



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

GISELE TATIANE DE LIMA E SILVA

**APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE DIJKSTRA NA OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO
DE ROTAS DE EVACUAÇÃO EM CENÁRIOS DE NUVEM TÓXICA**

Recife

2017

GISELE TATIANE DE LIMA E SILVA

**APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE DIJKSTRA NA
OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO DE ROTAS DE
EVACUAÇÃO EM CENÁRIOS DE NUVEM TÓXICA**

Dissertação de Mestrado apresentada à UFPE
para a obtenção de grau de Mestre como parte
das exigências do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Produção

Área de Concentração: Pesquisa Operacional.

Orientador: Márcio José das Chagas Moura,
DSc.

Recife

2017

Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

S586a Silva, Gisele Tatiane de Lima e.
Aplicação do algoritmo de DIJKSTRA na otimização multiobjetivo de rotas de evacuação em cenários de nuvem tóxica / Gisele Tatiane de Lima e Silva. - 2017.
100 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Márcio José das Chagas Moura, DSc.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2017.

Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia de Produção. 2. Rotas de evacuação. 3. Otimização multiobjetivo.
4. Algoritmo de *Dijkstra*. 5. Tempo de evacuação. 6. Risco individual. I. Moura, Márcio José das Chagas (Orientador). II. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-213

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO ACADÊMICO DE

GISELE TATIANE DE LIMA E SILVA

“APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE DIJKSTRA NA OTIMIZAÇÃO
MULTIOBJETIVO DE ROTAS DE EVACUAÇÃO EM CENÁRIOS DE NUVEM
TÓXICA”

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do(a) primeiro(a), considera a candidata **GISELE TATIANE DE LIMA E SILVA, APROVADA.**

Recife, 27 de Abril de 2017.

Prof. MÁRCIO JOSÉ DAS CHAGAS MOURA, Doutor (UFPE)

Profª. ISIS DIDIER LINS, Doutora (UFPE)

Profª. CELMY MARIA BEZERRA DE MENEZES BARBOSA, Doutora (UFPE)

A Deus
À minha família

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer inicialmente a Deus, pois Ele me guiou em todos os momentos de minha vida e me fez acreditar que tudo acontece por uma razão.

Também agradeço ...

Aos meus pais, Ana Magali Lima e Gilberto Alves, por todo amor e suporte para esclarecer todas as dúvidas vividas.

A meu irmão Edgar Lima por toda a ajuda e incentivo.

Ao meu outro irmão Ewerthon Macial, juntamente com sua esposa, Luciana Fonseca, e filha, Sofia Fonseca, a minha cunhada Emília Braz e seu filho Luiz Pedro Lima, a meu padrinho Ruberson Almeida, a minha madrinha Adail Gomes, a minha prima Adayla Almeida e seu esposo Adriano Amaral e filho Pedro Amaral pelos momentos de descontração juntamente com o restante da família.

A Caio Souto Maior, Everton Tozzo, Patrícia Vieira e Thaís Corrêa pelas horas de estudos, pelos momentos de alegria e pela profunda amizade. Queridos amigos que surgiram quando eu nem esperava e que adquiriram o direito de espaço em meu coração.

A todos os meus amigos que mesmo indiretamente me compreenderam e me ajudaram.

Aos professores do PPGEP pelos novos conhecimentos adquiridos, em especial Isis Lins e Márcio Moura.

Ao meu professor e orientador Márcio Moura, por toda ajuda na pesquisa e em outras atividades.

À equipe CEERMA, em especial July Bias, Yan Antonino e Erika Silva, por toda a ajuda durante esses meses e fase final do trabalho.

À CAPES pelo suporte financeiro.

RESUMO

A otimização das rotas de evacuação pode ser considerada como uma das ferramentas que auxiliam o desenvolvimento do planejamento de segurança. O estudo das consequências de nuvens tóxicas é bastante importante devido a sua severidade em relação aos outros tipos de acidentes. Apesar disso, a liberação de nuvens tóxicas ainda ocorre, como no Porto de Santos (2016). Por isso, na elaboração deste trabalho foi calculada a melhor rota de fuga em cenários em que ocorre formação de nuvem tóxica em uma refinaria de petróleo hipotética. Isso foi executado através do algoritmo de Dijkstra considerando dois objetivos a serem minimizados: tempo de evacuação e risco individual durante o trajeto. A dissertação foi desenvolvida em algumas etapas. A primeira consistiu em compreender os processos, identificar e avaliar os riscos que envolvem as unidades de destilação atmosférica, coqueamento retardado e hidrotratamento de uma refinaria hipotética. Então, o *software* ALOHA foi usado para a análise quantitativa de cada hipótese levantada e também para obtenção do perfil de concentrações tóxicas para cada nó pertencente a uma rota de evacuação. O resultado da etapa anterior foi aplicado em um programa desenvolvido em C++, em que o algoritmo de Dijkstra foi utilizado para a otimização multiobjetivo e, com isso, foram encontrados os nós que compõem as melhores rotas de evacuação em relação aos objetivos de interesse. Para cada uma das quatro situações simuladas foi observada a melhor rota de evacuação em relação aos objetivos separadamente, foram vistas as influências que o tempo e o risco individual exercem no processo de escolha dos nós componentes das rotas ótimas e, logo depois, foram obtidas as rotas ótimas. Três cenários simulados foram referentes ao vazamento do sulfeto de hidrogênio em unidades básicas de processamento do petróleo (unidade de destilação atmosférica, coqueamento retardado e hidrotratamento), o último cenário busca rotas de evacuação em caso de acidente na refinaria hipotética, sem identificação da origem do vazamento do H₂S. Além disso, também foi realizada uma análise de sensibilidade a fim de comprovar o modo de obtenção de alguns parâmetros relacionados ao tempo de evacuação.

Palavras-chave: Rotas de evacuação. Otimização multiobjetivo. Algoritmo de Dijkstra. Tempo de evacuação. Risco individual.

ABSTRACT

The optimization of evacuation routes is considered an important aspect on the development of security planning. The study of the consequences of toxic clouds is very important due to its severity in relation to other types of accidents. Despite this, a release of toxic clouds still occurs, such as Porto de Santos (2016). Therefore, in the elaboration of this work optimum escape routes were calculated in scenarios where the formation of toxic cloud occurs in a hypothetical petroleum refinery. The optimum routes were obtained via a Dijkstra algorithm that considers minimization of two objectives: evacuation time and individual risk during the escape. The dissertation was developed in some phases. The first one was to understand the process, identify and assess the risks involved in the atmospheric distillation unit, delayed coking unit and hydrotreating unit within a refinery. The ALOHA software was used to obtain the quantitative analysis of each simulated hypothesis and reveals concentration profiles, that is, the concentration of each node that belongs to an evacuation route. The result of the previous step was applied in a program developed in C++, where the Dijkstra algorithm was used for multi-objective optimization and with this, it showed the nodes that compose the best evacuation routes in relation to the shortest evacuation time and the shortest individual risk of that journey. In every simulated situation, we can observe the optimal evacuation route for each objective separately and also the influence of evacuation time and individual risk on the selection of nodes for the routes and then we obtain the optimum routes. Three simulated scenarios were related to the leakage of hydrogen sulphide in basic petroleum processing units (atmospheric distillation unit, delayed coking unit and hydrotreatment unit), the last scenario search for evacuation routes in case of an accident in the hypothetical refinery, without identification of the origin of the H₂S leakage. In addition, a sensitivity analysis was also performed to prove the way of obtaining some parameters related to evacuation time.

Keywords: Evacuation route. Multi-objective optimization. Dijkstra algorithm. Evacuation time. Individual risk.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Esquema simplificado do processo de destilação atmosférica.....	20
Figura 2.2 – Esquema simplificado do processo de coqueamento retardado.....	21
Figura 2.3 – Esquema simplificado do processo de hidrotreatamento.....	22
Figura 2.4 – Principais metodologias de análises e avaliação de riscos.....	23
Figura 2.5 – Áreas de risco para plantas perigosas (a) e para tubovias perigosas (b).....	25
Figura 2.6 – Diferença entre os riscos individual (RI) e social (RS).....	27
Figura 2.7 – Exemplo de Curva F-N.....	27
Figura 2.8 – Elementos do plano de evacuação.....	29
Figura 2.9 – Exemplo de Frente de Pareto (linha destacada) para um problema biobjetivo....	32
Figura 2.10 – Algoritmo de Dijkstra.....	34
Figura 3.1 – Etapas da metodologia.....	41
Figura 3.2 - Fluxograma de simulação no ALOHA.....	42
Figura 3.3- Conjunto de rotas de evacuação.....	45
Figura 3.4 – Variação devido mudanças no α e β nas situações analisadas.....	52
Figura 3.5 – Fluxograma da otimização multiobjetivo.....	54
Figura 3.6 – Algoritmo I.....	55
Figura 3.7 – Algoritmo II.....	57
Figura 3.8 – Algoritmo III.....	58
Figura 4.1 – Dispersão da nuvem tóxica no cenário 1 – UDA (tela de saída do ALOHA).....	61
Figura 4.2 - Dispersão da nuvem tóxica no cenário 2 – UCR (tela de saída do ALOHA).....	62
Figura 4.3 - Dispersão da nuvem tóxica no cenário 3 – HDT (tela de saída do ALOHA).....	64
Figura 4.4 – Rotas ótimas de evacuação no cenário 1 – UDA.....	67
Figura 4.5 - Rotas ótimas de evacuação no cenário 2 – UCR.....	73
Figura 4.6 - Rotas ótimas de evacuação no cenário 3 – HDT.....	74
Figura 4.7 - Rotas ótimas de evacuação no cenário 4 – Refinaria.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Elementos químicos no petróleo.....	17
Tabela 2.2 – Efeitos físicos nos homens devido contato com H ₂ S	18
Tabela 2.3 – Etapas e processos de uma refinaria	19
Tabela 2.4 - Modelo de APR	24
Tabela 2.5 - Severidade das consequências.....	24
Tabela 2.6 - Camadas de proteção	28
Tabela 3.1 - Dados de entrada no ALOHA referente à construção e às condições atmosféricas.....	43
Tabela 3.2 - Dados de entrada no ALOHA referente ao cenário 1 - UDA	44
Tabela 3.3 - Dados de entrada no ALOHA referente ao cenário 2 - UCR.....	44
Tabela 3.4 - Dados de entrada no ALOHA referente ao cenário 3 - HDT.....	45
Tabela 3.5 – Diferentes variações para α e β	49
Tabela 3.6 – Diferença devido mudança no α e β para cada região	51
Tabela 3.7 – Limites de tolerabilidade de risco.....	56
Tabela 4.1 – Concentrações obtidas nos nós na rede para o cenário 1 - UDA.....	61
Tabela 4.2 – Concentrações obtidas nos nós na rede para o cenário 2 - UCR	63
Tabela 4.3 – Concentrações obtidas nos nós na rede para o cenário 3 - HDT	64
Tabela 4.4 – Resultados do cenário 1 - UDA	66
Tabela 4.5 – Resultados do cenário 2 - UCR	69
Tabela 4.6 – Resultados do cenário 3 - HDT	70
Tabela 4.7 – Concentrações obtidas nos nós na rede para o cenário 4 - Refinaria.....	75
Tabela 4.8 – Resultados do cenário 4 - Refinaria.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS

AAE	Análise de Árvore de Eventos
AAF	Análise de Árvore de Falhas
AEGL	<i>Acute Exposure Guideline Level</i> (Nível de Orientação de Exposição Aguda)
ALOHA	<i>Areal Locations of Hazardous Atmospheres</i>
APR	Análise Preliminar de Riscos
AQR	<i>Quantitative Risk Analysis</i> (Análise Quantitativa de Riscos)
D	Uma opção de classe de estabilidade atmosférica
DEA	Dietanolamina (substância química)
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i> (Agência de Proteção Ambiental)
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i> (Análise de Modo de Falha e Efeito)
GIS	<i>Geographic Information System</i> (Sistema de Informações Geográficas)
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
HAZOP	<i>Hazard and Operability Study</i> (Estudo de Perigos e Operabilidade)
HDT	Unidade de Hidrotratamento
HEAT	<i>Human Error Analysis Technique</i> (Técnica de Análise de Erro Humano)
IDLH	<i>Immediately Dangerous to Life or Health</i> (Imediatamente Perigoso à Vida ou à Saúde)
LOPA	<i>Layer of Protection Analysis</i> (Análise de Camada de Proteção)
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> (Administração Nacional Oceânica e Atmosférica)
NSGAI	<i>Nondominated Sorting Genetic Algorithm II</i>
pce	probabilidade de condições de explosão
pii	probabilidade de ignição imediata
pir	probabilidade de ignição retardada
PRAT	<i>The Proportional Risk-Assessment Technique</i> (Avaliação de Risco Proporcional)
RBD	<i>Reability Block Diagram</i> (Diagrama de Bloco de Confiabilidade)
RI	Risco Individual
RS	Risco Social
SPEAI	<i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm</i>
UDA	Unidade de Destilação Atmosférica
UCR	Unidade de Coqueamento Retardado

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Considerações Iniciais.....	13
1.2	Justificativa	14
1.3	Objetivos	15
1.3.1	Objetivo Geral.....	15
1.3.2	Objetivos Específicos.....	15
1.4	Estrutura do Trabalho.....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	O petróleo e o contaminante H ₂ S.....	17
2.2	Unidades de Refino	18
2.1.1	Unidade de Destilação Atmosférica (UDA)	19
2.1.2	Unidade de Coqueamento Retardado (UCR).....	20
2.1.3	Unidade de Hidrotratamento (HDT)	21
2.3	Identificação e Quantificação dos Riscos.....	22
2.4	Planejamento de Segurança do Processo e Rotas de Evacuação.....	27
2.5	Otimização Multiobjetivo.....	30
2.6	Algoritmo de Dijkstra	32
2.7	Revisão de Literatura.....	35
3	METODOLOGIA.....	40
3.1	Análise Qualitativa de Risco.....	41
3.2	Cálculo das Consequências.....	42
3.2.1	Cenários de Interesse.....	43
3.3	Desenvolvimento do Conjunto de Rotas de Evacuação	45
3.4	Cálculo do Risco Individual	46
3.5	Cálculo do Tempo de Evacuação	47
3.5.1	Análise de Sensibilidade	48

3.6 Desenvolvimento da Otimização Multiobjetivo	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1 Resultados Obtidos no ALOHA.....	60
4.2 Resultados do Algoritmo de Dijkstra.....	65
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
5.1 Conclusões.....	78
5.2 Limitações e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	79
REFERÊNCIAS	80
APÊNDICES	94
Apêndice 1	94
Apêndice 2.....	99

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Uma indústria química, como uma refinaria ou petroquímica, possui diversos perigos inerentes ao seu processo, manuseando e produzindo produtos químicos perigosos ou operando em condições adversas de temperatura e pressão. Isso são as principais causas para a ocorrência de acidentes, podendo ter consequências bastante graves. A fim de prevenir ou reduzir os efeitos gerados por essas ocorrências, esforços devem ser aplicados para aumentar o nível de confiança dentro de um empreendimento. Por isso, é necessário um bom planejamento de segurança do processo nesses locais (FYFFE *et al.*, 2016; MANNAN, 2014).

Um planejamento de segurança é um sistema que tem como objetivos a prevenção, preparação, mitigação e resposta em casos de acidentes. Um plano de segurança de processo exige diferentes níveis de barreiras de proteção, atuando como medidas de prevenção dos acidentes e também como medidas mitigadoras deles. O conceito de barreira de proteção pode ser entendido como algum impedimento de material ou de serviço a fim de que seu avanço dentro de um local específico seja bloqueado (DUIJM, 2009; MANNAN, 2014; SHIMADA, 2015; SKLET, 2006).

O plano de resposta à emergência é a última camada de proteção a ser considerada e é parte essencial do processo de gestão de segurança da indústria. O principal objetivo em um planejamento de emergência é reduzir as consequências quando um cenário acidental está fora de controle. Um dos pontos importantes desse planejamento é o desenvolvimento de infraestrutura de emergência do empreendimento, como a criação de um bom sistema de comunicação, estrutura de suporte médico, construção e rotas de evacuação ou abrigos e outros (CCPS, 2001; MANNAN, 2014). Desde o Desastre de Bhopal foi dada uma maior importância para o estudo e análise de riscos e para o desenvolvimento de planejamento de segurança de processo em empreendimentos químicos (KHAN; ABBASI, 1998; KLETZ, 2009; LABIB, 2015).

Abrigos e rotas de evacuação são as principais opções utilizadas em situações de emergência. Os abrigos podem ser escolhidos quando fornecem o nível de proteção necessário. Caso contrário, a evacuação é aplicada. Neste caso, as pessoas são removidas de locais perigosos até pontos considerados seguros, onde há um maior nível de segurança para os

indivíduos; isto se houver tempo disponível para que essa remoção seja realizada (COVA; DENNISON; DREWS, 2011; GAI *et al.*, 2017; SAADATSERESHT; MANSOURIAN; TALEAI, 2009).

Em geral, planejamentos de fuga possuem rotas fixas e baseadas nas menores distâncias percorridas. Essa abordagem não é, necessariamente, a melhor de todas, pois os caminhos a serem percorridos podem estar bloqueados ou até não serem completamente seguros, no momento, para as pessoas. Por isso, outros meios para o processo de escolha da rota devem ser levantados, como a utilização da otimização multiobjetivo. O foco dessa otimização é oferecer o melhor caminho possível, assumindo que essa rota atenda simultaneamente a mais de um objetivo. Existem diversos algoritmos que podem ser utilizados como base para a resolução de problemas multiobjetivos, como o Algoritmo Genético e de Dijkstra (BANDARU; NG; DEB, 2017; HAN *et al.*, 2006; SAADATSERESHT; MANSOURIAN; TALEAI, 2009).

Portanto, a presente dissertação desenvolveu através do algoritmo de Dijkstra (AHUJA; MAGNANTI; ORLIN, 1993; CHEN *et al.*, 2014; DIJKSTRA, 1959; PENG *et al.*, 2012), considerado simples e eficiente, uma otimização multiobjetivo de rotas de evacuação, levando em consideração dois objetivos: a minimização do risco individual e o tempo percorrido durante a evacuação. Foram consideradas algumas hipóteses acidentais que envolvem a liberação de produto nocivo na atmosfera e, conseqüentemente, a ocorrência da formação de nuvens tóxicas em unidades de processamento de uma refinaria de petróleo teórica.

1.2 Justificativa

Graves conseqüências são originadas a partir da ocorrência de acidentes. Por exemplo, desastres envolvendo nuvem tóxica são considerados os mais letais entre outras tipologias acidentais mais comuns, tais como incêndio e explosão. Acidentes como o vazamento de ciclohexano em Flixborough (Inglaterra – 1974), liberação da dioxina TCDD (2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina) em Seveso (Itália – 1976), a liberação de metil isocianeto no Desastre em Bhopal (Índia – 1984) são os principais motivadores de pesquisas sobre acidentes com formação de nuvem tóxica (AMYOTTE *et al.*, 2016; KHAN; ABBASI, 1999).

Apesar do acréscimo de diretrizes e normas regulamentadoras para indústrias químicas (Diretiva 2012/18/UE – Seveso III, na União Européia; Norma Técnica p4.261: Risco de Acidente de Origem Tecnológica – Método para decisão e termos de referência, no Brasil; 29 CFR 1910.119: Gestão de Segurança de Processo de substâncias altamente perigosas –

Diretrizes de conformidade e procedimentos de execução, nos Estados Unidos da América; etc), imprevistos relacionados a essa tipologia acidental ainda ocorrem como a formação de fumaça tóxica oriunda de uma reação química, como a ocorrida no Porto de Santos, Brasil, em janeiro de 2016. Por isso, estudos de segurança de processo e de ocorrências tão graves como essas devem ser atualizados sempre. Assim, o foco deste trabalho foi a análise de acidentes em que nuvens tóxicas são as consequências e uma rota de evacuação ótima deve ser determinada como medida mitigadora de proteção (AMYOTTE *et al.*, 2016; CCPS, 2001; CETESB, 2016a).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Encontrar uma rota de evacuação ótima para cada evento simulado de liberação de nuvem tóxica em unidades de processamento básico de uma refinaria de petróleo hipotética utilizando o algoritmo de Dijkstra como ferramenta de otimização multiobjetivo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Compreender o perigo inerente em uma refinaria de petróleo;
- Entender a importância de uma análise qualitativa de risco;
- Realizar uma análise qualitativa nas unidades escolhidas;
- Identificar os possíveis eventos iniciadores de acidentes com nuvem tóxica;
- Efetuar uma análise quantitativa dos riscos;
- Realizar a otimização multiobjetivo a partir do algoritmo de Dijkstra para os eventos escolhidos;
- Analisar os resultados de rotas ótimas para os diversos eventos.

1.4 Estrutura do Trabalho

Para o melhor entendimento do trabalho, a dissertação foi estruturada da seguinte forma:

- Introdução: exposição das ideias iniciais, justificativa e objetivos da pesquisa.
- Fundamentação Teórica: são apresentados os conceitos abordados, sobre o petróleo e sulfeto de hidrogênio, refinaria e unidades de processamento do petróleo, riscos e técnicas de identificação e quantificação, planejamento de segurança de processo, otimização multiobjetivo, algoritmo de Dijkstra e revisão de literatura.

- Metodologia: neste capítulo, é demonstrado o método aplicado para o desenvolvimento do trabalho e os cenários simulados.
- Resultados e Discussão: são exibidos os resultados obtidos para os diferentes cenários acidentais escolhidos.
- Conclusões: São apontadas as limitações da dissertação e possíveis melhorias que podem ser agregadas a trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O petróleo e o contaminante H₂S

O petróleo é substância oleosa, de cor escura, e é constituída por uma mistura de hidrocarbonetos (compostos orgânicos formados pelos elementos químicos carbono e hidrogênio). As características do óleo podem variar de acordo com o reservatório que foi explorado. Pode-se encontrar petróleos mais densos, viscosos e de cor preta, como também, mais claros e com menor densidade (THOMAS, 2001).

