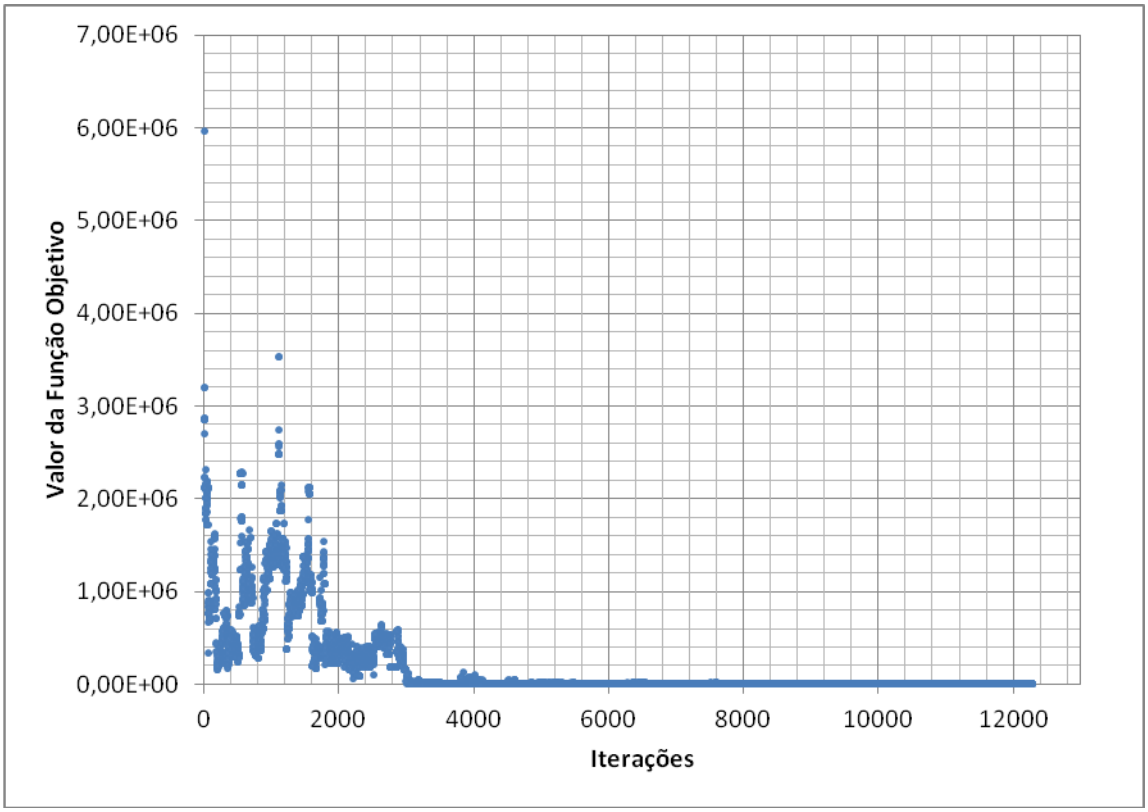


Figura 6.11 Gráfico do comportamento da função objetivo para o novo caso.

Tabela 6.5 Dados referentes à otimização para o novo caso.

Parâmetro	Valor
Fob localidade inicial	5,96E+06
Fob localidade otimizada	0,00E+00
Número máximo de iterações	12287

Conforme observado através da Figura 6.10, a nova localização otimizada é ainda mais favorável do que aquela obtida para as premissas originalmente estabelecidas, comprovando a eficácia do algoritmo em localizar, de fato, a melhor área disponível para a construção da Estação de Tratamento de cloro de acordo com diferentes restrições de distância entre a mesma e a adutora.

Ressalta-se, portanto, que os resultados obtidos para ambas as situações implicaram na redução dos riscos relacionados à operação da Estação de Tratamento quando comparados com a posição inicialmente proposta para esta instalação, uma vez que a área populacional atingida pelo alcance acidental foi sensivelmente diminuída para o primeiro caso, e se tornou nula para o segundo (implicando, assim, na redução do risco social).

Entretanto, aqui cabe uma ressalva em âmbito geral. De fato, a aplicação do algoritmo contribuiu sobremaneira para a redução dos riscos ao público externo, mas não evita, por exemplo, que as populações presentes nas circunvizinhanças, com o tempo, cresçam e avancem em direção às instalações industriais e, assim, sejam atingidas pelos alcances acidentais. Este avanço poderia acarretar, por exemplo, na intolerabilidade principalmente do risco social à medida que a população se aproxima da instalação, mesmo que o empreendedor tenha tomado as devidas precauções com relação à variável risco durante a escolha da localização (ou seja, mesmo que ele tenha utilizado o algoritmo proposto). Como, segundo a regulamentação dos órgãos ambientais, não é permitido que qualquer instalação opere com riscos na região de intolerabilidade, independente da etapa de sua vida útil, resulta que o ônus e os custos de implantação de medidas mitigadoras para adequação dos riscos fiquem somente a cargo do empreendedor, mesmo que ele tenha obedecido a todos os pressupostos da regulamentação durante a construção do empreendimento.

De modo a evitar que no futuro isto possa ocorrer, possibilitando que a atividade industrial ocorra, em toda sua vida útil, sem impor risco intolerável à população, é de suma importância a atuação não só do empreendedor durante a fase de projeto da instalação industrial mediante a minimização dos riscos (seja por meio do estudo do *layout* ou da localização do empreendimento) e/ou do órgão regulador por meio da análise crítica dos Estudos de Riscos da referida instalação e proposição de medidas mitigadoras. É necessário, principalmente, que o poder público desenvolva políticas de uso e ocupação do solo que considerem também a variável risco, a exemplo do que é praticado em países como Holanda e Inglaterra. Nestes países, não apenas os empreendimentos industriais são submetidos ao licenciamento ambiental comprovando que não proporcionarão riscos intoleráveis às populações circunvizinhas existentes. Sempre que há planos para construir novos empreendimentos residenciais, estes também são submetidos ao mesmo licenciamento, tendo que demonstrar que não exporão as pessoas envolvidas a risco intolerável em função de já haver atividades industriais com produtos perigosos nas proximidades. Além disso, sendo necessárias medidas mitigadoras para adequação dos riscos, prevalece o princípio de que o ônus respectivo cabe ao empreendedor que toma a iniciativa de se instalar naquele local, nunca ao empreendedor que já havia se estabelecido anteriormente.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Em função do constante desenvolvimento experimentado pela sociedade após a Revolução Industrial ocorrida na Inglaterra no século XVIII, a preocupação do homem com os impactos ambientais decorrentes deste processo passou a ser cada vez mais notória ao longo da linha do tempo que interliga o referido marco aos dias atuais.

Além dos assuntos comumente relacionados ao tema ambiental, tais como a poluição da atmosfera e de corpos hídricos, o desmatamento, a contaminação do solo e a desertificação, a preocupação com espécies ameaçadas de extinção, dentre outros, questões relacionadas à preservação da própria vida humana com foco na prevenção da ocorrência de acidentes em instalações industriais também passaram a fazer parte da pauta das discussões em nível internacional.

Esta preocupação com a segurança das comunidades situadas nas proximidades de instalações industriais se intensificou a partir da década de 70, principalmente em decorrência de acidentes de grandes repercussões ocorridos em diversas partes do mundo. Acidentes estes, tais como o de Seveso na Itália (1976) e de Bhopal na Índia (1984), acabaram culminando na criação de dispositivos governamentais com o propósito de evitar que os mesmos continuassem a ocorrer.

Neste contexto, a Diretiva 82/501/ECC, publicada pela União Européia em 1982 e também conhecida como Diretiva de Seveso I, constitui um dos exemplos mais representativos. Juntamente com a Diretiva de Seveso II, a qual introduziu novos requisitos em relação à anterior, estes dispositivos tiveram como objetivos principais a prevenção de acidentes envolvendo substâncias perigosas, bem como a limitação das consequências para o homem e para o meio ambiente, com vista a assegurar níveis de proteção elevados à comunidade.