Em geral, eles possuem uma composição elementar similar, mostrada na Tabela 2.1. Com isso, pode-se observar que os principais elementos que compõem o petróleo são o carbono, hidrogênio e o enxofre. O enxofre é considerado como um contaminante do petróleo e pode ser encontrado de diferentes formas, como presente em estruturas complexas (tiobenzeno, tiociclohexano, etc) e de maneira livre, como encontrado no composto inorgânico, sulfeto de hidrogênio (H₂S) (THOMAS, 2001).

Tabela 2.1 – Elementos químicos no petróleo

Elementos Químicos	Percentual
Carbono	83 – 87 %
Hidrogênio	11 – 14 %
Enxofre	0,06 – 8 %
Nitrogênio	0,11 – 1,7 %
Oxigênio	0,1 – 2 %
Metais	Até 0,3 %

Fonte: Thomas (2001)

O sulfeto de hidrogênio é um gás tóxico e inflamável, ou seja, é considerado bastante perigoso para os homens. O gás é incolor e é mais denso que o ar, fazendo com que os vapores se desloquem por grandes distâncias, em caso de condições climáticas favoráveis. Um vazamento desse gás somente pode ser percebido em baixas concentrações. Essas características tornam o sulfeto de hidrogênio ainda mais perigoso. O limite de teto para a substância adotado no Brasil é de 16 ppm, ou seja, uma exposição em vapores tóxicos com concentração acima desse valor de tolerância causará danos à saúde dos homens. O IDLH

(*Immediately Dangerous to Life or Health* - Imediatamente Perigoso à Vida ou à Saúde) também mostra a ameaça do H₂S, afirmando que nuvem tóxica de intensidade acima de 100 ppm coloca a vida de um indivíduo em risco. A toxicidade desse sulfeto pode afetar os olhos, sistema respiratório e até sistema nervoso, dependendo da situação (BARBUSINSKI *et al.*, 2017; CETESB, 2016b). A Tabela 2.2 mostra alguns efeitos físicos devido a exposição em determinada concentração química e tempo.

Tabela 2.2 – Efeitos físicos nos homens devido contato com H₂S

Concentração (ppm)	Tempo de contato	Efeitos
0,05 – 0,5	1 min	Detecção do odor característico
10 – 30	6 – 8 h	Irritação nos olhos
50 – 100	30 min – 1 h	Conjuntivite e dificuldades na respiração
150 – 200	2 – 15 min	Perda olfativa
250 – 350	2 – 15 min	Irritação nos olhos
350 – 450	2 – 15 min	Inconsciência, convulsão
500 – 600	2 – 15 min	Distúrbios respiratórios e circulatórios
700 – 1500	0 – 2 min	Colapso, morte

Fonte: Mainier & Viola (2005)

2.2 Unidades de Refino

Uma refinaria de petróleo é estabelecida a partir de processos físico-químicos de separação, cuja finalidade é a geração de produtos derivados, os quais se dividem em três categorias: combustíveis (gasolina, querosene, diesel, GLP, coque de petróleo e outros), não combustíveis (solventes, lubrificantes, asfalto, etc.) e matéria-prima de outras indústrias químicas (nafta, etano, propano, tolueno e mais outros). Esses produtos são bastante essenciais para a manutenção das atividades da sociedade. O desenvolvimento desses materiais depende da necessidade de consumo, que influencia o *layout* de cada refinaria. Além disso, as características do petróleo de carga também atuam na escolha das unidades que podem compor uma indústria de refinamento. A Tabela 2.3 mostra as etapas e alguns processos que podem ser encontrados em refinarias (EPA, 1995; SZKLO; ULLER, 2008). Nesta pesquisa, foi descrito o funcionamento dos processos da UDA (Unidade de Destilação Atmosférica), UCR (Unidade de Coqueamento Retardado) e HDT (Unidade de Hidrotratamento), sendo essas unidades

bastante significativas em qualquer refinaria, e, a partir deles, foram construídos todos os cenários estudados.

Tabela 2.3 – Etapas e processos de uma refinaria

Separação	- Destilação atmosférica - Destilação a vácuo - Estabilização de naftas - Desasfaltação a propano
Conversão	- Coqueamento retardado - Craqueamento térmico ou catalítico - Hidrocraqueamento - Reforma catalítica
Tratamento	- Hidrotratamento - Tratamento cáustico - Tratamento DEA (dietanolamina)
Auxiliares	- Geração de hidrogênio - Recuperação de enxofre - Utilidades (geração de vapor, água tratada, etc.)

Fonte: Szklo & Uller (2008)

2.1.1 Unidade de Destilação Atmosférica (UDA)

É considerada umas das unidades mais importantes de uma refinaria, pois é nessa etapa que ocorre a primeira separação do óleo cru em produtos. A destilação é um processo físico em que a fragmentação do petróleo se dá devido às diferentes temperaturas de ebulição e condensação dos produtos finais (EPA, 1995; FAHIM; AL-SAHHAF; ELKILANI, 2012; SZKLO; ULLER, 2008).

O óleo, dessalgado e aquecido em etapas iniciais, segue para a torre de destilação (Figura 2.1). Parte da carga de alimentação da torre atmosférica entra parcialmente vaporizada e, a partir disso, são realizados os cortes laterais, os quais são feitos na torre em diversas alturas representadas na Figura 2.1 e correspondem às diferentes faixas de temperatura de condensação. Em cada refinaria, as alturas desses estágios variam, pois, a configuração da torre de destilação atmosférica varia com as características físicas (pressão e temperatura) a serem empregadas e também com as propriedades (densidade, viscosidade, etc) do petróleo usado como corrente de carga. As frações de produtos considerados leves quanto à densidade (hidrocarbonetos metano,

etano e $C_3 - C_{12}$, $< 180^\circ\text{C}$) são coletadas no topo da torre, e as frações mais pesadas (acima de C_{22} , $> 360^\circ\text{C}$) não vaporizam e são recolhidas no fundo da coluna; também existem as frações intermediárias. Os produtos mais leves podem ser direcionados às unidades de tratamento e os restantes são levados às unidades de conversão (EPA, 1995; FAHIM; AL-SAHHAF; ELKILANI, 2012; SZKLO; ULLER, 2008). Além da coluna de destilação, nessa e nas outras unidades, são utilizadas tubulações e bombas para o transporte dos produtos.

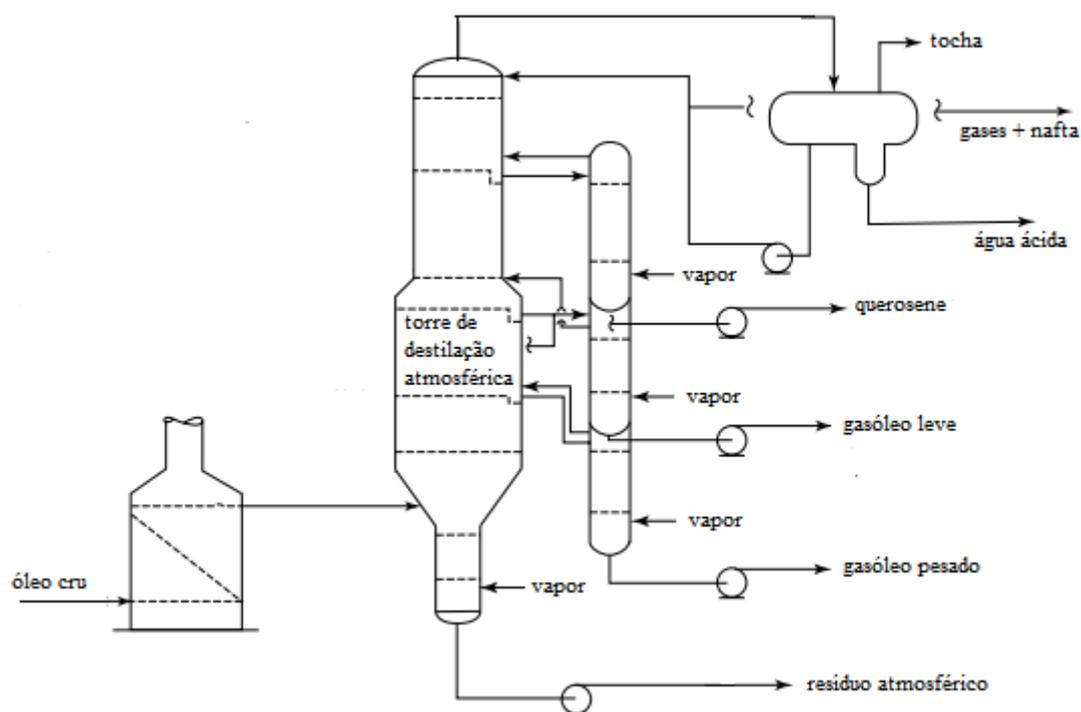


Figura 2.1 – Esquema simplificado do processo de destilação atmosférica

Fonte: Jones & Pujadó (2008)

2.1.2 Unidade de Coqueamento Retardado (UCR)

O coqueamento retardado faz parte da etapa de conversão de uma refinaria; é um processo térmico de quebra de moléculas grandes e os principais objetivos são a recuperação dos produtos leves que foram arrastados junto com as frações mais pesadas e a formação de coque, podendo ser utilizado como combustível para geração termoelétrica (EPA, 1995; FAHIM; AL-SAHHAF; ELKILANI, 2012; SZKLO; ULLER, 2008).

A carga de alimentação é aquecida em uma fornalha e orientada para as câmaras de coqueamento, onde irá formar o coque. A reação ocorre de maneira progressiva; quando o

primeiro tambor de coque é completado, a corrente segue para o próximo situado em série. A parcela de hidrocarbonetos leves e contaminantes são levados ao fracionador, onde se separam os contaminantes ácidos. Quando os reatores estão completos, é adicionado vapor de água em alta pressão que serve para retirar os possíveis leves ainda presentes e remover o coque. Os produtos menos densos são levados para as unidades de tratamento, enquanto o coque é seco e a água é reciclada (EPA, 1995; FAHIM; AL-SAHHAF; ELKILANI, 2012; SZKLO; ULLER, 2008). Esse processo é ilustrado na Figura 2.2.

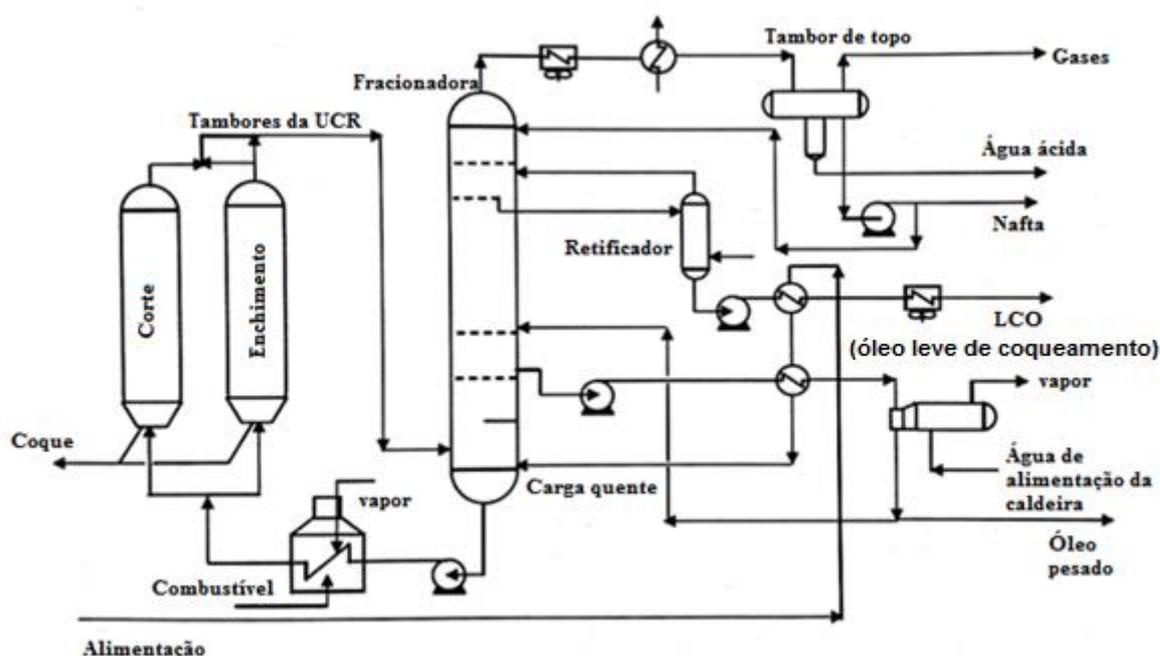


Figura 2.2 – Esquema simplificado do processo de coqueamento retardado

Fonte: Fahim; Al-Sahhaf & Elkilani (2012)

2.1.3 Unidade de Hidrotratamento (HDT)

O hidrotratamento é um dos tipos de procedimentos em que os hidrocarbonetos reagem com o hidrogênio. Tem como função a remoção de contaminantes (enxofre, nitrogênio, oxigênio e metais) de correntes de hidrocarbonetos e a conversão de oleofinas e dioleofinas em parafinas a fim de garantir que a qualidade do produto final seja alcançada. Em geral, ficam localizadas anteriormente às unidades catalíticas, pois as impurezas removidas poderiam inibir os catalisadores utilizados (EPA, 1995; FAHIM; AL-SAHHAF; ELKILANI, 2012; SZKLO; ULLER, 2008).

A corrente de entrada é misturada com hidrogênio e carrega um aquecedor. Após essa etapa, é levada a um forno, onde a temperatura atinge o valor ótimo. A mistura na temperatura de reação chega no reator catalítico. No reator, ocorre a reação e são encaminhados os efluentes para resfriamento. Ocorre a separação do gás com o hidrogênio através do uso de um separador de alta pressão. O efluente líquido segue para uma fracionadora. Os principais produtos do HDT são hidrocarbonetos leves, ácido sulfídrico e carga tratada (EPA, 1995; FAHIM; AL-SAHHAF; ELKILANI, 2012). A Figura 2.3 mostra o processo de hidrotratamento comentado.

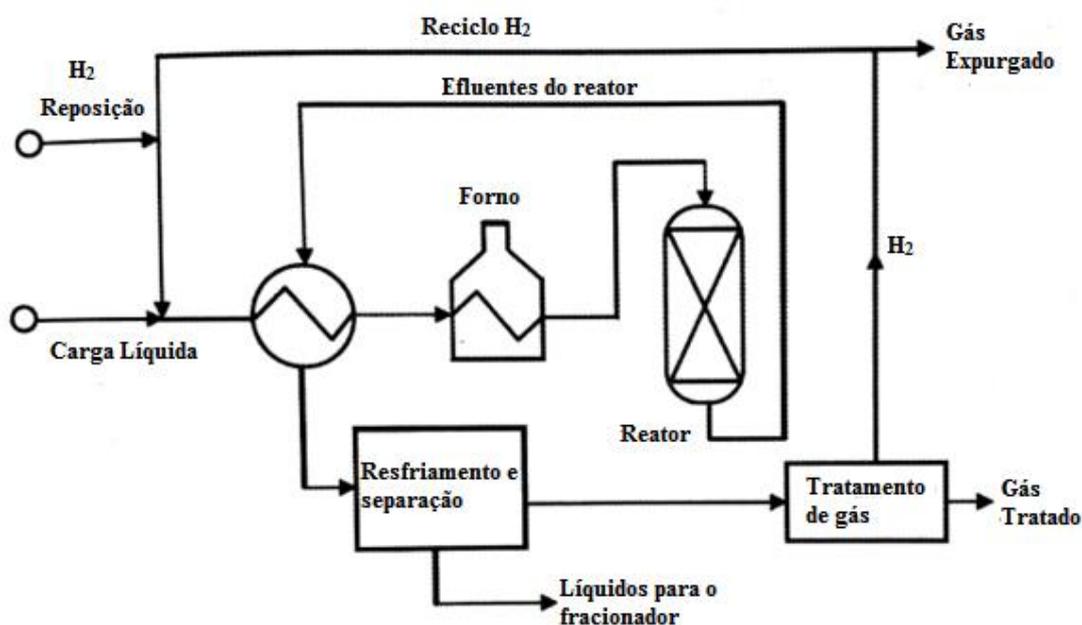


Figura 2.3 – Esquema simplificado do processo de hidrotratamento

Fonte: Fahim; Al-Sahhaf & Elkilani (2012)

2.3 Identificação e Quantificação dos Riscos

Para analisar os riscos nas unidades de processamento de petróleo é necessário entender o conceito de risco, o modo de identificá-lo, avaliá-lo e quantificá-lo.

O risco pode ser estabelecido de diferentes maneiras. Em geral, todos esses meios estão relacionados com uma perda inesperada e que deve ser impedida de ocorrer. Outros estudos (ISO, 2009; ZIO, 2006) explicam o risco de diferentes formas, por exemplo, como sendo a associação entre a medida de probabilidade de ocorrência de um evento e suas consequências ou como a relação entre o cenário, a probabilidade de ocorrência dele e seu efeito (AVEN, 2010).

Para que os riscos possam ser controlados, é necessário identificá-los e avaliá-los. Isso pode ser realizado durante um estudo de análise de risco que também visa quantificar as frequências e seus efeitos físicos, avaliar a vulnerabilidade e estimar o risco qualitativa ou quantitativamente.

Existem várias técnicas que podem ser utilizadas para o desenvolvimento de uma análise de risco. A Figura 2.4 mostra algumas dessas técnicas que podem ser usadas na etapa qualitativa, quantitativa ou em ambas as fases de uma análise. Dentre elas, HAZOP (Estudo de Perigos e Operabilidade - *Hazard and Operability study*) (KOTEK; TABAS, 2012), APR (Análise Preliminar de Riscos) (NOLAN, 2015), AQR (Análise Quantitativa de Risco - *Quantitative Risk Analysis*) (PASMAN; RENIERS, 2014), AAF (Análise de Árvore de Falhas) (RUIJTERS; STOELINGA, 2015), AAE (Análise de Árvore de Eventos) (ROSQVIST *et al.*, 2013) e outros (CCPS, 2008; MARHAVILAS; KOULOURIOTIS; GEMENI, 2011).

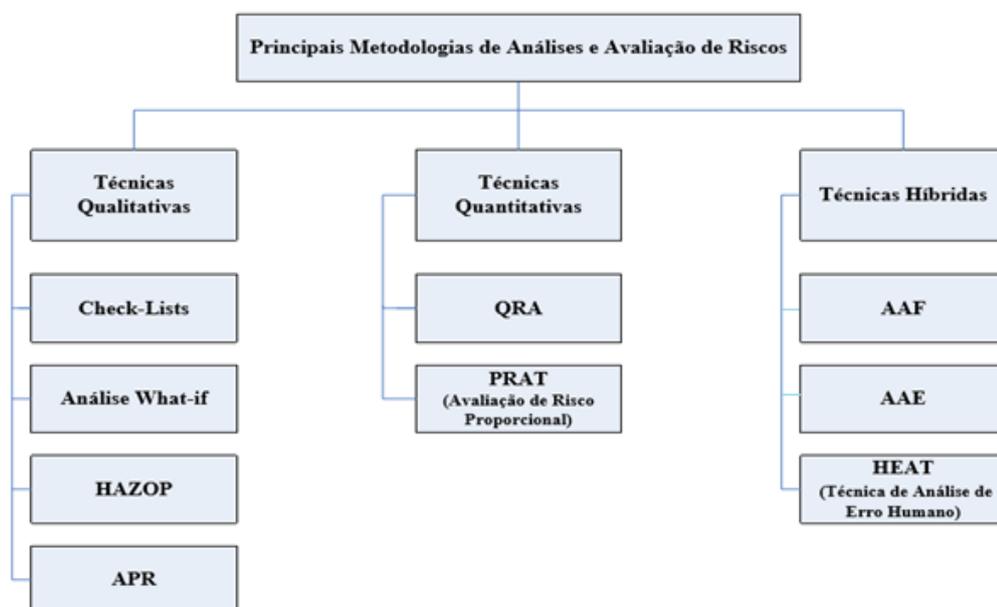


Figura 2.4 – Principais metodologias de análises e avaliação de riscos

Fonte: Marhavidas; Koulouriotis & Gemeni (2011)

Em geral, as técnicas qualitativas são utilizadas para realizar a definição do sistema e escopo do processo, identificação dos riscos, modos de falhas e os cenários acidentais que podem ser encontrados em um empreendimento. Uma técnica bastante utilizada é a Análise Preliminar de Risco (APR), em especial nas etapas iniciais de um projeto (BASU, 2016; CCPS,

2008). O principal foco dessa análise é identificar os maiores perigos que possam ser encontrados dentro da área industrial. Em geral, essa etapa é precursora de uma análise quantitativa mais completa. Uma APR resulta em uma lista de riscos e, associados a eles, atribuem-se possíveis causas e consequências. Por fim, apontam-se medidas de prevenção e mitigação dos riscos encontrados (CCPS, 2008; CETESB, 2014; JONKMAN; VAN GELDER; VRIJLING, 2003).

A Tabela 2.4 é utilizada aqui como modelo de APR e mostra todas as informações que devem ser coletadas para o desenvolvimento dessa técnica. Pode-se desenvolver uma classificação das consequências quanto à severidade em relação ao risco pessoal, servindo como forma de priorizar o risco a ser reduzido e podendo seguir os valores ilustrados na Tabela 2.5.

Tabela 2.4 - Modelo de APR

Área/Unidade:				
Sistema:				
Descrição:				
Risco	Causas	Consequências	Categoria de Risco (pessoal)	Medidas Preventivas e Mitigadoras

Fonte: Esta pesquisa (2017)

Tabela 2.5 - Severidade das consequências

Categorias de Severidade das Consequências	Status	Impactos (Risco Pessoal)
I	Desprezível	Sem nenhum impacto nas pessoas
II	Marginal	Dano temporário (pouco tempo de afastamento de trabalho)
III	Média	Danos permanentes
IV	Crítica	1 – 2 Fatalidades, múltiplos danos permanentes
V	Catastrófica	Múltiplas fatalidades

Fonte: Basu (2016)

As metodologias classificadas como quantitativas conseguem avaliar de uma maneira mais detalhada, por meio da estimação das frequências e consequências e, por isso, podendo-se tomar as ações mais adequadas para tornar uma indústria química mais segura (JONKMAN; VAN GELDER; VRIJLING, 2003). Na AQR, pode-se avaliar a razoabilidade do risco, determinar as distâncias delimitadas ao redor do empreendimento, entre outros. Conseqüentemente, a AQR é uma ferramenta para o gerenciamento dos riscos e, através dela, calculam-se os riscos individual e social (CCPS, 2000; MARHAVILAS; KOULOURIOTIS; GEMENI, 2011).

Para o cálculo da etapa quantitativa utilizam-se os modelos de efeitos físicos, como Modelo Multi-Energia (fogo e explosões) (MANCARELLA, 2014; TNO, 2005a), Modelo de Probit (TNO, 2005b), entre outros. Como forma de auxiliar esses cálculos recorre-se a programas computacionais como o ALOHA, EFFECTS, e outros (EPA, 2016; TNO, 2016; TNO, 2005b).

O Risco Individual (RI) associa a probabilidade de morte ou de danos à saúde de um indivíduo, em decorrência dos efeitos de um ou mais cenários acidentais, com a sua localização durante esse evento; sendo assim, o RI é uma característica geográfica e não uma medida pessoal (BOTTELBERGHS, 2000; JONKMAN; VAN GELDER; VRIJLING, 2003; MARHAVILAS, KOULOURIOTIS; GEMENI, 2011). O RI pode ser útil na definição de áreas de riscos (contornos de risco), representadas por L1, L2 e L3 na Figura 2.5, para indústrias químicas e também para dutos e tubovias que transportam produtos perigosos.

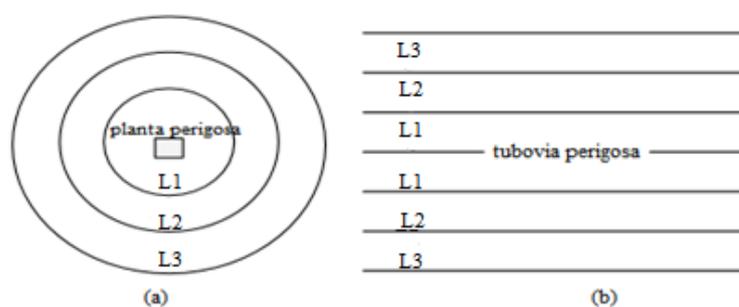


Figura 2.5 – Áreas de risco para plantas perigosas (a) e para tubovias perigosas (b)

Fonte: Zhou & Liu (2011)

A toxicidade pode causar danos ao homem e ao patrimônio de uma organização. Por isso, é necessário o cálculo do risco individual (RI) (BOTTELBERGHS, 2000). A Equação (2.1) mostra que a partir da probabilidade de falha (P_f) e a probabilidade de morte em caso de ocorrência dessa falha ($P_{m/f}$) pode-se obter o valor do risco do indivíduo para a tipologia acidental i na localização x, y (GAI *et al.*, 2017; ZHOU; LIU, 2011).

$$RI_{x,y,i} = P_f \times P_{m/f} \quad (2.1)$$

A Equação (2.2) mostra que o risco individual total para a localização x,y é dado pelo somatório dos riscos dos diferentes tipos de cenários i que ocorrem nas coordenadas x e y (CETESB, 2014).

$$RI_{x,y} = \sum_{i=1}^n RI_{x,y,i} \quad (2.2)$$

O outro risco que pode ser quantificado é o Risco Social (RS), que é dito como risco para um grupo de indivíduos ao redor da instalação química ou tubovias que podem morrer devido à presença de alguma atividade perigosa, definindo-se como uma conexão entre a frequência de ocorrência (F) e a quantidade de pessoas (N). O RS independe da localização das pessoas inseridas na área de risco, diferentemente do Risco Individual, sendo, portanto, caracterizado pelo tipo de atividade que é executada (quanto mais perigosa, pior o risco, como a produção de substâncias tóxicas em relação a uma construção civil) (BOTTELBERGHS, 2000; JONKMAN; VAN GELDER; VRIJLING, 2003).

A Figura 2.6 ilustra essa diferença entre o RI e o RS, em que são apresentadas duas situações A e B em que os riscos individuais (RI e RI') diferem devido à distância da fonte de risco. Portanto, em geral, os riscos individuais nas situações A e B são iguais. Porém, o RS, na situação A, é mais baixo devido à menor densidade de pessoas. O resultado do cálculo do RS é mostrado através da curva F-N, a qual indica a frequência acumulada de ocorrência dos cenários acidentais (F – eixo vertical) pela quantidade de vítimas fatais na região (N – eixo horizontal) e é ilustrada pela Figura 2.7. O critério de risco social (reta de cor mais clara) é escrito na forma: $10^{-3}/N^2$ por ano, sendo essa a frequência máxima por ano aceitável para qualquer acidente no

estabelecimento que causaria mais do que N vítimas fatais fora desse ambiente. A curva de cor mais escura representa o comportamento do RS em um empreendimento estudado.

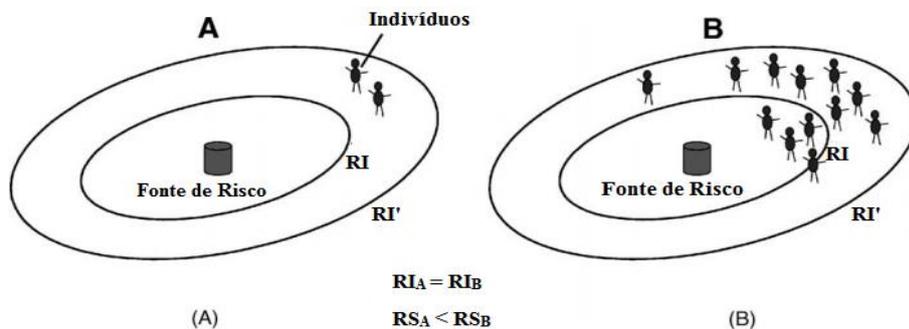


Figura 2.6 – Diferença entre os riscos individual (RI) e social (RS)

Fonte: Jonkman; Van Gelder & Vrijling (2003)

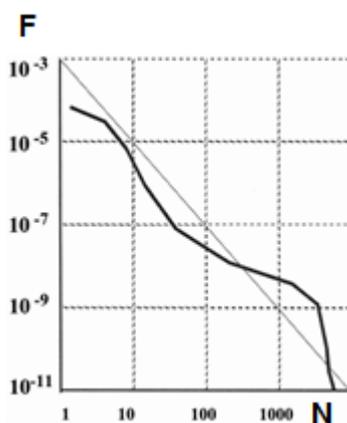


Figura 2.7 – Exemplo de Curva F-N

Fonte: Bottelberghs (2000)

2.4 Planejamento de Segurança do Processo e Rotas de Evacuação

As indústrias químicas, como as refinarias, podem ser caracterizadas pelo processo e armazenamento de produtos químicos perigosos e, conseqüentemente, podem ter valores altos de riscos. Por conseqüência, esses empreendimentos têm a preocupação em evitar a perda de material e, assim, proteger as pessoas e o meio ambiente. As camadas de proteção dão suporte para que esses objetivos sejam alcançados.

O conceito de camadas de proteção é bastante utilizado para a avaliação dos riscos que uma indústria de processo pode conter. As barreiras de proteção têm como objetivos a

prevenção, proteção e mitigação dos acidentes, fazendo com que a probabilidade de propagação das consequências seja pequena. A prevenção envolve aplicar medidas a fim de que os acidentes não se desenvolvam. Quando as barreiras preventivas não têm sucesso, o próximo objetivo é proteger o empreendimento do vazamento do produto químico. As atividades protetivas envolvem a detecção, contenção e neutralização das substâncias. Quando essas etapas também falham, deve-se entrar com as medidas mitigadoras (CCPS, 2001; MARKOWSKI; MANNAN, 2010). A Tabela 2.6 resume os objetivos e as fases que envolvem as camadas de proteção em empreendimentos. Uma das barreiras de mitigação é o planejamento de emergência, sendo essencial para o funcionamento de uma indústria química.

Tabela 2.6 - Camadas de proteção

Camada de Proteção	Sistema de Classificação de Barreiras	Requisitos
Prevenção	Design de processo	Prevenir o desenvolvimento do desvio das condições operacionais e reduzir a frequência dos possíveis cenários de acidentes
	Controles básicos	
Proteção	Sistema de Segurança Instrumentada	Retardar o desenvolvimento de um cenário de acidente e reduzir a probabilidade e gravidade das consequências
	Dispositivos de Alívio Físico	
	Sistemas de Proteção Passiva	
Mitigação	Sistema de Proteção Ativa	Mitigar a gravidade das consequências das liberações dentro e fora do empreendimento
	Planejamento de Resposta à Emergência	
	Resposta de Emergência à Comunidade	

Fonte: CCPS (2001); Markowski & Mannan (2010)

O planejamento de evacuação integra o plano de resposta à emergência. Uma evacuação ocorre a partir de um movimento rápido e imediato a fim de evitar prejuízo à saúde das pessoas inseridas no ambiente do acidente. O planejamento de escape pode ser influenciado por diferentes fatores, como a propagação do perigo, planta do local, estimativa do comportamento

das pessoas em situações de pânico e outros (GEORGIADOU *et al.*, 2007; MANNAN, 2014; SHEN *et al.*, 2015). A Figura 2.8 ilustra os elementos que interferem no plano de evacuação.



Figura 2.8 – Elementos do plano de evacuação

Fonte: Shen *et al.* (2015)

Diversas metodologias foram estudadas e desenvolvidas para aplicação de simulação de evacuação. Esses métodos podem ser classificados em modelos macroscópicos, microscópicos e mesoscópicos. Os modelos macroscópicos não levam em consideração o comportamento do indivíduo na situação de pânico e acabam admitindo a passagem das pessoas de um local para o outro como um movimento em fluxo. Já os microscópicos consideram o indivíduo e sua interação com as outras pessoas e com o ambiente, como características físicas da população estudada, conhecimento da rota de fuga, etc. Os modelos mesoscópicos possuem atributos de ambas classes como em estudos em que o objetivo é encontrar o caminho a ser percorrido durante uma emergência de maneira dinâmica e também de acordo com alguns critérios, como preferência de escolha de destino final (devido à presença de um familiar ou amigo em diferente destino), o fator de risco (a mudança da direção do vento durante o desastre), o custo de movimentação e outros. A pesquisa pode ser classificada como mesoscópica possuindo características mistas, como não considerar a interação entre as pessoas e ter funções objetivos dinâmicas (menor RI e tempo de evacuação são calculados para cada deslocamento do indivíduo no grafo) (DUIVES; DAAMEN; HOOGENDOORN, 2013; GAI *et al.*, 2017; GEORGIADOU *et al.*, 2007; MELO, 2015; SHEN *et al.*, 2015).

Outra maneira de classificar as metodologias de rota de fuga é através do modo de escolha dessa rota. Em alguns tipos, a rota de evacuação é pré-determinada, ou seja, a escolha dos nós e caminhos a serem percorridos foi anteriormente determinada. Em geral, são

escolhidas a partir de um plano de evacuação pré-existente ou baseado em cálculos realizados pelo decisor. O outro perfil de modelos de rota de evacuação é formado por aqueles que são determinados a partir de estudos de otimização, buscando assim a melhor rota de fuga para as pessoas em relação a algum fator importante, como o menor tempo de evacuação possível, menor risco encontrado durante a movimentação ou menor custo de trânsito possível, podendo até considerar mais de um fator simultaneamente. Porém, ainda existem poucos modelos apresentados para a resolução de otimização de rotas de evacuação em cenários de liberação de nuvem tóxica, sendo de grande importância devido ao número considerado alto em indústrias químicas (GAI *et al.*, 2017; GEORGIADOU *et al.*, 2007; GOERIGK; DEGHDAK; HEßLER, 2014; SHEN *et al.*, 2015).

2.5 Otimização Multiobjetivo

O processo de otimização busca encontrar a melhor decisão para algum cenário de interesse, estando presente em diferentes atividades como na aplicação de modelos matemáticos nas indústrias químicas e também em problemas teóricos (RANGAIAH, 2008; XIE; WALLER, 2011). Na otimização multiobjetivo, deseja-se encontrar a melhor solução a partir de mais de uma função objetivo (função das variáveis de decisão), satisfazendo as restrições do modelo. Em geral, essas funções são conflitantes e geram divergências entre elas. Estudar otimização multiobjetivo é bastante interessante devido à aproximação com um cenário real, no qual não existe um único desejo a ser atendido.

Um cenário prático da necessidade da aplicação de otimização multiobjetivo é no estudo de transporte de materiais perigosos que possui uma demanda alta e também é uma preocupação da população com as consequências de um possível desastre envolvendo o vazamento dessas substâncias. Por isso, fatores como eficiência, segurança e meio ambiente são considerados nessas otimizações (RANGAIAH, 2008; GEORGIADOU *et al.*, 2010; SAADATSERESHT; MANSOURIAN; TALEAI, 2009; XIE; WALLER, 2011).

O sistema de equações abaixo ilustra um modelo de otimização multiobjetivo, em que as Equações (2.3) e (2.4) representam as funções objetivos de um vetor de decisão x e a Equação (2.5) representam um conjunto de restrição do sistema.

$$\text{Minimizar } f_1(x) \tag{2.3}$$

$$f_2(\mathbf{x}) \tag{2.4}$$

$$\text{Sujeito a } \mathbf{h}(\mathbf{x}) \geq 0 \tag{2.5}$$

Existem diferentes métodos para a resolução de problemas multiobjetivo como o Método da Média Ponderada (MARLER; ARORA, 2004; MARLER; ARORA, 2009; NAIDU; MOKHLIS; BAKAR, 2014), Otimização de Pareto (MARLER; ARORA, 2004), etc. A abordagem da média ponderada consiste em transformar uma proposta de otimização de vários objetivos em uma função simples por meio de pesos ou graus de importância dados para cada função (w_i , onde $\sum_{i=1}^k w_i = 1$), assumindo a forma mostrada na Equação (2.6). A partir disso, pode ser resolvida através de abordagens tradicionais baseadas em gradiente (se a função escalar tiver forma convexa por função com um ótimo global) ou de algoritmos heurísticos (se a função tiver vários ótimos locais) (COELLO COELLO, 1999; KONAK; COIT; SMITH, 2006; SAADATSERESHT; MANSOURIAN; TALEAI, 2009).

$$\min \sum_{i=1}^k w_i f_i(x) \tag{2.6}$$

A vantagem principal da técnica de média ponderada é a sua eficiência, gerando um bom resultado e que pode ser utilizada como solução inicial em outros métodos. Uma desvantagem é a dificuldade na escolha dos pesos quando não se possuem informações sobre o problema (COELLO COELLO, 1999).

Na otimização de Pareto, é considerado como um resultado ótimo em problemas de minimização quando existe um vetor resultado \mathbf{x} viável, ou seja, quando não houver outro vetor resultado que possa diminuir alguma função objetivo sem provocar aumento simultaneamente em outro objetivo. Uma situação com solução única é bastante difícil de ocorrer. Em geral, esse tipo de otimização resulta em um conjunto de soluções, também chamadas como soluções não-dominadas. Uma utilidade importante dessa técnica é fornecer para o decisor mais flexibilidade no processo de tomada de decisão e, por isso, é preferido na resolução de problemas reais (COELLO COELLO, 1999; KONAK; COIT; SMITH, 2006; MARLER; ARORA, 2009; MOURA *et al.*, 2015; SAADATSERESHT; MANSOURIAN; TALEAI, 2009).

As soluções não-dominadas, quando mapeadas para o espaço dos objetivos, correspondem à fronteira de Pareto, como mostrado na Figura 2.9. Nessa figura, a linha destacada que determina esse limite é chamada de fronteira de Pareto e, nesse exemplo, corresponde à solução de um problema com duas funções objetivos. Já o limite pontilhado corresponde às soluções ditas dominadas, em que existe um melhor resultado para um dos objetivos em comparação ao outro. Em geral, é complicado encontrar uma função analítica para a linha ou superfície que contém o conjunto de soluções não-dominadas. Por isso, usam-se alguns algoritmos para se chegar a esses valores ótimos como Algoritmos Genéticos, Algoritmos de Colônia de Formigas, de Dijkstra e outros. (COELLO COELLO, 1999; KONAK; COIT; SMITH, 2006; MARLER; ARORA, 2009; SAADATSERESHT; MANSOURIAN; TALEAI, 2009).

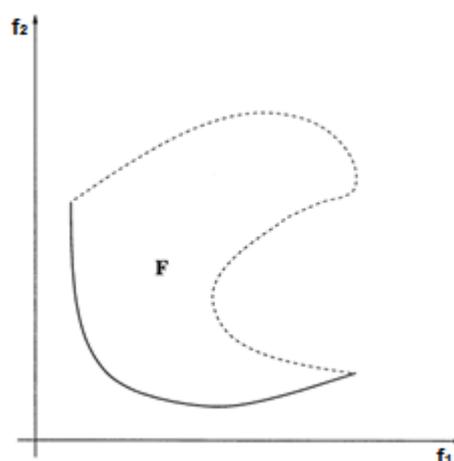


Figura 2.9 – Exemplo de Frente de Pareto (linha destacada) para um problema biobjetivo

Fonte: COELLO COELLO (1999)

2.6 Algoritmo de Dijkstra

O Algoritmo de Dijkstra foi publicado em 1959, sendo bastante aplicado em casos de estudo de rede (grafo), onde a partir de pesos positivos, como distância, tempo e custo, que ligam dois nós (destinos, atividades, etc.), encontram-se os caminhos mais curtos (caminhos ótimos) (CHEN *et al.*, 2014; DIJKSTRA, 1959; PENG *et al.*, 2012). Por isso, é considerado um

processo simples e eficiente em casos de problemas de caminhos mais curtos, em que seus resultados são encontrados de maneira iterativa (PENG *et al.*, 2012). O algoritmo pode ser aplicado em vários campos de pesquisa como roteamento de multipontos, caminho mais curto em logística e transporte e outros (SHU-XI, 2012).

No algoritmo de Dijkstra, existe o grafo $G = (N,A)$, onde o conjunto de nós ($N = 1,2,\dots,i,j,\dots,n$) são divididos em dois (P, permanentes e T, temporários) e A é o conjunto de arcos entre esses nós. Inicialmente, todos os nós pertencem ao conjunto T e, ao final do algoritmo, todos os nós que atendem ao critério escolhido (objetivo) pertencem ao conjunto permanente, sendo, portanto, a resposta esperada (CHEN *et al.*, 2014).

O principal objetivo do algoritmo é rotular permanentemente os nós, exceto o nó fonte, na ordem de suas distâncias até o nó inicial. A princípio, a fonte é marcada com a distância zero e para os outros nós (inicialmente temporários) é $+\infty$. A cada passo do algoritmo, busca-se a menor distância do nó i até o nó fonte e transfere i para o conjunto P, nó pertencente ao conjunto de nós N no grafo G. Após a escolha desse menor caminho, deve ser retirado o nó j , nó seguinte ao nó i e que pertence ao conjunto de nós N do grafo G, do conjunto marcado como temporário e adicionado no conjunto P. Esse passo deve seguir até que o conjunto temporário (T) esteja vazio. É realizada uma atualização da nova distância percorrida até o momento ($d(j)$) e do novo nó predecessor ($pred(j)$). Isso é feito através da comparação entre as distâncias dos nós i , ($d(i)$), e j , ($d(j)$), e o comprimento entre eles (C_{ij}): $d(j) > d(i) + C_{ij}$, limitando assim o valor da distância no nó j (AHUJA; MAGNANTI; ORLIN, 1993). O algoritmo de Dijkstra desenvolvido de maneira formal e é mostrado na Figura 2.10.

```

Algoritmo Dijkstra;
Início
  P:=∅; T:=N;
  d(i):= +∞ para cada nó i ∈ N;
  d(s):= 0 e pred(s):= 0;
  C: caminho mínimo entre o nó inicial e final;
Enquanto |P| < n, faça
  Início
    Permitir i ∈ T seja o nó para qual d(i)= min {d(j): j ∈ T};
    P:= P U {i};
    T:= T - {i};
    Para o arco (i,j) ∈ A(i), faça
      Se d(j) > d(i) + Cij, então d(j):= d(i)+Cij e pred(j):= i;
    Se j = n, recupere C (a partir dos predecessores, pred(j));
  Fim;
Fim.

```

Figura 2.10 – Algoritmo de Dijkstra

Fonte: Ahuja; Magnanti & Orlin (1993); Arenales et al. (2011)

Em geral, o algoritmo de Dijkstra envolve problemas com apenas um objetivo. A utilização desse algoritmo em questões multiobjetivo é realizada a partir de alguma modificação no algoritmo original. Essas mudanças são realizadas devido à adição de outros algoritmos ou conceitos que venham auxiliar na resolução do problema. Pode-se verificar essa relação em diversos estudos com a aplicação do algoritmo de Dijkstra e outro conceito.