Assim sendo, em consonância com os princípios estabelecidos pelas Diretivas de Seveso I e II, este trabalho teve como objeto principal a proposição de uma metodologia computacional, desenvolvida em MATLAB R12, tendo como base a utilização conjunta do Método de Monte Carlo (MC) e do Método de otimização conhecido como *Simulated Annealing*. Esta metodologia cumpriu os seguintes objetivos:

(i) Minimizar os potenciais danos às comunidades extramuros em decorrência dos possíveis acidentes que possam vir a ocorrer em instalações

industriais que armazenam, manipulam ou movimentam grandes quantidades de substâncias perigosas, tendo como foco o estudo da localização dos equipamentos e unidades de processo na planta (*layout*);

(ii) Evitar a demanda futura de medidas mitigadoras de risco adicionais, atuando de maneira preventiva durante a etapa de projeto do empreendimento na definição do arranjo da planta;

(iii) Fomentar a inserção da variável ambiental "risco ao público externo" no processo de elaboração do projeto das plantas industriais.

Partindo-se das metodologias de cálculo já consagradas e utilizadas nos Estudos de Análise de Riscos aplicadas a instalações industriais, a pertinência e a eficiência da metodologia proposta foram demonstradas por meio de três estudos de caso hipotéticos.

O Estudo de Caso 1 teve como foco a análise da localização, no *layout*, das unidades de tancagem que compõem um Terminal Marítimo de combustíveis (empreendimento novo), cujo entorno se caracteriza pela população em suas proximidades. O resultado obtido se mostrou bastante satisfatório, uma vez que o *layout* alcançado mediante a aplicação do método proposto permitiu a minimização das repercussões acidentais às referidas comunidades.

O Estudo de Caso 2 contemplou a localização de um novo parque de esferas de GLP em uma refinaria hipotética já existente. Neste exemplo, além de haver menor número de opções para localizar esta unidade no *layout* (uma vez que as localizações das demais unidades que compõem a refinaria já estavam previamente fixadas), também foi considerada a existência de populações com densidades demográficas diferentes em suas proximidades. Da mesma forma que no Estudo de Caso 1, o resultado alcançado mediante a aplicação da metodologia proposta atendeu plenamente ao objetivo, uma vez que a localização final obtida para o parque de esferas implicou na total limitação dos seus alcances acidentais à área da refinaria.

No Estudo de Caso 3, outra possibilidade de utilização da metodologia foi explorada. Neste caso foi estudada a melhor localização de uma Estação de Tratamento de Água em região com diversos aglomerados populacionais, considerando-se os alcances acidentais referentes à liberação instantânea de cloro gasoso. Foi considerada também a aplicação de restrições referentes à posição relativa entre a instalação e a adutora de água, mostrando a versatilidade da

abordagem. Além de satisfatórios, os resultados obtidos neste caso foram particularmente interessantes, uma vez que, dependendo das restrições impostas à função objetivo, o algoritmo locou otimamente a Estação de Tratamento de Água em cada cenário analisado.

Desta forma, tendo em vista os resultados apresentados para todos os estudos de caso, pode-se concluir que, de fato, a aplicação da metodologia contribuiu sobremaneira para a redução dos riscos ao público externo (tanto em termos de Risco Individual quanto em termos de Risco Social), uma vez que em todos eles as áreas de população atingidas pelos alcances acidentais foram minimizadas. Do ponto de vista do licenciamento ambiental, esta minimização dos riscos contribui positivamente para a tomada de decisão dos órgãos ambientais em relação a esta variável, podendo acarretar, inclusive, na celeridade do processo.

Entretanto, a aplicação da metodologia proposta não evita, por exemplo, que as populações presentes nas circunvizinhanças, com o tempo, cresçam e avancem em direção às instalações industriais e, assim, sejam atingidas pelos alcances acidentais e implicando em futura intolerabilidade dos riscos. Para tanto, ressaltou-se a importância da atuação não só do empreendedor durante a fase de projeto mediante a minimização dos riscos (seja por meio do estudo do *layout* ou da localização do empreendimento) e/ou do órgão regulador por meio da análise crítica dos Estudos de Riscos da referida instalação e proposição de medidas mitigadoras, mas principalmente que o poder público atue no desenvolvimento de políticas relacionadas ao uso e ocupação do solo que considerem também a variável risco, a exemplo do que é praticado em países como Holanda e Inglaterra.