Alguns estudos foram realizados utilizando o conceito do algoritmo de Dijkstra, como em Galán-García et al. (2015), que apresentaram um novo algoritmo de Dijkstra que introduziu conceitos probabilísticos que podem afetar na escolha do caminho mais curto. Duas abordagens foram utilizadas no desenvolvimento desse algoritmo: distribuição de probabilidade, quando não se tem conhecimento do tamanho exato do trajeto, e a adição de parâmetros no auxílio da seleção do caminho mais curto, quando não se tem essa informação. A principal contribuição

desse artigo é a introdução da probabilidade no algoritmo de Dijkstra e a partir das abordagens vistas tornou o seu uso mais realista.

Já em Chen *et al.* (2014), o algoritmo de Dijkstra foi utilizado de maneira clássica, onde foi proposto um modelo de evacuação a partir de uma rede rodoviária e aplicado em três diferentes situações. Foram utilizados dados de capacidade de veículos e também horário de fluxo mais intenso do tráfego que são limitantes durante uma evacuação emergencial. A utilização de informações desse tipo torna o modelo mais próximo de uma situação acidental verdadeira, pois em uma evacuação urbana o tráfego de veículos da cidade é uma das principais obstruções.

O algoritmo de Dijkstra foi utilizado novamente em Liu, Mao & Fu (2016), com o objetivo de determinar um plano de evacuação com o menor tempo possível. Esse processo de evacuação possui alguns aspectos limitantes como a presença de fumaça de incêndio (prejudicial à saúde do homem) e também a capacidade das rotas. O modelo apresentado combina Dijkstra com controle de fluxo de rede. O diferencial nesse artigo é o dinamismo devido à atualização de informações a partir da quantidade de evacuados.

Há outras aplicações do algoritmo de Dijkstra em Shu-Xi (2012), Peng *et al.* (2012), Deng *et al.* (2012), Peyer, Rautenbach & Vygen (2009), Sedeño-Noda & Raith (2015), etc. Assim, observa-se que esse algoritmo é simples e eficiente, e por isso, é amplamente utilizado em aplicações para encontrar o caminho mínimo.

2.7 Revisão de Literatura

Alguns estudos foram realizados para mostrar a importância de pesquisar sobre o perigo que pode ser encontrado em empreendimentos químicos e também revisitaram alguns acidentes ocorridos. Em Khan & Abbasi (1999) foram mostradas as principais ocorrências que ocorreram entre os anos de 1926 e 1997 e concluíram como as causas mais relevantes como sendo o mau funcionamento de equipamentos e negligência durante seus usos e outras. Além disso, ratificou que apesar da frequência dos acidentes ter diminuído, as extensões dos danos estavam cada vez maiores. Em Labib (2015) foram utilizadas algumas técnicas de análises para estudar dois grandes acidentes ocorridos em indústrias: o Desastre de Bhopal (1984) e o Acidente Nuclear em Fukushima (2011) (Análise de Modo de Falha e seus Efeitos – FMEA, Análise de Árvore de Falha – AAF e Diagramas de Blocos de Confiabilidade – RBD). Percebeu-se alguns pontos em comuns nas duas ocorrências: ambas eram consideradas processos de alta confiabilidade e

tiveram como causas uma má concepção e mau funcionamento de equipamentos. Em Amyotte *et al.* (2016) também estudaram sobre os grandes acidentes que ocorreram, apontaram e sugeriram modos de preveni-los. Medidas como a criação de várias organizações que buscam compartilhar a experiência sobre segurança de processos, como a CCPS (*Center for Chemical Process Safety* - Centro de Segurança de Processos Químicos) e outras, design intrinsecamente mais seguro (a planta ser projetada para ter uma segurança maior), inserção da cultura de segurança do processo dentro do ambiente industrial, etc.

Outros estudos também buscaram a utilização de técnicas de análises para entender cada vez mais o risco que envolve um ambiente industrial. Em Tixier *et al.* (2002) foram identificadas 62 técnicas, que podem ser são usadas em diferentes fases: identificação, avaliação e hierarquização do risco. Também destacaram que existem dificuldades quando se analisa os riscos de um empreendimento industrial e sugerem que não existe uma única metodologia para tratar os riscos. Em Khan, Rathnayaka & Ahmed (2015) foi mostrado a evolução nas técnicas utilizadas para o desenvolvimento da segurança de processos e da gestão de risco. Esse progresso foi avaliado a partir das publicações realizadas nas principais revistas científicas que existem na área de risco. Além disso, foi mostrado o conceito de segurança de processo e foi realizado uma classificação das metodologias utilizadas (qualitativa, semi-quantitativa, quantitativa e híbrida) para identificação e análise de riscos, avaliação de riscos e gestão de segurança.

Existem pesquisas em que essas técnicas de análise e gestão dos riscos foram utilizadas em empreendimentos químicos. Em Wei, Rogers & Mannan (2008) foi utilizada uma técnica semi-quantitativa, a Análise de Camadas de Proteção (*Layer of Protection Analysis* – LOPA) (CCPS, 2001). A LOPA foi usada para estimar os riscos e as probabilidades de falha nos cenários que foram abordados em um processo de produção de hidroxilamina (composto inorgânico). Os autores concluíram que a LOPA, apesar de não ser uma análise completa, forneceu várias informações importantes para entender como ocorre o acidente e os pontos que podem ser modificados para amenizar a sua frequência. No trabalho de Kalantarnia, Khan & Hawboldt (2010) buscou-se validar uma metodologia para avaliar o risco dinâmico, usando como base os dados do acidente ocorrido na Refinaria BP Texas City (2005 - Estados Unidos). Concluíram que o evento estudado poderia ter sido prevenido e com isso, ter sido evitado. Um ponto fraco observado é a necessidade de informações bastante precisas de acidentes ou quase acidentes, ou seja, a precisão da previsibilidade dependerá da precisão das informações

fornecidas e essa transparência na comunicação de dados, às vezes, pode não ocorrer. Em Han & Weng (2011) foram usadas técnicas qualitativas e quantitativas na avaliação de risco em um sistema de gasodutos, em que houveram os cálculos dos riscos individual e social para os cenários estudados, comprovando a eficiência da metodologia utilizada.

Como forma de diminuir a propagação de possíveis acidentes, como os estudados e tantos outros, pesquisadores buscaram mostrar a importância para as indústrias possuírem um plano de emergência como forma de barreira de proteção para o empreendimento. Por isso, alguns estudos mostram a importância de ter um plano de emergência e como ferramenta desse planejamento, um plano de evacuação em casos de ocorrência de acidentes. No que diz respeito a rotas de evacuação também existiram o desenvolvimento de várias pesquisas. Por exemplo, em Georgiadou *et al.* (2007), foi utilizado o Processo de Markov (GEYER, 2011; HILLIER; LIEBERMAN, 2006) e a Simulação de Monte Carlo (GEYER, 2011; KIM; KIM, 2017; METROPOLIS; ULAM, 1949) na resolução do problema, objetivando encontrar um bom plano de emergência em um cenário industrial, semelhante a presente dissertação. Além do cenário comum de análise, outra particularidade encontrada, foi o uso da velocidade constante no processo de evacuação, distanciando da realidade que ocorre em casos de acidentes.

Um estudo que buscou a partir do algoritmo evolutivo multiobjetivo NSGAI (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II) (ALIKAR *et al.*, 2017) garantir um planejamento de evacuação pôde ser visto em Saadatseresht, Mansourian & Taleai (2009). Além desse algoritmo, também foi usado o Sistema de Informações Geográficas (GIS) (COX; GIFFORD, 1997). A metodologia apresentada foi dividida em três etapas: designar uma área segura (presença de água, eletricidade, etc.), encontrar os blocos de construção utilizando a ferramenta GIS satisfazendo as restrições de tráfego e segurança e selecionar os caminhos que ligam os blocos às áreas seguras, considerando essa distância e também a capacidade da área segura.

Já Georgiadou *et al.* (2010) propuseram uma nova metodologia de otimização de planejamento de resposta à emergência, onde, a partir do algoritmo evolucionário multiobjetivo SPEAII (Strength Pareto Evolutionary Algorithm II) (HU *et al.*, 2017; JAIMES; COELLO, 2008; SHI; LEE, 2015), pôde-se obter uma solução com o menor efeito sobre a saúde dos indivíduos e o menor impacto socioeconômico. Pode-se considerar um ponto fraco em Georgiadou *et al.* (2010) a utilização de somente alguns cenários específicos, ou seja, podendo encontrar dificuldades na aplicação de casos mais reais como a ocorrência de mais de uma tipologia acidental simultaneamente.

Em Cova, Dennison & Drews (2011) apontaram que abrigos e rotas de evacuação são os principais meios de reduzir a quantidade de vítimas em incêndios, em que existe uma dificuldade de escolha entre esses dois no momento da emergência. O artigo apresentou um modelo de otimização com a premissa de que a proteção de uma comunidade urbana pode ser realizada a partir de três ações: evacuação, abrigo em casa e abrigo em refúgio. O modelo matemático apresentado foi bastante simples e de fácil entendimento. Pretendeu-se maximizar uma única função objetivo sujeita a algumas inequações lineares. O artigo tratou o tempo de evacuação como uma restrição, diferentemente de outros estudos em que é considerado função objetivo. Ainda no mesmo ano, Fang *et al.* (2011) apresentaram um estudo de plano de evacuação em um ambiente público, onde foram exploradas três funções como objetivos (menor tempo de evacuação, menor distância total e o grau de congestionamento no processo de fuga). Foi utilizado o Algoritmo de Colônia de Formigas (BLUM, 2005; LIU *et al.*, 2016) para encontrar o melhor caminho de fuga em casos de acidentes em um estádio de esportes na China. O diferencial foi o desenvolvimento da evacuação em uma rede hierarquizada, ou seja, somente algumas conexões podem existir. O modelo proposto pode ser expandido para diferentes hipóteses como outro tipo de acidente ou diferentes hierarquias (diferentes rotas pré-determinadas).

Em Goerigk, Deghdak & Heßler (2014) também foi considerada uma área urbana como cenário da aplicação de um problema de rota de evacuação. No trabalho, foi desenvolvido um Algoritmo Genético (COELLO COELLO, 1999; KONAK; COIT; SMITH, 2006; RAMTEKE; GUPTA, 2008) com os seguintes objetivos: menor tempo de evacuação, menor risco de exposição e menor quantidade de abrigos utilizados. Foram consideradas algumas restrições, como o transporte ser efetuado por ônibus, possuir vagas para toda a população evacuada nos abrigos, etc. O trabalho dos autores adicionou contribuições em dois campos, tanto na pesquisa de processos logísticos quanto no estudo de evacuação em caso de acidentes, pois incluiu no modelo o transporte individual (característico de evacuação) e o coletivo (relacionado à logística). Além disso, desenvolveram um programa usando o Algoritmo Genético como base para a resolução de problemas práticos, onde dois casos reais foram utilizados para validar o estudo.

Alguns trabalhos foram desenvolvidos acerca dos perigos encontrados devido a formação de nuvens tóxicas, semelhante a dissertação apresentada. Em Tseng, Su & Kuo (2012) foi realizado as simulações em três cenários de formação de nuvens tóxicas a partir do vazamento

de substâncias químicas, utilizando o software ALOHA. O objetivo foi a utilização das análises realizadas para serem usadas como base num planejamento de riscos, ou seja, para a minimização dos riscos que poderiam estar expostos em possíveis acidentes no futuro. Já em Galeev & Ponikarov (2014) analisaram um vazamento de óxido de etileno e realizaram uma análise de sensibilidade das consequências desse acidente através da dinâmica de fluidos computacionais (SMYTH, 2016) e foi mostrado que as paredes do dique de contenção influenciaram no processo de evaporação do produto químico e, conseqüentemente, atenuaram a formação da nuvem tóxica no cenário simulado. Além disso, direção e velocidade do vento são características que também alteram o processo de formação dessas nuvens.

Todas essas pesquisas mostram a importância que deve ser dada ao estudo dos riscos em casos de acidentes. Além disso, comprovam que o desenvolvimento de um bom planejamento de evacuação se faz necessário em várias situações e também mostra a ausência de uma aplicação de otimização multiobjetivo em cenário com nuvem tóxica na indústria de refino de petróleo.

3 METODOLOGIA

O trabalho é uma pesquisa aplicada, de acordo com sua natureza, onde foi colocado em prática o algoritmo desenvolvido em Gai *et al.* (2017) para descobrir a rota ótima de evacuação em diferentes cenários. Quanto à abordagem enquadra-se em estudo qualitativo e quantitativo, visto que foram realizadas ambas etapas durante a execução de toda a metodologia. A dissertação tem a forma de estudo de caso, onde foram exploradas diferentes situações acidentais dentro de unidades de processamento de petróleo (SILVA; MENEZES, 2005).

Para o problema de interesse, a otimização foi realizada a partir da minimização de duas funções objetivos: o tempo de percurso entre o ponto de origem e o ponto final da rota, além do risco individual em que a pessoa está exposta durante o acidente. Nesse trabalho, foi encontrada a rota de evacuação ótima, através de algoritmo de Dijkstra, em casos de liberação de substâncias tóxicas em cenários no processo produtivo de derivados do petróleo. A pesquisa pode ser dividida em diversas etapas: análise qualitativa, cálculo de consequências, desenvolvimento do conjunto de rotas de evacuação, cálculo do risco individual, cálculo do tempo de evacuação e desenvolvimento da otimização multiobjetivo. A Figura 3.1 apresenta essas etapas no formato de fluxograma. Além disso, foram mostrados, nessa seção, os cenários de interesse que foram simulados.

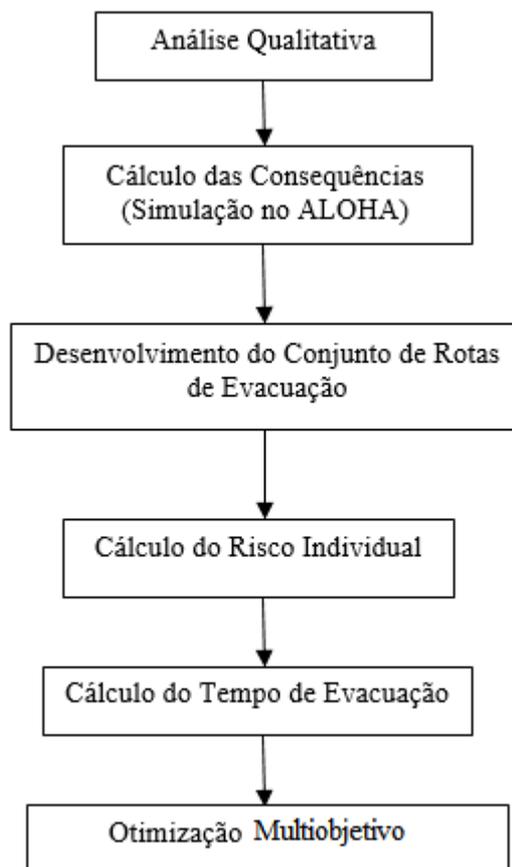


Figura 3.1 – Etapas da metodologia

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

3.1 Análise Qualitativa de Risco

Uma indústria de refino de petróleo é de grande importância para a população em geral, devido à produção de diferentes e indispensáveis produtos para o seu consumo diário. Por isso, a escolha dos cenários foi realizada nas principais unidades de processamento básico presentes dentro de uma refinaria, as quais são responsáveis pela separação, conversão e tratamento do petróleo em derivados. As unidades escolhidas para o trabalho foram: a Unidade de Destilação Atmosférica (UDA), de Coqueamento Retardada (UCR) e de Hidrotratamento (HDT).

Para a análise de risco foi utilizada a Análise Preliminar de Risco (APR). A escolha dos cenários para a etapa de avaliação quantitativa levou em consideração dois critérios: ter como consequência provável a formação de nuvens tóxicas e a categoria de risco alta (severidades III, IV e V - Tabela 2.5). As APRs das unidades estão reunidas no Apêndice 1.

3.2 Cálculo das Consequências

A etapa quantitativa da análise de risco foi realizada através de simulação no *software* ALOHA (*Areal Locations of Hazardous Atmospheres*) (SHAO; DUAN, 2012; TSENG; SU; KUO, 2012), o qual foi desenvolvido pela Agência Americana de Proteção Ambiental (*US EPA – Environmental Protection Agency*) e pela Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (*NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration*) e serve de suporte no planejamento de respostas a emergências químicas (EPA, 2016).

Os dados de entrada do programa são informações sobre a liberação do produto químico (inflamabilidade, toxicidade, explosividade, etc.), dados referentes aos equipamentos envolvidos no vazamento das substâncias (dimensões, pressão e temperatura de operação, origem do derramamento, etc.) e as condições meteorológicas (velocidade de vento, direção de vento, umidade do ar, etc.), sendo bastante influenciadores no resultado final. No ALOHA, são utilizados diferentes modelos matemáticos, como Modelo Gaussiano (HOLMES; MORAWSKA, 2006), Modelo de Dispersão de Gás Pesado (KHAN; ABBASI, 2000) e outros. Então, obtêm-se as estimativas de alcances para diferentes tipologias acidentais, como jato de fogo, explosão em nuvem, nuvem tóxica e outras (EPA, 2016; ZHOU; LIU, 2011). A Figura 3.2 mostra o fluxograma de simulação no ALOHA, evidenciando toda a sequência de informações e a ordem em que são solicitadas no programa.

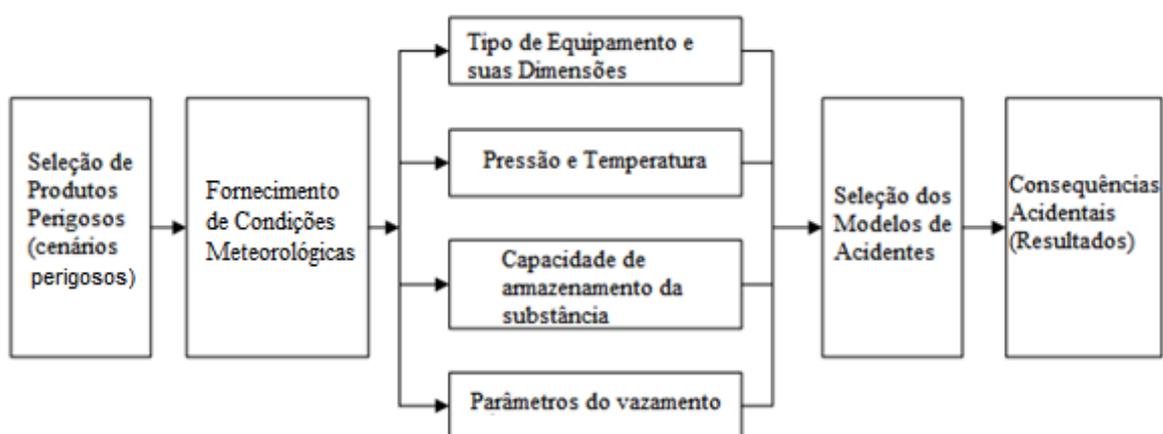


Figura 3.2 - Fluxograma de simulação no ALOHA

Fonte: Zhou & Liu (2011)

As simulações realizadas no ALOHA foram de grande importância para o trabalho, pois foi a partir delas que foram calculadas as concentrações tóxicas em cada um dos nós (locais dentro da planta da indústria de refino) dentro da rede. Essas concentrações foram utilizadas nas próximas etapas da metodologia de pesquisa.

3.2.1 Cenários de Interesse

As situações simuladas foram baseadas nas APRs que foram desenvolvidas na etapa anterior. A fase atual foi executada no *software* ALOHA. As características do prédio onde ocorre o vazamento e os critérios atmosféricos adotados foram iguais para todas as simulações e foram reunidas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Dados de entrada no ALOHA referente à construção e às condições atmosféricas

Tipo de prédio	Prédio de andar simples
Ambiente ao redor	Ambiente exposto
Velocidade do vento	3 m/s
Direção do vento	E (leste)
Medição de altura acima do solo	10 m
Rugosidade do terreno	Urbano ou floresta
Cobertura de nuvens	Sem nuvens
Temperatura do ar	25°C
Classe de estabilidade	D
Altura de inversão do ar	Sem inversão
Umidade	80%

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

O primeiro cenário simulado foi localizado na UDA, situada no nó 01 (Figura 3.3), e corresponde a um vazamento de sulfeto de hidrogênio devido à ruptura de uma tubulação com diâmetro de 5 polegadas e comprimento de 50 metros que liga uma das saídas de topo da torre atmosférica e conecta a corrente a um vaso separador. Sendo, portanto, considerado um cenário acidental representativo para a unidade devido ao possível volume da substância que pode ser liberada. Para a simulação no ALOHA a substância analisada foi o sulfeto de hidrogênio puro (H_2S), o qual foi selecionado para a simulação, pois se encontra dissolvido no petróleo e, ao se desprender dos hidrocarbonetos, pode formar nuvens tóxicas prejudiciais à saúde humana. Além disso, por ser um gás inflamável pode ocorrer a formação de chama na presença de uma

fonte de ignição. Portanto, o H₂S pode ser considerado uma substância perigosa bastante representativa dentro do ambiente de refino de petróleo (CETESB, 2016b; FAHIM; ALSAHHAF; ELKILANI, 2012).

Com isso, como resposta do *software* encontrou-se a concentração do produto tóxico em todos os nós. Esse cálculo da concentração dos pontos foi importante, pois esses dados foram usados como informação de entrada no algoritmo de Dijkstra. A Tabela 3.2 resume essas informações adotadas na simulação do ALOHA.

Tabela 3.2 - Dados de entrada no ALOHA referente ao cenário 1 - UDA

Diâmetro da tubulação	Comprimento da tubulação	Conexão do tubo	Rugosidade da tubulação	Pressão da substância	Temperatura da substância
5"	50 m	Conectado com um tanque	Tubulação lisa	2 atm	180 °C

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

O segundo cenário escolhido estava localizado na UCR, situada no nó 4 (Figura 3.3), e refere-se a um vazamento de sulfeto de hidrogênio devido a um vazamento por fonte direta. Esse tipo de vazamento foi preferido a outros, pois, nas APRs desta unidade, todas as situações possuem consequências com mesmo grau de severidade e, também, no ALOHA, utiliza-se essa opção quando não há muitas informações acerca de como ocorre o escape. A Tabela 3.3 mostra todos dados usados no aplicativo.

Tabela 3.3 - Dados de entrada no ALOHA referente ao cenário 2 - UCR

Volume vazado	Estado da substância	Pressão da substância	Temperatura da substância
300 m ³	Gás	20 atm	40 °C

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

O último cenário estudado foi localizado na HDT, situada no nó 2 (Figura 3.3). A situação é referente a um vazamento de sulfeto de hidrogênio devido à ruptura de um vaso vertical na unidade. Pôde-se considerar todo o volume desse cilindro como o inventário da substância tóxica em toda a unidade. Um vaso de reciclo tem como objetivo estabilizar a corrente antes do processo de compressão de gás de reciclo. O cilindro tem 2 metros de diâmetro e 3 metros de altura. A Tabela 3.4 reúne as informações adotadas na simulação do *software*.

Tabela 3.4 - Dados de entrada no ALOHA referente ao cenário 3 - HDT

Diâmetro do cilindro	Comprimento do cilindro	Estado da substância	Temperatura da substância	Nível de ocupação	Diâmetro de abertura	Nível onde ocorre o vazamento
2 m	3 m	Líquido	70 °C	90%	10 cm	25% (em relação ao topo)

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

3.3 Desenvolvimento do Conjunto de Rotas de Evacuação

Nessa etapa o conjunto das possíveis rotas de evacuação foi desenvolvido sob o *layout* de uma indústria de refino de petróleo hipotética. Foram marcados 20 nós que correspondem as unidades e locais estratégicos de uma refinaria. Foram considerados dois pontos fixos: o início da evacuação sempre ocorre no nó 1 e o ponto final, local seguro, é o nó 20. Também foi utilizado como premissa que o acidente pode ocorrer em qualquer localização (nó 1 ao nó 19), exceto o local seguro (nó 20).

Foi utilizada uma escala onde cada centímetro na figura corresponde a cem metros de distância na planta. Assim, as distâncias euclidianas entre os nós foram calculadas. A Figura 3.3 ilustra a rede de evacuação que será utilizada para o desenvolvimento do presente trabalho.

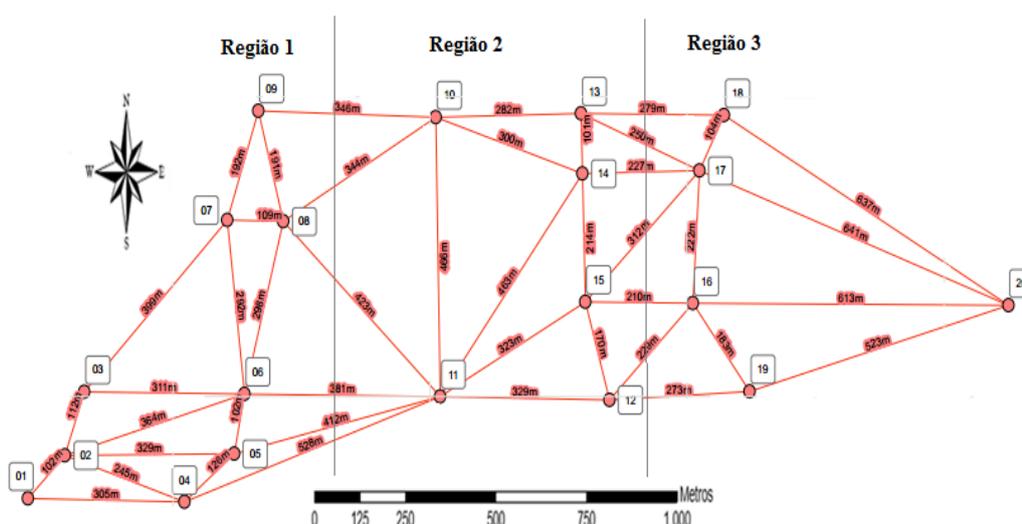


Figura 3.3- Conjunto de rotas de evacuação

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

3.4 Cálculo do Risco Individual

O risco individual pode ser calculado pela Equação (2.1), onde é dependente da probabilidade de falha (P_f) e a probabilidade de morte em caso de ocorrência dessa falha ($P_{m/f}$) (GAI *et al.*, 2017; ZHOU; LIU, 2011).

A probabilidade de morte em caso de falha ($P_{m/f}$) é condicionada ao acontecimento da falha f , ou seja, é consequência da ocorrência de f . No cálculo da $P_{m/f}$ é mostrada a relação entre o seu valor com a variável de Probit, X . A abordagem de Probit é amplamente utilizada e, para cada tipologia acidental, existe uma maneira diferente de determinação. A Equação (3.1) fornece o valor da probabilidade de morte a partir dos dados de Probit e de uma função erro (erf) (GAI *et al.*, 2017; TNO, 2005a; ZHOU; LIU, 2011).

$$P_{m/f} = 0,5 \left[1 + erf \left(\frac{|X-5|}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (3.1)$$

Para o cálculo da Equação de Probit é necessário combinar a concentração da toxicidade da substância liberada e o tempo de exposição a esse perigo. A Equação (3.2) mostra a relação entre valores constantes a e b , que dependem do tipo do produto químico e a dose letal, D . Essa dose é obtida a partir da relação da concentração tóxica, C , uma constante que também depende do tipo de material químico, x , e a duração do tempo de exposição, t_e , mostrada na Equação (3.3) (CETESB, 2014; GAI *et al.*, 2017; ZHOU; LIU, 2011).

$$X = a + b \ln D \quad (3.2)$$

$$D = C^x t_e \quad (3.3)$$

A dose letal individual pode ser calculada levando em consideração o caminho percorrido durante a evacuação, sendo denominada como o parâmetro D_{ij} (i e j , significando os nós de origem e chegada, respectivamente). O valor de D_{ij} é calculado a partir da quantidade de concentração da substância química ao longo da localização do indivíduo x,y e o instante t (CETESB, 2014; GAI *et al.*, 2017; ZHOU; LIU, 2011). A Equação (3.4) mostra essa relação.

$$D_{ij} = \int_{t_i}^{t_j} C^x(x, y, t) dt \quad (3.4)$$

Para toda a rota de evacuação (R), pode-se calcular a dose letal como mostrado no sistema de equações (Equações (3.5), (3.6), (3.7) e (3.8)).

$$D(R) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n z_{ij} D_{ij} \quad (3.5)$$

Sujeito a

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n z_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^n z_{ji} = \begin{cases} 1, i = 1 \\ -1, i = n \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n z_{ij} = \begin{cases} \leq 1, i \neq n \\ 0, i = n \end{cases} \quad (3.7)$$

$$z_{ij} = 0, 1 \quad i, j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (3.8)$$

sendo z_{ij} uma variável de decisão, onde seu valor nulo significa que o arco (i, j) não será percorrido e valor unitário que o arco (i, j) é percorrido, conforme mostrado na Equação (3.8). A Equação (3.6) restringe os valores de z_{ij} na rota R e a Equação (3.7) evita a formação de um ciclo interno durante a construção da rota R.

3.5 Cálculo do Tempo de Evacuação

Estimar o tempo de escape é de grande importância em indústrias complexas, como as refinarias. Desenvolver um plano de emergência com esse tipo de informação é bastante valioso e pode salvar vidas em caso da ocorrência de acidentes (SORENSEN, 2004).

Na ocorrência de desastres, observa-se que a velocidade de viagem do indivíduo nos arcos que formam a rota de evacuação tende a diminuir com o decorrer do tempo e com o aumento da distância da origem do acidente à localização do indivíduo. Com isso, assume-se que a velocidade de movimentação a pé pela rota é dada pela Equação (3.9) (GAI *et al.*, 2017; YUAN; WANG, 2009).

$$u_{ij}(t) = u_{ij}^0 \cdot \alpha_{ij} \cdot e^{-\beta_{ij}t} \quad (3.9)$$

sendo, u_{ij}^0 é a velocidade inicial do indivíduo a pé no arco (i,j) e sob condições normais, $u_{ij}(t)$ é a função que calcula a velocidade durante a movimentação entre os nós i e j sob as condições de desastre, α_{ij} e β_{ij} são parâmetros de decaimento dessa velocidade no arco (i,j) e eles determinam a magnitude dessa redução, afetando o tempo de percurso. O fator α representa a influência direta do acidente no trajeto e pequenos valores significam que o desastre influencia bastante na evacuação. A medida de β representa o influxo de uma ocorrência em um intervalo de tempo após o seu acontecimento e quanto maior a sua grandeza, mais rápido a velocidade de deslocamento decresce e maior a extensão do acidente (GAI *et al.*, 2017). Esses valores de decrescimento podem ser estimados a partir da distância do arco (i,j) da origem do acidente, do tipo de cenário acidental, vulnerabilidade do caminho e outros (GAI *et al.*, 2017; YUAN; WANG, 2009). A obtenção dessas grandezas para o presente trabalho foi realizada de maneira aleatória. Para se certificar que esse meio de dedução era satisfatório e, também, entender como α e β se comportam, realizou-se uma análise de sensibilidade.

Pode-se obter o tempo de trajeto através do método recursivo mostrado na Equação (3.10), em que t_{ij} , o tempo de percurso do nó i ao nó j , apresentado pela Equação (3.11), e, l_{ij} , distância percorrida no arco (i,j) (YUAN; WANG, 2009; ZHANG *et al.*, 2013).

$$\int_{t_i}^{t_j} u_{ij}(t) dt = l_{ij}, 0 < i < j \leq n \quad (3.10)$$

$$t_{ij} = t_j - t_i \quad (3.11)$$

3.5.1 Análise de Sensibilidade

Os valores de α e β são necessários para o cálculo da velocidade de trajeto durante o processo de evacuação (Equação (3.9)). Foi observada que a mudança nesses parâmetros significa variação nas condições de viagem e, conseqüentemente, altera a velocidade de trajeto do indivíduo. A fim de entender o comportamento de α e β foi realizada uma análise de sensibilidade.

A análise de sensibilidade foi simulada no algoritmo de Dijkstra apresentado e utilizou os valores de distância entre os nós, velocidade inicial, concentração química e outros parâmetros a partir do estudo de Yuan & Wang (2009). Todos esses dados de entrada foram simulados e as devidas mudanças de valores para α e β foram realizadas.

Foram feitas várias simulações e, em algumas delas, foram colocados os valores em que α e β não influenciam na velocidade ($\alpha = 1$ e $\beta = 0$) e para essas situações obtiveram-se os tempos estáticos. Cenários em que os valores de α e β são insignificantes correspondem a simples problemas de caminho mais curto. Em outras simulações, foram feitas mudanças nos valores dos parâmetros de decaimento para cada arco (i,j) formado a partir do grafo utilizado como referência. Foram atribuídos quatro valores de intervalo para α_{ij} e seis intervalos diferentes para β_{ij} , onde foram obtidos os valores dos tempos de evacuação. Com posse de ambos tempos, pôde-se realizar uma comparação por meio do cálculo da diferença entre os resultados encontrados.

Pode ser observado, nos dados apresentados na Tabela 3.5, que quanto menores os valores de α e maiores os de β , maior é a diferença entre o tempo encontrado através da velocidade constante e o tempo encontrado pela Equação (3.9). Ou seja, quanto mais diferente do valor 1, para α , e quanto mais distante de 0, para β , maior a influência que esses parâmetros exercem sobre a velocidade e, com isso, nota-se que esses parâmetros são importantes em cenários acidentais graves (YUAN; WANG, 2009).

Tabela 3.5 – Diferentes variações para α e β

	$\alpha_{ij} \in (0,90;1); \beta_{ij}=0$	$\alpha_{ij} \in (0,80;0,90); \beta_{ij}=0$	$\alpha_{ij} \in (0,70;0,80); \beta_{ij}=0$	$\alpha_{ij} \in (0,60;0,70); \beta_{ij}=0$
Tempo (min)	3,14	3,50	3,97	4,57
Tempo estático (min)	3,15	3,52	3,99	4,60
Variação	0,36%	0,41%	0,50%	0,59%
	$\alpha_{ij} \in (0,90;1); \beta_{ij} \in (0,05;0)$	$\alpha_{ij} \in (0,80;0,90); \beta_{ij} \in (0,05;0)$	$\alpha_{ij} \in (0,70;0,80); \beta_{ij} \in (0,05;0)$	$\alpha_{ij} \in (0,60;0,70); \beta_{ij} \in (0,05;0)$
Tempo (min)	3,26	3,66	4,17	4,85
Tempo estático (min)	3,28	3,68	4,20	4,89
Variação	0,57%	0,55%	0,68%	0,87%
	$\alpha_{ij} \in (0,90;1); \beta_{ij} \in (0,05;0,10)$	$\alpha_{ij} \in (0,80;0,90); \beta_{ij} \in (0,05;0,10)$	$\alpha_{ij} \in (0,70;0,80); \beta_{ij} \in (0,05;0,10)$	$\alpha_{ij} \in (0,60;0,70); \beta_{ij} \in (0,05;0,10)$
Tempo (min)	3,57	4,05	4,70	5,59
Tempo estático (min)	3,59	4,08	4,74	5,65

Tabela 3.5 – Diferentes variações para α e β (continuação)

Variação	0,64%	0,63%	0,75%	1,02%
	$\alpha_{ij} \in (0,90;1); \beta_{ij} \in (0,10;0,15)$	$\alpha_{ij} \in (0,80;0,90); \beta_{ij} \in (0,10;0,15)$	$\alpha_{ij} \in (0,70;0,80); \beta_{ij} \in (0,10;0,15)$	$\alpha_{ij} \in (0,60;0,70); \beta_{ij} \in (0,10;0,15)$
Tempo (min)	3,97	4,59	5,47	6,78
Tempo estático (min)	4,00	4,63	5,52	6,87
Variação	0,62%	0,81%	0,93%	1,31%
	$\alpha_{ij} \in (0,90;1); \beta_{ij} \in (0,15;0,20)$	$\alpha_{ij} \in (0,80;0,90); \beta_{ij} \in (0,15;0,20)$	$\alpha_{ij} \in (0,70;0,80); \beta_{ij} \in (0,15;0,20)$	$\alpha_{ij} \in (0,60;0,70); \beta_{ij} \in (0,15;0,20)$
Tempo (min)	4,54	5,42	6,77	9,26
Tempo estático (min)	4,60	5,47	6,87	9,51
Variação	0,75%	0,92%	1,42%	2,61%
	$\alpha_{ij} \in (0,90;1); \beta_{ij} \in (0,20;0,25)$	$\alpha_{ij} \in (0,80;0,90); \beta_{ij} \in (0,20;0,25)$	$\alpha_{ij} \in (0,70;0,80); \beta_{ij} \in (0,20;0,25)$	$\alpha_{ij} \in (0,60;0,70); \beta_{ij} \in (0,20;0,25)$
Tempo (min)	5,42	6,90	10,17	17,62
Tempo estático (min)	5,48	7,02	10,58	18,59
Variação	0,99%	1,66%	3,88%	5,19%

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

A partir da compreensão dos significados das medidas de α e β pôde-se explorar uma mudança nos parâmetros em relação ao afastamento da fonte do acidente (nó inicial). Dessa maneira, observou-se o comportamento dos parâmetros de decaimento em situações mais realistas; em que com a proximidade do acidente, α_{ij} e β_{ij} são mais influenciadores do que na região mais distante. Para isso, um grafo de nós foi dividido em três regiões: I, II e III. Os números dos parâmetros foram obtidos de maneira aleatória, porém para cada área foi atribuído um intervalo de grandeza específico (YUAN; WANG, 2009).

A Tabela 3.6 mostra as análises, onde os valores de α_{ij} e β_{ij} foram alterados para as três regiões delimitadas e apresentou-se as diferenças entre o tempo estático e o tempo utilizando valores aleatórios para os parâmetros. As situações analisadas possuem um grau crescente de desastre, ou seja, quanto menor o valor de α e maior o valor de β , mais grave é o cenário. Pode-se observar o aumento da diferença na Figura 3.4, que resume os dados dessa tabela. Com isso, pôde-se concluir que quanto maior a gravidade do cenário simulado, maior a necessidade de

considerar os efeitos de tempo real sobre a velocidade de evacuação e, assim, mostrando a necessidade da presença desses parâmetros nesse estudo.

Com isso, o grafo apresentado nessa dissertação pôde ser dividido em três regiões: Região 1, nó 1 ao 9, Região 2, nó 10 ao 15, e Região 3, nó 16 ao 20, conforme visto na Figura 3.3. Além disso, foi adotado para a Região 1, o intervalo para os parâmetros $\alpha \in [0,8;0,9]$ e $\beta \in [0,05;0,1]$, na Região 2, o intervalo de α pertence $[0,9;0,9999]$ e $\beta \in [0,001;0,05]$ e para a última área $\alpha \in [0,9999;0,99999]$ e $\beta \in [0,0001;0,001]$. Assim, quanto maior a distância da fonte do acidente, maior o valor de α e menor valor de β , tendo como consequência uma menor influência na velocidade de deslocamento.

Tabela 3.6 – Diferença devido mudança no α e β para cada região

	Região I $\alpha_{ij}=1, \beta_{ij}=0$; Região II $\alpha_{ij}=1, \beta_{ij}=0$; Região III $\alpha_{ij}=1, \beta_{ij}=0$
Tempo (caminho ótimo) (min)	2,98
Tempo estático (min)	2,98
Variação	0%
	Região I $\alpha_{ij} \in (0,90;1), \beta_{ij} \in (0;0,05)$; Região II $\alpha_{ij}=1, \beta_{ij}=0$; Região III $\alpha_{ij}=1, \beta_{ij}=0$
Tempo (caminho ótimo) (min)	3,08
Tempo estático (min)	3,15
Variação	2,24%
	Região I $\alpha_{ij} \in (0,80;0,90), \beta_{ij} \in (0,05;0,10)$; Região II $\alpha_{ij} \in (0,90;1), \beta_{ij} \in (0;0,05)$; Região III $\alpha_{ij}=1, \beta_{ij}=0$
Tempo (caminho ótimo) (min)	3,49
Tempo estático (min)	3,71
Variação	5,99%
	Região I $\alpha_{ij} \in (0,70;0,80), \beta_{ij} \in (0,10;0,15)$; Região II $\alpha_{ij} \in (0,80;0,90), \beta_{ij} \in (0,05;0,10)$; Região III $\alpha_{ij} \in (0,90;1), \beta_{ij} \in (0;0,05)$

Tabela 3.6 – Diferença devido mudança no α e β para cada região (continuação)

Tempo (caminho ótimo) (min)	4,43
Tempo estático (min)	4,82
Variação	8,09%
	Região I $\alpha_{ij} \in (0,60;0,70)$, $\beta_{ij} \in (0,15;0,20)$; Região II $\alpha_{ij} \in (0,70;0,80)$, $\beta_{ij} \in (0,10;0,15)$; Região III $\alpha_{ij} \in (0,80;0,90)$, $\beta_{ij} \in (0,05;0,10)$
Tempo (caminho ótimo) (min)	6,16
Tempo estático (min)	7,14
Variação	13,66%
	Região I $\alpha_{ij} \in (0,50;0,60)$, $\beta_{ij} \in (0,20;0,25)$; Região II $\alpha_{ij} \in (0,60;0,70)$, $\beta_{ij} \in (0,15;0,20)$; Região III $\alpha_{ij} \in (0,70;0,80)$, $\beta_{ij} \in (0,10;0,15)$
Tempo (caminho ótimo) (min)	11,36
Tempo estático (min)	17,63
Variação	35,56%

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

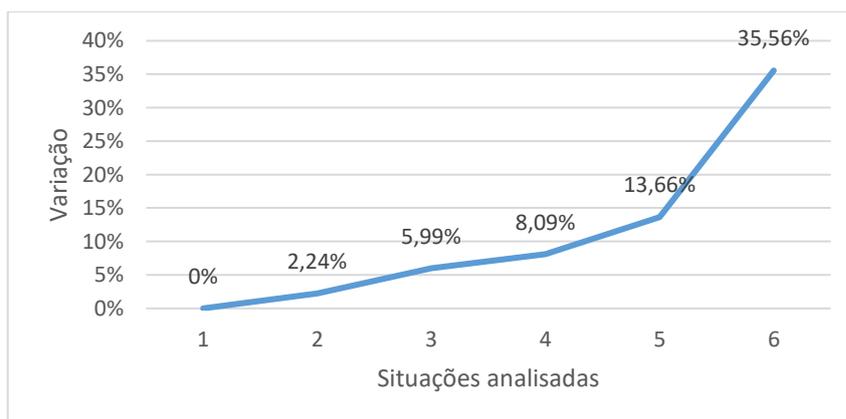


Figura 3.4 – Variação devido mudanças no α e β nas situações analisadas

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

3.6 Desenvolvimento da Otimização Multiobjetivo

A rota de evacuação ótima foi obtida através do desenvolvimento de um programa de otimização multiobjetivo, ou seja, foi levado em consideração mais de um objetivo para ser minimizado ou maximizado (GEORGIADOU *et al.*, 2010). Como solução do problema estudado foi analisada a minimização de duas funções objetivos: risco individual ao longo do caminho percorrido e o tempo de evacuação. Em geral, buscou-se encontrar a rota de fuga mais rápida, porém isso entrou em conflito com o bem-estar do indivíduo. Por isso, na metodologia também foi considerada a probabilidade de morte individual a partir da dose química a que um único indivíduo está sujeito em situações de formação de nuvens tóxicas (GAI *et al.*, 2017). Por isso, fez-se necessária a escolha do RI como principal modo de medir a presente ameaça. Além disso, o resultado de melhor rota de evacuação individual pode servir de base para o desenvolvimento do plano de emergência para uma quantidade maior de pessoas.