Por fim, os resultados obtidos durante a presente dissertação indicam a possibilidade de ampliação de seu escopo em trabalhos futuros. Assim, sugere-se:

1) Pesquisar a possibilidade de utilização dos alcances acidentais referentes às demais tipologias acidentais analisadas para cada uma das unidades de processo / tancagem, ponderando-os de acordo com as respectivas probabilidades de ocorrência;

2) Para as tipologias acidentais diretamente influenciadas pelo vento (tais como *flashfire* e dispersão de nuvem tóxica), verificar a possibilidade de inserção das probabilidades de direção de vento na análise;

3) Inserir no algoritmo restrições referentes a distanciamento entre unidades, caso estejam previstos em normas;

4) Considerar no algoritmo de otimização restrições que descrevam relações de interdependência entre as unidades, caso pertinente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRITTER, R.E., MCQUAID, J.; **Workshop on the dispersion of dense gases**, HSE Contract Research Report No 17, UK, 1988.

CERNY, V; **Thermodynamical Approach to the Traveling Salesman Problem: An Efficient Simulation Algorithm**, Journal of Optimization Theory and Applications, 45, pgs. 41-51, 1985.

CPR 14E – Methods for the calculation of physical effects - "Yellow Book", TNO (The Netherlands Organization), The Netherlands, 2005.

CPR 16E – Methods for the determination of possible damage - "Green Book", TNO (The Netherlands Organization), The Netherlands, 1992.

CPR 18E – Guideline for quantitative risk assessment - "Purple Book", RIVM (National Institute of Public Health and the Environment), The Netherlands, 2005.

CRANE; **Technical Paper No. 410: Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipe**, Crane Co., New York, 1986.

CROWL, D. A.; LOUVAR, J. F.; **Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications**, Englewood Cliffs, New Jersey, 1990.

DEMAJORIVIC, J.; **Geração e distribuição de riscos: acesso a informações e gestão da vulnerabilidade dos países em desenvolvimento**; Revista Portularia, Universidad de Huelva, VI, pgs. 39-58, 2006.

DÍAZ-OVALLE, C.; VAZQUEZ-ROMAN, R.; MANNAN, M.S.; **An approach to solve the facility layout problem based on the worst-case scenario**, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Elsevier, United States of America, 23, pgs. 385-392, 2010.

FAUSKE, H. K., EPSTEIN, M.; **Source Term Considerations in Connection With Chemical Accidents and Vapor Cloud Modeling**, International Conference on Vapor Cloud Modeling, Cambridge, Massachusetts, 1987.

FISHMAN, G.S.; **Monte Carlo – Concepts, Algorithms, and Applications,** Springer, United States of America, 1996.

FREITAS, C.M.; GOMEZ, C.M.; **Análise de riscos tecnológicos na perspectiva das ciências sociais**; Revista História,Ciências,Saúde—Manguinhos, Rio de Janeiro, III, pgs. 485-504, 1997.

GEORGIADIS, M.C.; SHILLING, G.S.; ROTSTEIN, G.E.; MACCHIETTO, S.; **A general mathematical programming approach for process plant layout**, Computers and Chemical Engineering, Elsevier, United States of America, 23, pgs. 823-840, 1999.

Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, CCPS (Center for Chemical Process Safety) of the AICHE (American Institute of Chemical Engineers), 2nd edition, New York, 2000.

Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, CCPS (Center for Chemical Process Safety) of the AICHE (American Institute of Chemical Engineers), 3rd edition, New York, 2008.

Instrução Técnica para elaboração de Estudo de Análise de Risco para instalações convencionais, INEA, Rio de Janeiro, 2009.

JUNG, S.; NG, D.; LEE, J.H.; VÁZQUEZ-ROMAN, R.; MANNAN, M.S.; **An approach for risk reduction (methodology) based on optimizing the facility layout and siting in toxic gas release scenarios,** Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Elsevier, United States of America, 23, pgs. 139-148, 2010.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P.; **Optimization by Simulated Annealing**, Science 220 (4598), pgs. 671-680, 1983.

KUSIAK, A.; HERAGU, S. S.; **The facility layout problem**, European Journal of Operational Research 29, pgs. 229-251, 1987.

LEES, F.P.; **Loss Prevention in the Process Industries – Hazard Identification, Assessment and Control,** 2nd edition, Oxford, UK, 1996.

Levenspiel, O.; **Engineering Flow and Heat Exchange**, New York, 1984.

LÓPEZ-MOLINA, A.; VÁZQUEZ-ROMAN, R.; MANNAN, M.S.; FELIX-FLORES, M.G.; **An approach for domino effect reduction based on optimal layouts**, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Elsevier, United States of America, XXX, pgs. 1-8, 2012.