O código, fundamentado a partir do algoritmo de Dijkstra e desenvolvido por Gai *et al.* (2017), foi implementado para a presente dissertação em C++. O problema pode ser formulado da seguinte maneira:

$$\min T(R) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n z_{ij} t_{ij} \quad (3.12)$$

$$\min RI(R) \quad (3.13)$$

sujeito as Equações (3.6), (3.7) e (3.8) sendo $T(R)$ o tempo total percorrido durante toda a evacuação na rota R e $RI(R)$ é o risco individual atingido durante R .

A abordagem utilizada para a resolução do modelo mostrado foi a utilização de um algoritmo modificado de Dijkstra, sendo considerado dessa maneira devido ao uso do método recursivo nos cálculos dos seus parâmetros t_{ij} e D_{ij} . Para a obtenção da rota ótima R foi implementado um novo fator λ_{ij} (Equação (3.14)) considerado como o peso do trajeto no arco (i,j) e onde os valores R_T^* e R_D^* representam os caminhos mais curtos em relação ao tempo e a dose letal no arco (i,j) , respectivamente, e τ e θ compõem um vetor peso ($\tau, \theta \geq 0, \tau + \theta = 1$) (GAI *et al.*, 2017; KONAK; COIT; SMITH, 2006; MARLER; ARORA, 2009).

$$\lambda_{ij} = \frac{\tau \cdot t_{ij}}{T(R_T)^*} + \frac{\theta \cdot D_{ij}}{D(R_D)^*} \quad (3.14)$$

O código foi desenvolvido em três etapas (algoritmos I, II e III), sendo a primeira referente à determinação das rotas ótimas a partir das escolhas dos nós percorridos e dos cálculos de t_{ij} , D_{ij} e λ_{ij} . Utilizou-se como dados de entrada as concentrações nos nós do *layout* desenvolvido, a velocidade inicial adotada para os cenários, as distâncias entre os nós, os parâmetros de decaimento obtidos para cada arco (i,j) percorrido e a probabilidade de falha. Foi nessa fase que se obteve o conjunto de soluções não-dominadas. No segundo estágio ocorreu a verificação das soluções obtidas na fase anterior em diferentes níveis de tolerabilidade de risco (l_1 e l_2). Ou seja, aconteceu uma divisão da solução do algoritmo anterior em três subconjuntos, removendo as soluções consideradas no nível intolerável de RI. No último passo foi introduzido um limite aceitável de risco (l_{RI} , um valor predeterminado) que auxiliou na obtenção da solução final de melhor rota R^* . Os algoritmos II e III recorreram ao algoritmo I para o seu desenvolvimento. Pode-se compreender melhor essas etapas a partir do fluxograma da otimização multiobjetivo na Figura 3.5.

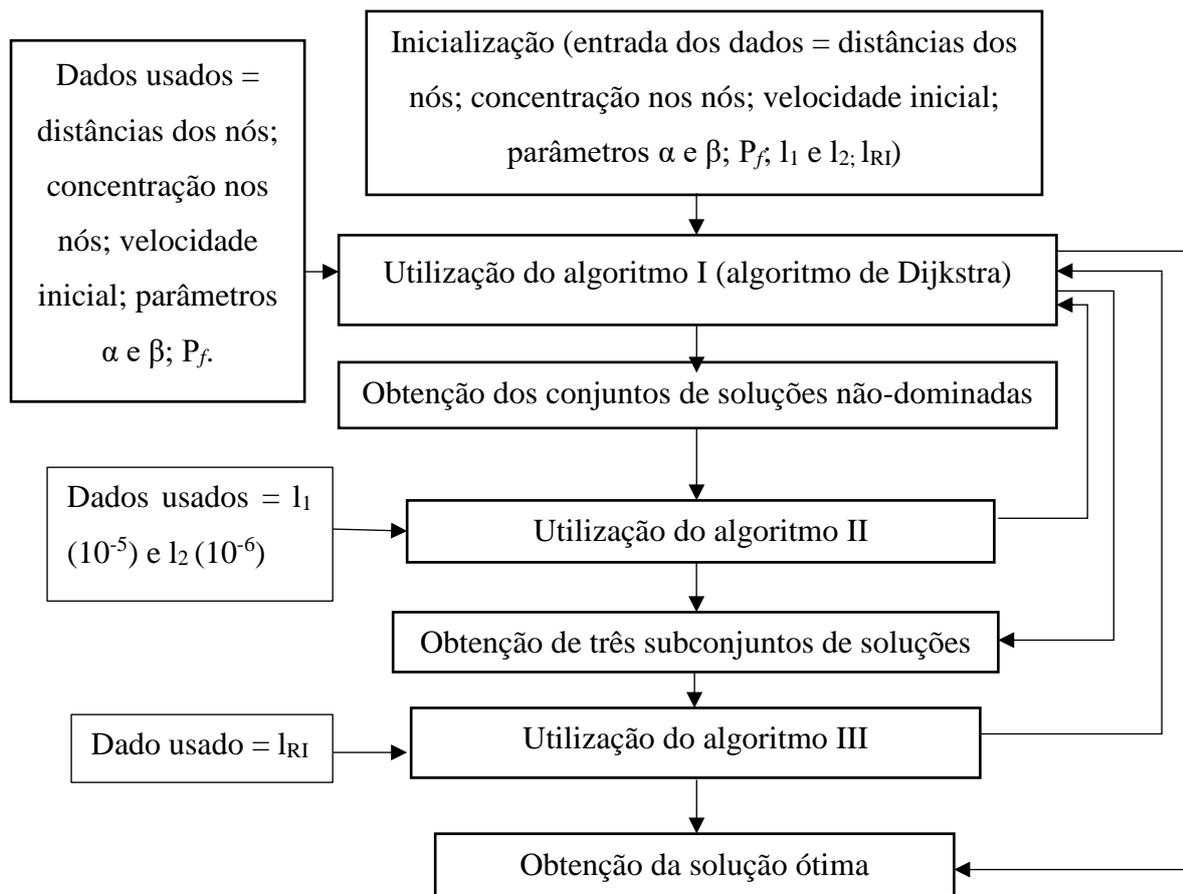


Figura 3.5 – Fluxograma da otimização multiobjetivo

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

Na primeira etapa (algoritmo I), a cada ciclo transcorrido há a passagem para um novo nó (de i para j), que representa a distância percorrida, t_{ij} e D_{ij} são modificados e, conseqüentemente, λ_{ij} é alterado. Para cada valor de λ_{ij} , pode-se atribuir o $R(\tau, \theta)$ como sendo o caminho mais curto em relação a esse valor, ou seja, os valores de tempo e da dose tóxica são dinâmicos, alterando de acordo com o arco que está sendo percorrido.

Usando como premissa que N é um número positivo e muito grande, $P(i)$ e $T(i)$ são as marcações do nó i como conjunto de nós P (permanente) e de nós T (temporário), S_k são os conjuntos de nós permanentes após o k -ésimo passo do algoritmo, $\sigma(k)$ é o predecessor do nó k ao longo da rota R (do nó i até o nó k) e w_{ij} é o peso intermediário do arco (i,j) , usado para o cálculo de rotas ótimas R_T^* e R_D^* . A partir disso, o algoritmo modificado de Dijkstra (algoritmo I) pode ser representado conforme Figura 3.6 (GAI *et al.*, 2017; YUAN; WANG, 2009).

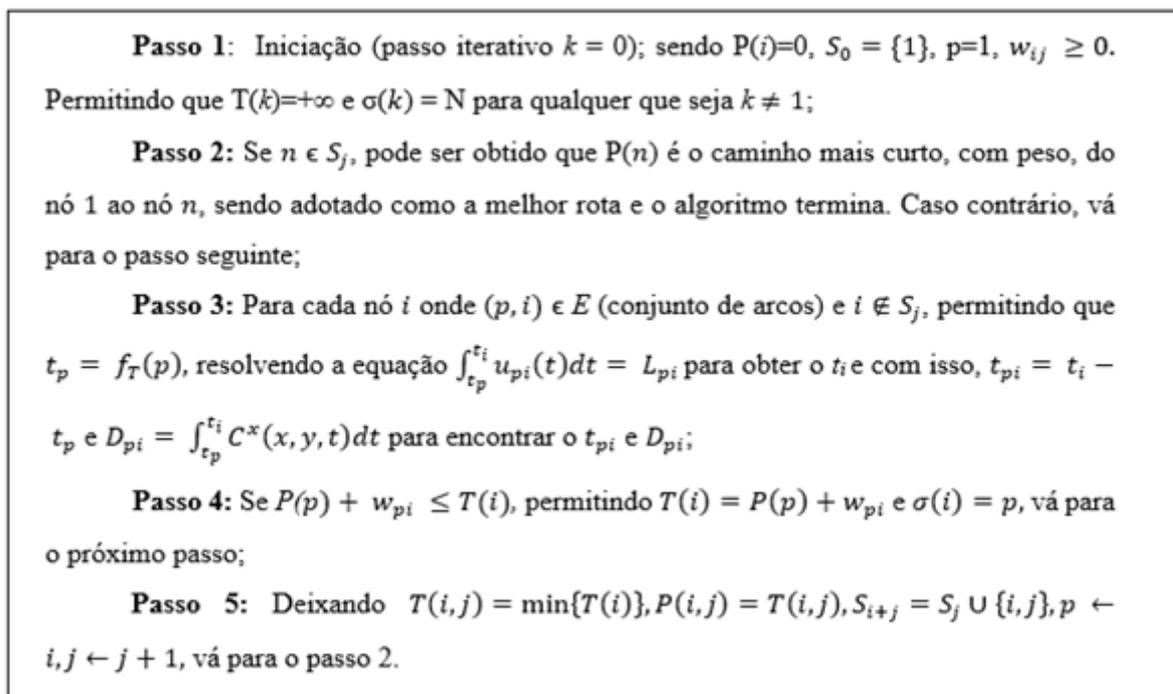


Figura 3.6 – Algoritmo I

Fonte: Gai *et al.* (2017)

O passo 1 do algoritmo I mostrado na Figura 3.6 refere-se ao processo de inicialização. A etapa seguinte confere se o último nó já pertence a um conjunto de nós permanentes. Se ainda faz parte do conjunto de nós temporários, avança para o próximo passo. No passo 3 para o nó analisado e para o arco (p,i) , pertencente ao conjunto de arcos, calculam-se os valores de t_{pi} e

D_{pi} . Em seguida, é realizada uma comparação entre os conjuntos de nós permanentes e temporários, onde o tempo e a dose tóxica do nó p (cada parâmetro por vez) somado ao peso intermediário do arco (p,i) for igual ou menor que o tempo e a dose tóxica do nó i no conjunto T (relacionando com o parâmetro do nó p), esse último assume o valor dessa soma e assume que o predecessor do nó i é o nó p , sendo uma atualização do algoritmo. No último passo ocorre a seleção dentro do critério (menor tempo e menor RI) e retorna ao passo 2.

Com isso, obteve-se as melhores rotas em relação ao tempo e a dose letal, R_T^* e R_D^* , respectivamente, e, em seguida, com a variação de τ no intervalo $[0,1]$, se obteve o peso λ_{ij} do arco na evacuação e, por fim, o valor da melhor rota em relação às funções objetivos ($R(\tau,1-\tau)$) (GAI *et al.*, 2017; YUAN; WANG, 2009).

Em geral, o risco individual, calculado a partir da Equação (2.1), pode ser dividido em três grupos de acordo com a tolerabilidade de risco, Q1, Q2 e Q3 (Tabela 3.7) (CETESB, 2014; GAI *et al.*, 2017).

Tabela 3.7 – Limites de tolerabilidade de risco

Grupos	Limites	Descrição
Q1	$RI > 1.10^{-5} \text{ ano}^{-1}$	Risco Intolerável
Q2	$1.10^{-5} \text{ ano}^{-1} \leq RI \leq 1.10^{-6} \text{ ano}^{-1}$	Risco Aceitável (a ser reduzido)
Q3	$RI < 1.10^{-6} \text{ ano}^{-1}$	Risco Tolerável

Fonte: Cetesb (2014); Gai *et al.* (2017)

Se as soluções obtidas estiverem contidas no grupo Q1, elas não poderão ser aceitas. No grupo Q2, o risco é dito aceitável, onde nesse caminho devem ser aplicadas medidas de proteção adicionais a fim de reduzir a periculosidade da rota. No grupo Q3, as soluções não-dominadas encontradas são toleráveis. O segundo algoritmo (algoritmo II) separou as soluções obtidas na etapa anterior em três subconjuntos de acordo com o nível de tolerabilidade aceitável para o risco. O algoritmo II mostrado na Figura 3.7 aponta como obter o grupo dos subconjuntos das soluções não-dominadas (GAI *et al.*, 2017).

O algoritmo II inicia definindo os valores iniciais dos parâmetros. Nos passos 2 e 3 o algoritmo de Dijkstra modificado (algoritmo I) é utilizado para calcular o t_{ij} e R_T^* e, de maneira similar, encontra-se o D_{ij} e R_D^* . Na etapa seguinte é realizada a comparação do resultado obtido com os limites adotados e com isso ocorre a definição dos três subgrupos de soluções não-dominadas. O último passo encerra esse processo.

A otimização de uma única função objetivo obtém um resultado único, diferentemente do que ocorre em problemas de otimização multiobjetivo, onde não existe, geralmente, uma solução global e única. Por isso, pode ser necessário o uso de um artifício de adoção de um valor predeterminado ótimo. Supondo l_{RI} representa um limite aceitável de risco fornecido pelo decisor ou por um plano de emergência prévio, tem-se o conceito de solução ótima como sendo uma rota de saída $R^* \in Q$, obtida a partir do modelo apresentado e se não existir outra rota $R \in Q$ de tal modo que $RI(R) \leq l_{RI}$, e $T(R) < T(R^*)$ simultaneamente (GAI *et al.*, 2017; MARLER; ARORA, 2009).

Com o algoritmo III apontado na Figura 3.8 pôde-se obter a solução ótima do modelo multiobjetivo em cenários de nuvem tóxica, sendo desenvolvida a partir da definição supracitada (GAI *et al.*, 2017).

Passo 1: Inicialização (contador de ciclos, $NC=0$). Deixando $G=(V,E)$ (a rede de evacuação, onde V é o conjunto de nós e E é o conjunto de arcos que podem ser formados), $Q1=\emptyset$, $Q2=\emptyset$ e $Q3=\emptyset$, o conjunto de valores dos parâmetros do algoritmo incluindo o número máximo de ciclos NC_{\max} está dentro do intervalo entre 0 e 1 e os limites de risco individuais l_1 e l_2 são 10^{-5} e 10^{-6} , respectivamente;

Passo 2: $\tau=1$, $\theta=1-\tau$, permitindo que o peso intermediário do arco (i,j) , $w_{ij} = t_{ij}$, aplicar o algoritmo de Dijkstra mostrado (algoritmo I) e obtém o valor de R_T^* associado ao peso e resultando no valor ótimo $T(R_T^*)$;

Passo 3: $\tau=0$, $\theta=1-\tau$, permitindo que o peso intermediário do arco (i,j) , $w_{ij} = D_{ij}$, aplicar o algoritmo de Dijkstra modificado (algoritmo I) e obtém o valor de R_D^* associado ao peso e resultando no valor ótimo $T(R_D^*)$;

Passo 4: Se $NC \leq NC_{\max}$, $\tau \leftarrow NC/NC_{\max}$, junto com o $\theta=1-\tau$, w_{ij} , use o algoritmo I para obter o caminho mais curto $R_{(\tau,\theta)}$ relacionado com o peso w_{ij} , $f(\tau) = RI(R_{(\tau,\theta)})$. Caso contrário, vá para o passo 5;

4.1: Se $f(\tau) < l_2$, $Q3 = Q3 \cup \{R_{(\tau,\theta)}\}$, $NC = NC + 1$, vá para o passo 4;

4.2: Se $l_2 \leq f(\tau) < l_1$, $Q2 = Q2 \cup \{R_{(\tau,\theta)}\}$, $NC = NC + 1$, vá para o passo 4;

4.3: Se $f(\tau) \geq l_1$, $Q1 = Q1 \cup \{R_{(\tau,\theta)}\}$, $NC = NC + 1$, vá para o passo 4;

Passo 5: Fim do algoritmo.

Figura 3.7 – Algoritmo II

Fonte: Gai *et al.* (2017)

No passo inicial são designados os valores dos parâmetros. Na fase seguinte, o algoritmo I é utilizado para encontrar a melhor rota em relação ao tempo de percurso (R_T^*), juntamente com o tempo total gasto e a dose letal encontrada nesse trajeto ($T(R_T^*)$ e $D(R_T^*)$). De maneira semelhante, o passo 3 também emprega o algoritmo I para encontrar a melhor rota em relação à dose tóxica exposta R_D^* , o tempo de trajeto nessa rota e a dose tóxica detectada no caminho ($T(R_D^*)$ e $D(R_D^*)$). Nos passos 2.1, 3.1 e 3.2 foram adicionados critérios para o encerramento do algoritmo III, onde a dose letal encontrada nos cálculos é comparada a um valor limite (l_{RI}). O último passo é um laço, onde também será calculado o peso w_{ij} , seu caminho ótimo relacionado $R_{(\tau,\theta)}$ e a dose tóxica dessa rota $D(R_{(\tau,\theta)})$ e comparada com o l_{RI} , encerrando o algoritmo ao atingir o valor máximo de ciclos ou atender ao critério de parada.

Passo 1: Inicialização (contador de ciclos, $NC=0$). Deixando $G=(V,E)$, $\tau_1 = 0, \tau_2 = 1$ (valores de procura para o τ), o vetor peso da rota ótima $(\tau^*, \theta^*)=(0,1)$, o conjunto de valores dos parâmetros do algoritmo incluindo o número máximo de ciclos $NC_{máx}$, o limite de risco aceitável pelo decisor ou pré-determinado no plano de emergência é l_{RI} , uma taxa de crescimento k do coeficiente de ponderação onde $l_{RI} > 0, k \in (0,1)$ (no presente trabalho foi adotado $k = 0,5$, semelhante a Gai *et al.*, 2017);

Passo 2: $\tau=1, \theta=1-\tau$, permitindo que o peso intermediário do arco (i,j) , $w_{ij} = \tau_{ij}$, aplicar o algoritmo de Dijkstra (algoritmo I) e obter o valor de R_T^* associado ao peso, resultando no valor ótimo $T(R_T^*)$ e $D(R_T^*)$;

2.1: Se $l_{RI} \leq D(R_T^*), R^* = R_T^*, \tau^*=\tau, \theta^*=1-\tau^*$ e o algoritmo encerra.

Passo 3: $\tau=0, \theta=1-\tau$, permitindo que o peso intermediário do arco (i,j) , $w_{ij} = D_{ij}$, aplicar o algoritmo de Dijkstra (algoritmo I) e obter o valor de R_D^* associado ao peso, resultando no valor ótimo $D(R_D^*)$ e $T(R_D^*)$;

3.1: Se $l_{RI} < D(R_D^*), R^*$ não existe uma solução ótima e o algoritmo encerra.

3.2: Se $l_{RI} = D(R_D^*), R^* = R_D^*, \tau^*=\tau, \theta^*=1-\tau^*$ e o algoritmo encerra.

Passo 4: Se $NC \leq NC_{máx}$, $\tau \leftarrow \tau_1 + k \cdot (\tau_2 - \tau_1)$, junto com o peso $w_{ij} = \lambda_{ij}$, use o algoritmo de Dijkstra modificado (algoritmo I) para obter o caminho mais curto $R_{(\tau,\theta)}$ relacionado com o peso w_{ij} e com o ótimo correspondente a $D(R_{(\tau,\theta)})$. Caso contrário, não existe uma solução ótima e encerra o algoritmo.

4.1: Se $D(R_{(\tau,\theta)}) > l_{RI}, \tau_2 = \tau, NC = NC + 1$, vá para o passo 4.

4.2: Se $D(R_{(\tau,\theta)}) = l_{RI}, R^* = R_{(\tau,\theta)}, \tau^*=\tau, \theta^*=1-\tau^*$ e o algoritmo encerra.

4.3: Se $\tau_1 = \tau, NC = NC + 1, R^* = R_{(\tau,\theta)}, \tau^*=\tau, \theta^*=1-\tau^*$, vá para o passo 4.

Figura 3.8 – Algoritmo III

Fonte: Gai *et al.* (2017)

Com o andamento de todas as etapas mostradas na metodologia pôde-se obter os resultados necessários tanto para a simulação no ALOHA (etapas iniciais de APRs e AQR) quanto para a simulação no algoritmo desenvolvido em C++. Por conseguinte, se obteve as soluções finais para o problema: rotas de evacuação ótimas para cada situação estudada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

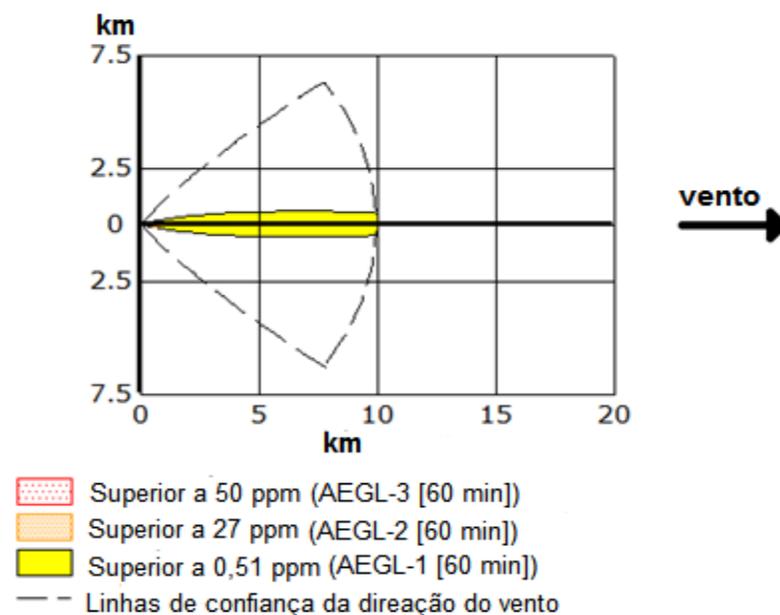
Pôde ser encontrado dois diferentes conjuntos de resultados durante todo o desenvolvimento da metodologia. As primeiras respostas foram obtidas a partir da simulação do cenário acidental no *software* ALOHA. Depois, conforme mostrado no fluxograma da Figura 3.1, das etapas seguintes resultaram as soluções finais do texto.

4.1 Resultados Obtidos no ALOHA

O cenário 1 – UDA foi simulado no ALOHA e a Figura 4.1 apresenta as zonas de dispersão do sulfeto de hidrogênio sob as características definidas. Esse mapa de dispersão mostra as concentrações da substância química a partir do nó fonte e com o decorrer do tempo. Nessa situação, foi utilizado o tempo máximo de uma hora para o vazamento do H₂S, pois é o maior período que pode ser usado no ALOHA. Com isso, os limites de exposição tóxica escolhidos para a simulação estão em acordo com o tempo de vazamento. Pôde-se observar na Figura 4.1 que boa parte da dispersão pertence à zona AEGL-1 [60 min] (*Acute Exposure Guideline Level* - Nível de Orientação de Exposição Aguda), onde o efeito sob a saúde das pessoas nessa área é considerado leve e transitório. A zona mais perigosa ao homem (AEGL-3 [60 min]), que provoca morte e danos permanentes à saúde, alcança 785 metros, sendo imperceptível nessa figura. Também pôde-se notar na figura que a zona menos perigosa (cor amarela) possui um raio grande de dispersão da nuvem tóxica, ultrapassando o limite do *software* de 10 quilômetros. Esse raio de 10 km de dispersão da nuvem tóxica só ocorreria se o vazamento tivesse uma duração maior que o tempo máximo de 60 minutos. Foi visto no ALOHA que, na situação simulada (tempo de vazamento de uma hora), o maior raio de dispersão chegou a aproximadamente 6,24 km na direção a favor do vento em relação ao nó fonte (nó 1).

As maiores concentrações para os nós da rede durante todo o tempo de vazamento simulado foram dadas na Tabela 4.1. Esses valores foram obtidos em unidades de ppm no aplicativo e convertidos para mg.m⁻³ para utilização no programa em C++. O nó fonte de vazamento tem uma concentração considerada infinita (durante o escape essa concentração no local é bastante elevada) e, por isso, foi admitido um valor muito alto em relação aos

valores dos outros nós. Pôde-se observar que a maioria dos pontos possui nenhuma concentração química, o que ocorreu devido à direção do vento considerada na simulação.



Nota: Imagem da zona de perigo é truncada no limite de 10 km.

Figura 4.1 – Dispersão da nuvem tóxica no cenário 1 – UDA

(tela de saída do ALOHA)

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

Tabela 4.1 – Concentrações obtidas nos nós na rede para cenário 1 - UDA

Nó	Concentração (mg.m ⁻³)	Nó	Concentração (mg.m ⁻³)
2	0	12	5,94
3	0	13	0
4	456	14	0
5	8,66	15	0,0186
6	0	16	0,122
7	0	17	0
8	0	18	0
9	0	19	7,47
10	0	20	1,03
11	1,21		

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

Para a UCR foi apresentado o cenário 2 ao ALOHA, e a Figura 4.2 mostra como ocorre a dispersão da nuvem tóxica na direção favorável ao vento. Observou-se as três regiões de diretrizes de exposição: AEGL-1 [10 min], AEGL-2 [10 min] (os efeitos na saúde são severos e duradouros ao longo da vida do indivíduo exposto) e o AEGL-3 [10 min], que alcançou uma distância máxima de 3.500 metros. Esses limites de exposição foram adicionados ao *software* e estão relacionados com o tempo de vazamento adotado para o cenário (tempo de escoamento de 1 minuto = vazamento instantâneo). Acima do limite AEGL-1 [10 min] (cor amarela) significa que um indivíduo fica exposto a uma nuvem tóxica de concentração entre 0,75 ppm e 41 ppm por um período de tempo maior que até 10 minutos e tem a probabilidade de apresentar alguns sintomas leves contra à saúde. Após o nível AEGL-2 [10 min] (simbolizado por pontos de cor laranja) representa que uma pessoa pode apresentar efeitos mais severos à saúde causado pela exposição tóxica de concentração entre 41 ppm e 76 ppm durante um intervalo de tempo maior que 10 minutos. Já acima do AEGL-3 [10 min] (figurado por pontos de cor vermelha) indica que o indivíduo presente no ambiente de concentração acima de 76 ppm corre o risco de morte ou poderá enfrentar efeitos gravíssimos à sua saúde se presente maior que o intervalo de tempo indicado (NOAA, 2017).

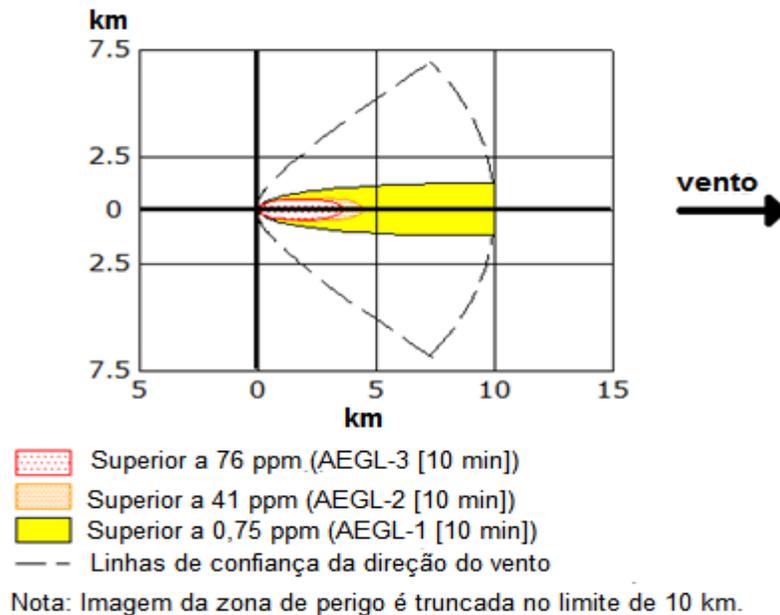


Figura 4.2 - Dispersão da nuvem tóxica no cenário 2 – UCR

(tela de saída do ALOHA)

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

As concentrações máximas dos pontos na rede foram reunidas na Tabela 4.2. Devido a um volume maior que foi liberado nessa situação percebeu-se que a maioria dos nós possuem concentrações tóxicas, diferentemente do cenário 1 – UDA. Além disso, notou-se que as concentrações são mais altas em relação ao que já foi apresentado. Creditou-se, novamente, à direção do vento a ausência de nuvem tóxica nos nós com concentrações nulas.

Tabela 4.2 – Concentrações obtidas nos nós na rede para cenário 2 - UCR

Nó	Concentração (mg.m ⁻³)	Nó	Concentração (mg.m ⁻³)
1	0	12	3736
2	0	13	0
3	0	14	0,611
5	58670	15	674
6	0,0342	16	723
7	0	17	4,50
8	0	18	0,252
9	0	19	1906
10	0	20	350
11	8373		

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

Para o cenário 3 – HDT foi obtida a dispersão da nuvem tóxica e foi mostrada na Figura 4.3, onde se observaram as três áreas de concentração química limites à saúde humana para o menor intervalo de tempo possível, de 10 minutos. A região de risco de morte (AEGL-3 [10 min]) atingiu 2.700 metros. Pôde ser observado no ALOHA que o perfil de dispersão da concentração tóxica obtido, apresentado na figura, se trata de uma projeção se o vazamento se mantivesse contínuo e com mesmas características, onde o seu limite atinge até o raio de 10 km. Durante a utilização do *software* pôde-se encontrar o valor da concentração obtida para o tempo próximo ao indicado como tempo de vazamento (nesse cenário o tempo de vazamento resultante foi de 1 minuto) e correspondeu a 2.810 ppm (ou 4.217 mg.m⁻³, como utilizado no programa C++).

Na Tabela 4.3, foram apresentadas as concentrações máximas dos pontos da rede exceto para o nó 2, que é a origem do acidente e possui uma concentração infinita. Os outros nós mostram uma concentração alta excluindo o nó 1 que está contra o vento em relação ao ponto de vazamento. Devido à direção do vento aplicada, os nós 3 e 9 possuem concentrações nulas e o nó 7, concentração quase nula.

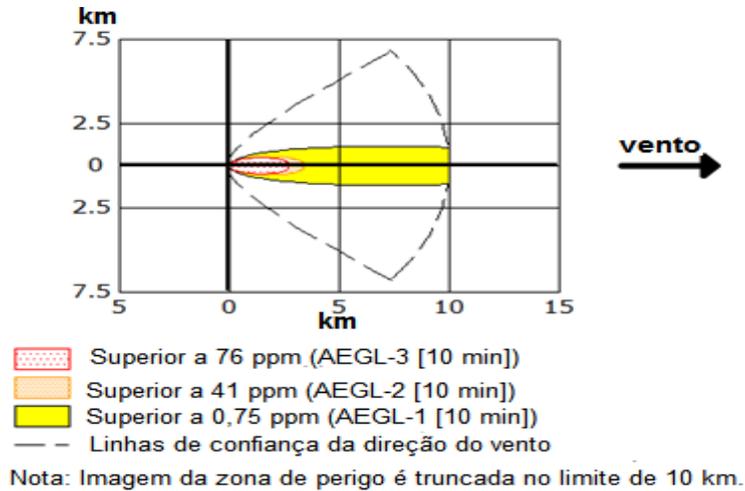


Figura 4.3 - Dispersão da nuvem tóxica no cenário 3 – HDT

(tela de saída do ALOHA)

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

Tabela 4.3 – Concentrações obtidas nos nós na rede para cenário 3 - HDT

Nó	Concentração (mg.m ⁻³)	Nó	Concentração (mg.m ⁻³)
1	0	12	1130
3	0	13	9,99
4	31510	14	95,3
5	17410	15	1180
6	15460	16	685,8
7	0,0459	17	101
8	7,70	18	23
9	0	19	639,3
10	0,752	20	270
11	3061		

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

4.2 Resultados do Algoritmo de Dijkstra

Para a utilização do algoritmo de Dijkstra foi necessária a introdução de alguns parâmetros de entrada. Eles devem ser fornecidos para que a aplicação do algoritmo seja realizada e se obtenham os melhores caminhos em relação aos dois objetivos, menor tempo de trajeto e o menor risco individual; alguns fatores são comuns para todas as simulações. Foram fornecidos os comprimentos entre os nós (i,j) que podem ser obtidos na Figura 3.3. A velocidade individual inicial adotada está em acordo com Shi *et al.* (2009) como 110 m/min (~1,83 m/s), iguais para todos os caminhos. Para todos os cenários simulados, foi utilizado o sulfeto de hidrogênio puro e com isso, assumiu-se que os parâmetros de Probit são $a = -11,5$, $b = 1$ e x equivalente a 1,9 (TNO, 2005a). Os parâmetros de α e β foram obtidos de maneira idêntica para todos os cenários simulado, os quais foram encontrados aleatoriamente para cada caminho que for percorrido e dentro dos intervalos: $\alpha \in [0,8;0,99999]$ e $\beta \in [0,0001;0,1]$. A partir da observação na literatura, como em Yuan & Wang (2009) e Gai *et al.* (2017), e da análise de sensibilidade pôde-se considerar a divisão dos valores de α e β nesses intervalos.

Além disso, para cada cenário, foi necessário obter a frequência de dispersão da substância química. Para isso, foi feita uma Análise de Árvore de Eventos (AAE) (Apêndice 2), apresentada em Cetesb (2014). No cenário 1, a frequência de falha para vazamento de tubulação (evento iniciador), foi obtida no *Purple Book* (TNO, 2005a) e seu valor é $3.10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ ano}^{-1}$; como a tubulação possui 50 metros, a frequência utilizada foi $1,5.10^{-5} \text{ ano}^{-1}$. A partir disso e dos valores de probabilidade de ignição imediata, ignição retardada e condições de explosão conseguiu-se chegar à frequência final de $6,75.10^{-6} \text{ ano}^{-1}$. Esse resultado também deve ser fornecido como dado de entrada ao algoritmo de Dijkstra.

O decisor também deve apontar um valor do limite de razoabilidade para o risco individual (I_{RI}), ou seja, a partir de qual grandeza deve-se levar em consideração esse parâmetro na escolha da rota de evacuação. No cenário na UDA, foi adotado o valor de $6,6.10^{-6} \text{ ano}^{-1}$ (maior valor possível abaixo da frequência de falha ou o próprio valor da frequência de falha), em que ambos os objetivos foram considerados (tempo e risco individual). Ou seja, foi visto qual o vetor peso ótimo em que todos os objetivos possam ser considerados simultaneamente e diferentes de (1,0) e (0,1), onde o vetor (1,0) só o tempo é considerado e vetor (0,1) só o risco individual é levado em consideração para a escolha do

caminho ótimo. Esse valor foi obtido a partir de várias simulações no algoritmo em C++, onde também foi analisado qual o vetor (τ^*, θ^*) que se adapta melhor aos resultados obtidos para tempo e RI.

A partir desses dados, pôde-se obter a rota ótima para o cenário 1 - UDA correspondente ao vazamento de sulfeto de hidrogênio em uma tubulação. A Tabela 4.4 reuniu as principais informações resultantes dessa simulação do modelo. Nessa tabela, foram apresentados os valores ótimos para tempo, risco individual e distância percorrida considerando somente uma função objetivo por vez, ou seja, minimizando o tempo (R_T^*) ou minimizando o risco individual (R_D^*). Além disso, também foi mostrada a rota ótima (R^*) para o problema, onde a minimização do tempo e do risco individual foram realizadas simultaneamente.

Tabela 4.4 – Resultados do cenário 1 - UDA

	Rota	Tempo de percurso (min)	Risco individual (ano ⁻¹)	Distância Percorrida (m)	Vetor peso ótimo (τ^*, θ^*)
Ponto ideal (R_T^*)	1 – 4 – 5 – 11 – 15 – 16 – 20	27,9418	6,6802.10 ⁻⁶ (aceitável)	1.989	-
Ponto ideal (R_D^*)	1 – 2 – 3 – 7 – 8 – 10 – 13 – 17 – 20	35,5843	5,9130.10 ⁻⁶ (aceitável)	2.239	-
Solução Ótima (R^*)	1 – 2 – 5 – 11 – 15 – 16 – 20	28,8879	5,9130.10 ⁻⁶ (aceitável)	1.989	(0,9932;0,0068)

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

A Figura 4.4 mostrou com maior clareza as rotas ótimas encontradas. A cor azul representa R_T^* , a cor amarela representa R_D^* e a coloração verde representa a rota ótima obtida a partir da minimização multiobjetivo apresentada como R^* . Também foi adotado as mesmas cores na Tabela 4.4, afim de melhorar o entendimento das rotas ótimas na Figura 4.4.

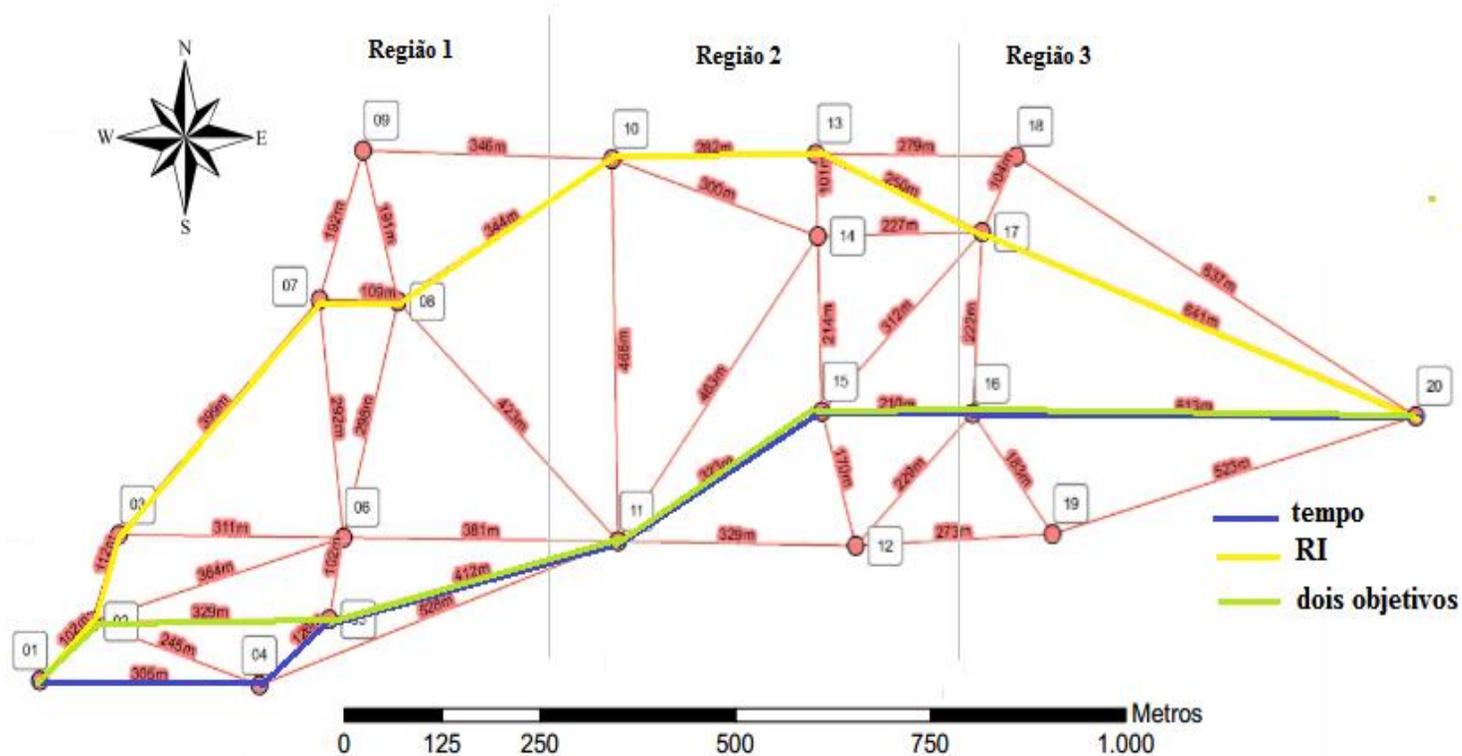


Figura 4.4 – Rotas ótimas de evacuação no cenário 1 - UDA

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

Observou-se que a melhor rota (R_T^*) para o cenário 1 – UDA (nó 1 em destaque) em relação ao objetivo de minimização do tempo de trajeto foi a sequência 1 – 4 – 5 – 11 – 15 – 16 – 20, com o tempo de percurso de 28 minutos, risco individual de $6,6802 \cdot 10^{-6} \text{ ano}^{-1}$ e distância percorrida de 1.989 metros. Considerando somente a minimização do RI, encontrou-se como melhor rota (R_D^*) 1 – 2 – 3 – 7 – 8 – 10 – 13 – 17 – 20, com um tempo gasto maior que 35 minutos para percorrer 2.239 metros e o valor de RI igual a $5,9130 \cdot 10^{-6} \text{ ano}^{-1}$.

Em caso de uma situação de vazamento de sulfeto de hidrogênio na UDA, em um ponto situado no nó 1, o melhor caminho a ser percorrido, considerado RI e tempo, até a chegada do local seguro foi pela rota R^* (1 – 2 – 5 – 11 – 15 – 16 – 20) com um tempo de percurso de 29 minutos, distância de 1.989 metros e RI de $5,9130 \cdot 10^{-6} \text{ ano}^{-1}$, dentro da faixa considerada aceitável segundo Cetesb (2014) e Gai *et al.* (2017). O RI dessa rota e da R_D^* são iguais, isso pôde ser creditado ao fato das concentrações em ambos caminhos serem bastante semelhantes.

Notou-se na Figura 4.4 que o nó 4 foi percorrido somente quando o objetivo de minimização do tempo foi considerado, a Tabela 4.4 mostrou que a concentração desse nó é a maior entre todo o grafo. Com isso, a única diferença entre as rotas R_T^* e R^* foi o segundo nó que compõem os caminhos, onde a rota ótima em relação aos dois objetivos não percorreu o nó 4.

Além disso, observou-se que o vetor peso (τ^*, θ^*) igual a (0,9932;0,0068) significa que o risco individual teve um grau de importância bastante pequeno na seleção dos nós da rota ótima. Porém, ainda assim, a minimização do RI foi considerada na escolha final da rota. Já o tempo teve um grau de relevância bastante alto no processo de otimização, ou seja, possuiu alta influência na construção da rota R^* . Isso foi confirmado pela quase igualdade nos nós componentes das rotas R_T^* e R^* , nas distâncias iguais percorridas e tempos gastos próximos.