MEDINA, H.; ARNALDOS, J.; CASAL, J.; **Process design optimization and risk analysis**, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Elsevier, United States of America, 22, pgs. 566-573, 2009.

MELLER, R.D.; BOZER, Y.A.; **Solving the facility layout problem with simulated annealing**, Technical Report 91-20, University of Michigan, United States of America, 1992.

METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, A.W.; ROSENBLUTH, M.N.; TELLER, A.H.; **Equation of State Calculations by Fast Computing Machines**, The Journal of Chemical Physics, Chicago, Illinois, 21, pgs. 1087-1092, 1953.

NAVARRO, A.F.A.; QUELHAS, O.L.G.; **Os acidentes industriais e suas consequências**; 4th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, Donostia – San Sebastían, pgs 652-661, 2010.

Norma Técnica P4.261 - Manual de orientação para a elaboração de estudos de análise de riscos, CETESB, São Paulo, 2003.

PAPADAKIS, G.A.; AMENDOLA, A.; **Guidance on the preparation of a safety report to meet the requirements of council directive 96/82/EC (SEVESO II)**, Joint Research Centre European Commission, EUR 17690 EN, Luxembourg, 1997.

PATSIATZIS, D.I.; KNIGHT, G.; PAPAGEORGIOU, L.G.; **An MILP approach to safe process plant layout**, Chemical Engineering Research and Design, Institution of Chemical Engineers, London, UK, 82, pgs. 579-586, 2004.

POVOA, A.P.B.; MATEUS, R.; NOVAIS, A.Q.; **Optimal Design and Layout of Industrial Facilities: A Simultaneous Approach**, Industrial & Engineering Chemistry Research, United States of America, 41, pgs. 3601-3609, 2002.

PUIATTI, R.; **A prevenção e os trabalhadores – aspectos comparativos da legislação dos EUA, da Grã-Bretanha e da Holanda**. In: Freitas, C. M; Porto, M. F .S.; Machado, J. M. H. (Orgs.). Acidentes industriais ampliados: desafios e perspectivas para o controle e a prevenção, Editora Fiocruz, Rio de Janeiro, 2000.

Reference Manual Bevi Risk Assessment, RIVM (National Institute of Public Health and the Environment), version 3.2, The Netherlands, 2009.

Resolução CEPRAM Nº 3.965 – Norma Técnica NT – 01/2009: Gerenciamento de Risco no Estado da Bahia, Salvador, 2009.

Risk-Based Inspection Technology - API (American Petroleum Institute) Recommended Practice 581, 2nd Edition, Washington D.C., 2008.

ROCHA JR., E.; COSTA, M.C.M.; GODINI, M.D.; **Acidentes ampliados e as normas internacionais: "Diretiva de Seveso" e a Convenção nº174 da Organização Internacional do Trabalho**; II workshop Gestão Integrada: Risco e Sustentabilidade, São Paulo, pgs. 1-9, 2006.

ROSA, E.A.; RENN, O.; JAEGER, C.; **Risk as challenge to cross-cultural dialogue**, 32nd congress – Dialogue between cultures and changes in Europe and the World, Trieste – International Institute of Sociology, pgs.3-7, 1997;

SINGH, S.P.; SHARMA, R.R.K.; **A review of different approaches to the facility layout problems**, The International Journal of Advanced Manufacturing, London, 30, pgs.425-433, 2005.

SUTTON, O. G.; **Micrometeorology: A Study of Physical Processes in the Lowest Layers of the Earth's Atmosphere**, New York, 1953.

VAN LAARHOVEN, P.J.M.; AARTS, E.H.L.; **Simulated Annealing: Theory and Applications**, Reidel, Dordrecht, The Netherlands, 1987.

VÁZQUEZ-ROMAN, R., LEE, J. H., JUNG, S., MANNAN, M.S.; **Optimal facility layout under toxic release release in process facilities: A stochastic approach**, Computers and Chemical Engineering, Quebec, Canada, 34, pgs. 122-133, 2010.

WOLLER, J.; **The Basics of Monte Carlo Simulations**, Physical Chemistry Lab, Spring: University of Nebraska – Lincoln, 1996.