Para a simulação do cenário 2 – UCR (nó 4) também foi necessária a frequência de ocorrência de nuvem tóxica a partir de uma falha, calculada através de uma AAE (CETESB, 2014) (Apêndice 2). A frequência utilizada como evento iniciador da árvore de eventos foi a mesma para um vaso de reação e segundo TNO (2005) corresponde à $5 \cdot 10^{-6} \text{ ano}^{-1}$. A partir do desenvolvimento da AAE, chegou-se à frequência final de $2,25 \cdot 10^{-6} \text{ ano}^{-1}$, usada como dado de entrada no algoritmo de Dijkstra apresentado. Também foi apontado o valor limite

de razoabilidade para o risco individual (l_{RI}), onde foi utilizado $2,24 \cdot 10^{-6} \text{ ano}^{-1}$ (maior valor abaixo da frequência de falha e medida em que todos os objetivos foram analisados). Essa grandeza foi escolhida após observações de várias simulações no programa em C++, em que obtivesse o valor que melhor se acomodava ao resultado final para os tempos e RIs encontrados. Além disso, buscou-se o maior valor possível para l_{RI} em que o vetor de peso ótimo (τ^*, θ^*) difere de (1,0) e (0,1), ou seja, considerando as duas funções objetivo.

O processo de otimização para o cenário 2 – UCR foi relativo ao vazamento de sulfeto de hidrogênio através de uma fonte direta. A Tabela 4.5 agrupa os resultados da simulação do algoritmo para esse cenário de nuvem tóxica. A Figura 4.5 mostra as rotas ótimas encontradas para o cenário 2 – UCR.

Tabela 4.5 – Resultados do cenário 2 - UCR

	Rota	Tempo de percurso (min)	Risco individual (ano^{-1})	Distância Percorrida (m)	Vetor peso ótimo (τ^*, θ^*)
Ponto ideal (R_T^*)	1 – 4 – 5 – 11 – 15 – 16 – 20	27,9418	$2,2500 \cdot 10^{-6}$ (aceitável)	1.989	-
Ponto ideal (R_D^*)	1 – 2 – 3 – 7 – 8 – 10 – 13 – 18 – 20	38,6709	$1,2490 \cdot 10^{-22}$ (tolerável)	2.264	-
Solução Ótima (R^*)	1 – 2 – 3 – 7 – 8 – 10 – 14 – 17 – 20	29,7609	$2,4980 \cdot 10^{-22}$ (torelável)	2.234	$(1; 1,2341 \cdot 10^{-8})$

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

A rota ótima em relação ao menor tempo de percurso (R_T^*) na UCR foi a sequência 1 – 4 – 5 – 11 – 15 – 16 – 20, com o tempo de percurso próximo a 28 minutos, distância percorrida de 1.989 metros e risco individual igual a $2,25 \cdot 10^{-6} \text{ ano}^{-1}$, considerada como aceitável segundo Cetesb (2014) e Gai *et al.* (2017). O percurso ótimo em relação ao menor RI (R_D^*) seguiu os nós 1 – 2 – 3 – 7 – 8 – 10 – 13 – 18 – 20, percorrendo 2.264 metros empregando um tempo maior que 38 minutos e o risco individual de $1,2490 \cdot 10^{-22} \text{ ano}^{-1}$. Devido ao cenário ser considerado representativo para toda a UCR, localizada no nó 4, a melhor rota de evacuação (R^*), considerando os dois objetivos simultaneamente, para essa unidade em casos de formação de nuvem tóxica descreveu a sequência dos nós 1 – 2 – 3 – 7 – 8 – 10 – 14 – 17 – 20, cruzando uma distância de 2.234 metros, o tempo de percurso de 30

minutos e RI de $2,4980 \cdot 10^{-22} \text{ ano}^{-1}$, considerado tolerável por Cetesb (2014) e Gai *et al.* (2017). Alguns dos valores de RI mostrados na tabela (em relação ao objetivo de menor RI e em nexos com a minimização dos dois objetivos) foram bastante pequenos, isso ocorreu devido às pequenas concentrações tóxicas dos nós escolhidos para as rotas. Notou-se entre os resultados que o vetor peso (τ^*, θ^*) igual a $(1; 1,2341 \cdot 10^{-8})$, expressando que o menor tempo e, por conseguinte, a menor distância entre o nó de saída e o nó de chegada para o local seguro foi o objetivo mais importante para o cenário estudado.

A Figura 4.5 mostrou que o nó 4, fonte do vazamento, seria percorrido em caso de somente considerar o menor tempo de evacuação como principal objetivo. A escolha desse nó para integrar uma rota de fuga ótima não foi concebível e isso foi ratificado quando se observou a rota ótima R^* , onde o nó não está incluído.

No cenário 3 – HDT (nó 2), a frequência de falha utilizada para evento iniciador da árvore de eventos foi igual à de um vaso pressurizado e corresponde à $5 \cdot 10^{-7} \text{ ano}^{-1}$ (TNO, 2005a). A partir da técnica de AAE (Apêndice 2) chegou-se ao valor final dessa frequência, que configura a dispersão da substância tóxica a partir de um vazamento nesse tipo de vaso e seu valor foi de $2,25 \cdot 10^{-7} \text{ ano}^{-1}$. Apontou-se o valor limite de razoabilidade para o risco individual (I_{RI}), onde se utilizou o valor de $2,25 \cdot 10^{-7} \text{ ano}^{-1}$. Essa grandeza foi escolhida após várias simulações no algoritmo em C++ e observado que foi o melhor valor que se ajusta aos resultados finais dos RIs e tempos encontrados.

Pôde-se obter a rota ótima para o cenário 3 – HDT, que foi referente ao vazamento de sulfeto de hidrogênio em um vaso vertical através do uso do programa. Os resultados obtidos na simulação do algoritmo foram mostrados na Tabela 4.6 e as rotas foram destacadas na Figura 4.6.

Tabela 4.6 – Resultados do cenário 3 - HDT

	Rota	Tempo de percurso (min)	Risco individual (ano⁻¹)	Distância Percorrida (m)	Vetor peso ótimo (τ^*, θ^*)
Ponto ideal (R_T^*)	1 – 4 – 5 – 11 – 15 – 16 – 20	27,9086	$2,25 \cdot 10^{-7}$ (tolerável)	1.989	-

Tabela 4.6 – Resultados do cenário 3 – HDT (continuação)

Ponto ideal (R_D^*)	1 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 10 – 13 – 18 – 20	59,6414	$2,25 \cdot 10^{-7}$ (tolerável)	2.476	-
Solução Ótima (R^*)	1 – 4 – 5 – 11 – 15 – 16 – 20	27,9086	$2,25 \cdot 10^{-7}$ (tolerável)	1.989	(1,0)

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

Para o cenário 3 – HDT, a rota ótima em relação ao menor tempo foi 1 – 4 – 5 – 11 – 15 – 16 – 20, com um tempo de 28 minutos, atravessando uma distância de 1.989 metros e RI igual $2,25 \cdot 10^{-7} \text{ ano}^{-1}$. A melhor rota considerando somente o menor risco individual seguiu os nós 1 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 10 – 13 – 18 – 20, utilizando um tempo elevado próximo a 60 minutos para evacuar a HDT e percorrendo uma distância de 2.476 metros e risco individual igual a $2,25 \cdot 10^{-7} \text{ ano}^{-1}$. Pôde-se observar também que a melhor rota para os dois objetivos (R^*) foi a sequência 1 – 4 – 5 – 11 – 15 – 16 – 20, com o tempo de percurso de 28 minutos, distância andada de 1.989 metros e RI igual a $2,25 \cdot 10^{-7} \text{ ano}^{-1}$, considerado dentro da faixa tolerável segundo Cetesb (2014) e Gai *et al.* (2017). Pôde ser observado que em todas as rotas os RIs foram iguais. Isso aconteceu, pois, a concentração para a maioria dos nós foi bastante elevada (Tabela 4.3) e, conseqüentemente, os valores finais dos riscos individuais também foram altos. Devido a esses RIs altos, o único objetivo que foi levado em consideração foi somente a minimização do tempo de evacuação.

Por isso, o vetor peso ótimo foi igual a (1,0), ou seja, o único objetivo relevante na evacuação foi o menor tempo gasto durante a trajetória de fuga. Por isso, pôde-se afirmar que no cenário simulado para a HDT a nuvem tóxica formada teve interferência tão elevada que não valia a pena buscar o caminho ótimo com um menor risco individual. Portanto, a minimização do tempo de evacuação se tornou o único objetivo a ser atingido.

Foi notado que em todos os cenários os perfis de concentração da substância química simulada são diferentes, sendo de baixa concentração para o cenário na UDA, alta concentração na HDT e com perfil mais equilibrado na hipótese de vazamento na UCR. Pôde-se atribuir essa diferença ao fato da utilização de três modos de escape do sulfeto de hidrogênio e, por conseguinte, diferentes volumes e também à localização de cada unidade

citada. Essas concentrações influenciaram diretamente os resultados finais dos riscos individuais e, conseqüentemente, a força do objetivo da minimização do RI durante o processo de escolha das rotas ótimas.

Foi visto que existiram valores aproximados para os vetores de peso ótimo (τ^*, θ^*) em todas situações simuladas, na UDA ($\tau^*, \theta^* = 0,9932; 0,0068$), na UCR ($\tau^*, \theta^* = 1; 1,2341 \cdot 10^{-8}$) e na HDT ($\tau^*, \theta^* = 1, 0$). Isso significa que em todas as situações os objetivos (tempo e RI) minimizados no modelo se comportaram de maneira próxima, ou seja, nessas unidades o fator mais importante foi o tempo de percurso durante uma evacuação. Pôde-se notar também que todas as unidades apresentaram pequenos riscos individuais ótimos (na UDA, $RI(R^*) = 5,9130 \cdot 10^{-6} \text{ ano}^{-1}$, na UCR, $RI(R^*) = 2,4980 \cdot 10^{-22} \text{ ano}^{-1}$ e na HDT, $RI(R^*) = 2,25 \cdot 10^{-7} \text{ ano}^{-1}$) e considerados de risco tolerável, segundo Cetesb (2014) e Gai *et al.* (2017). A partir disso, pôde-se considerar que o risco individual da refinaria hipotética igual a $6,138 \cdot 10^{-6} \text{ ano}^{-1}$, obtido a partir do somatório dos RIs, também está na faixa de risco aceitável.

Foi realizada uma simulação hipotética, a partir das maiores concentrações encontradas nos nós, reunidos na Tabela 4.7. Esses valores foram obtidos a partir da observação das Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6. Além disso, foi tomado como premissa que o nó 1 seria o nó de concentração infinita e, como em todas as simulações, o nó de saída do indivíduo e também foi adotada que a frequência de ocorrência desse cenário seria igual ao valor da maior frequência entre as três simulações realizadas, $6,75 \cdot 10^{-6} \text{ ano}^{-1}$. Essa quarta simulação poderia ser atribuída a um cenário em que não se tem certeza quanto à localização do vazamento do produto químico, mas que ocorre a formação de uma nuvem tóxica e, portanto, deve-se evacuar para o local seguro (nó 20). Também deve ser indicada pelo decisor a grandeza limite de razoabilidade para o risco individual (l_{RI}), usando o valor $6,7499999 \cdot 10^{-6} \text{ ano}^{-1}$. Essa medida foi escolhida a partir de análises no algoritmo em C++, sendo observado o vetor peso que melhor se ajustou aos resultados finais dos RIs e tempos encontrados.

Com isso, pôde-se obter a rota ótima no cenário 4 – Refinaria. Os resultados obtidos da simulação do algoritmo foram reunidos na Tabela 4.8 e as rotas estão em destaque na Figura 4.7.

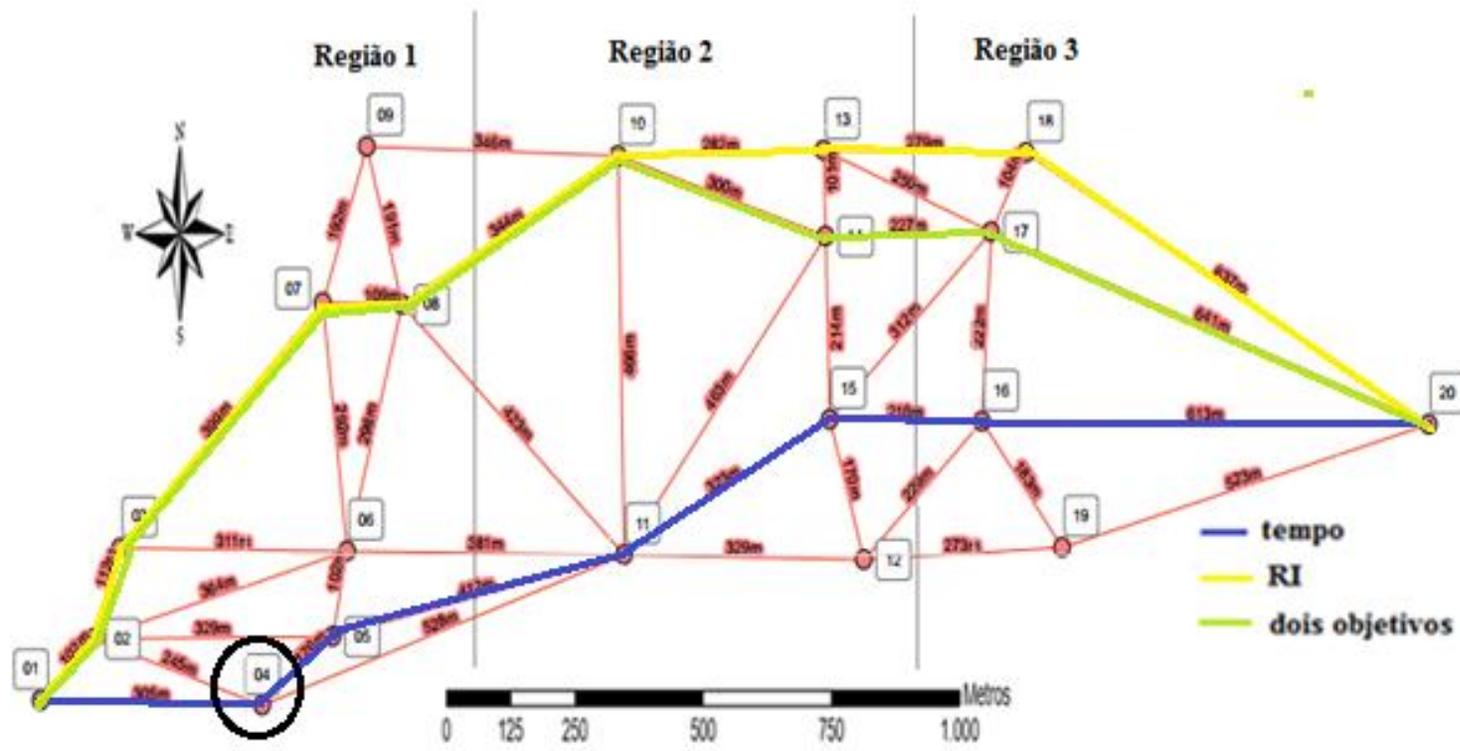


Figura 4.5 - Rotas ótimas de evacuação no cenário 2 - UCR

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

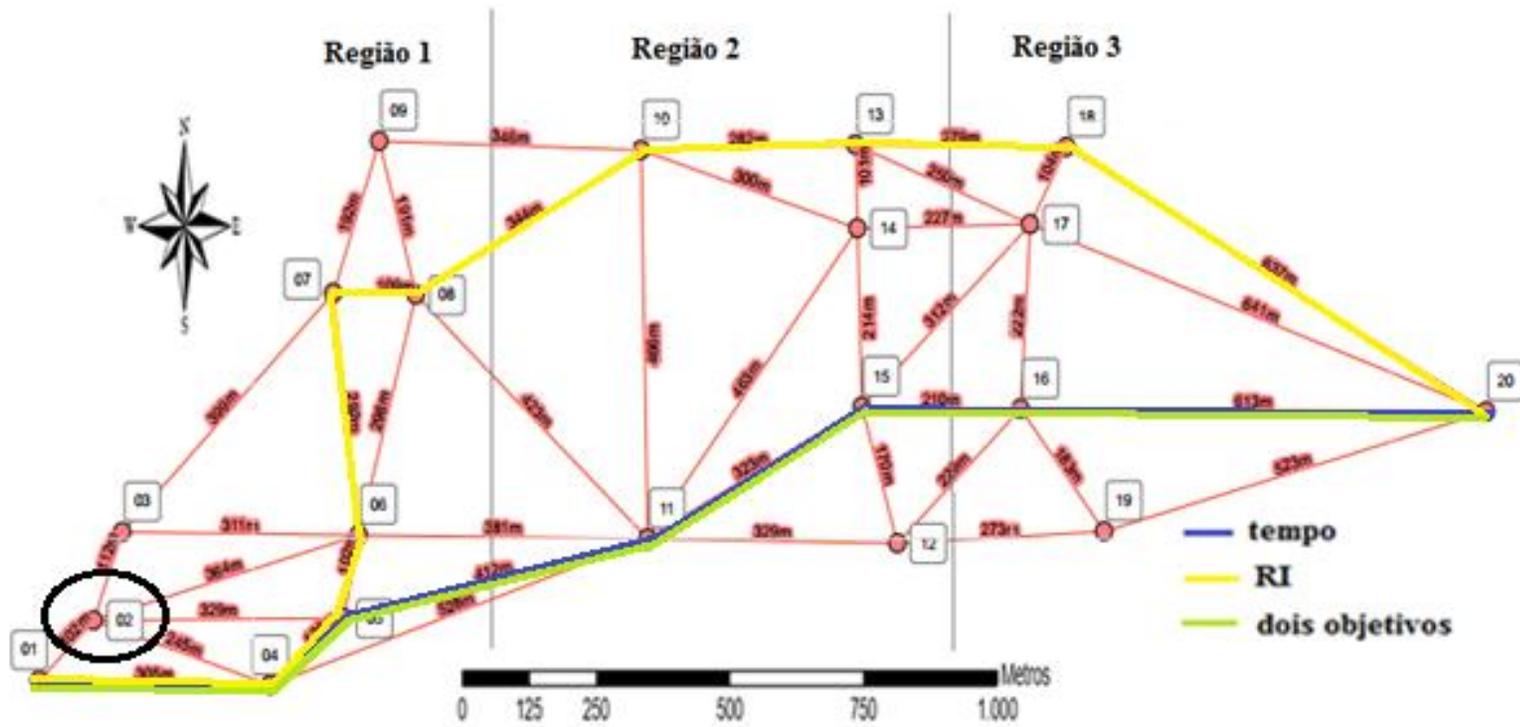


Figura 4.6 - Rotas ótimas de evacuação no cenário 3 - HDT

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

Tabela 4.7 – Concentrações obtidas nos nós na rede para cenário 4 - Refinaria

Nó	Concentração (mg.m ⁻³)	Nó	Concentração (mg.m ⁻³)
2	0	12	3736
3	0	13	9,99
4	31510	14	95,3
5	58670	15	1180
6	15460	16	723
7	0,0459	17	101
8	7,70	18	23
9	0	19	1906
10	0,752	20	350
11	8373		

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

Tabela 4.8 – Resultados do cenário 4 - Refinaria

	Rota	Tempo de percurso (min)	Risco individual (ano ⁻¹)	Distância Percorrida (m)	Vetor peso ótimo (τ^*, θ^*)
Ponto ideal (R_T^*)	1 – 4 – 5 – 11 – 15 – 16 – 20	27,9086	$6,75 \cdot 10^{-6}$ (aceitável)	1.989	-
Ponto ideal (R_D^*)	1 – 2 – 3 – 7 – 9 – 10 – 13 – 18 – 20	67,4887	$6,75 \cdot 10^{-6}$ (aceitável)	2.349	-
Solução Ótima (R^*)	1 – 2 – 3 – 7 – 8 – 10 – 14 – 17 – 20	29,7582	$6,75 \cdot 10^{-6}$ (aceitável)	2.234	(0,9877;0,0123)

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

No cenário 4 – Refinaria, a rota ótima em relação ao menor tempo foi 1 – 4 – 5 – 11 – 15 – 16 – 20, gastando um tempo pouco menor que 28 minutos para percorrer a distância de 1.989 metros e alcançar um RI igual $6,75 \cdot 10^{-6}$ ano⁻¹. A melhor rota considerando somente o menor risco individual foi 1 – 2 – 3 – 7 – 9 – 10 – 13 – 18 – 20, utilizando um tempo elevado, acima de 67 minutos, para evacuar a refinaria (do nó 1 ao 20), atravessando uma

distância de 2.349 metros e com risco individual igual a $6,75 \cdot 10^{-6} \text{ ano}^{-1}$. Pôde-se observar também que a melhor rota para os dois objetivos (R^*), menor tempo de fuga e RI, foi a sequência 1 – 2 – 3 – 7 – 8 – 10 – 14 – 17 – 20, com o tempo de percurso de 30 minutos, com uma distância desenvolvida a pé pelo indivíduo de 2.234 metros e RI igual a $6,75 \cdot 10^{-6} \text{ ano}^{-1}$, considerado aceitável segundo Cetesb (2014) e Gai *et al.* (2017). Notou-se que em todas as rotas os RIs foram iguais, podendo ser justificado através da alta concentração dos nós adotada (Tabela 4.7) para a simulação desse cenário hipotético. Com isso, os valores finais dos riscos individuais também foram altos, tornando o objetivo de minimização do tempo de evacuação o principal objetivo a ser levado em consideração.

Por isso, o vetor peso ótimo foi igual a (0,9877;0,0123) significando que o tempo de evacuação foi o fator de grande importância na escolha dos nós da rota de fuga, porém, a grandeza do risco individual também deve ser considerada quando decidir pela rota ótima geral (R^*). Nesse cenário 4, essa rota R^* expressa uma rota adotada para evacuar em caso de formação de nuvem tóxica devido a vazamento de sulfeto de hidrogênio puro em um local desconhecido. Poderia considerar como diferença para os outros cenários simulados (cenários 1, 2 e 3) a incerteza da origem do vazamento e, devido a isso, pode ser considerada como a rota de evacuação principal em caso de acidentes.

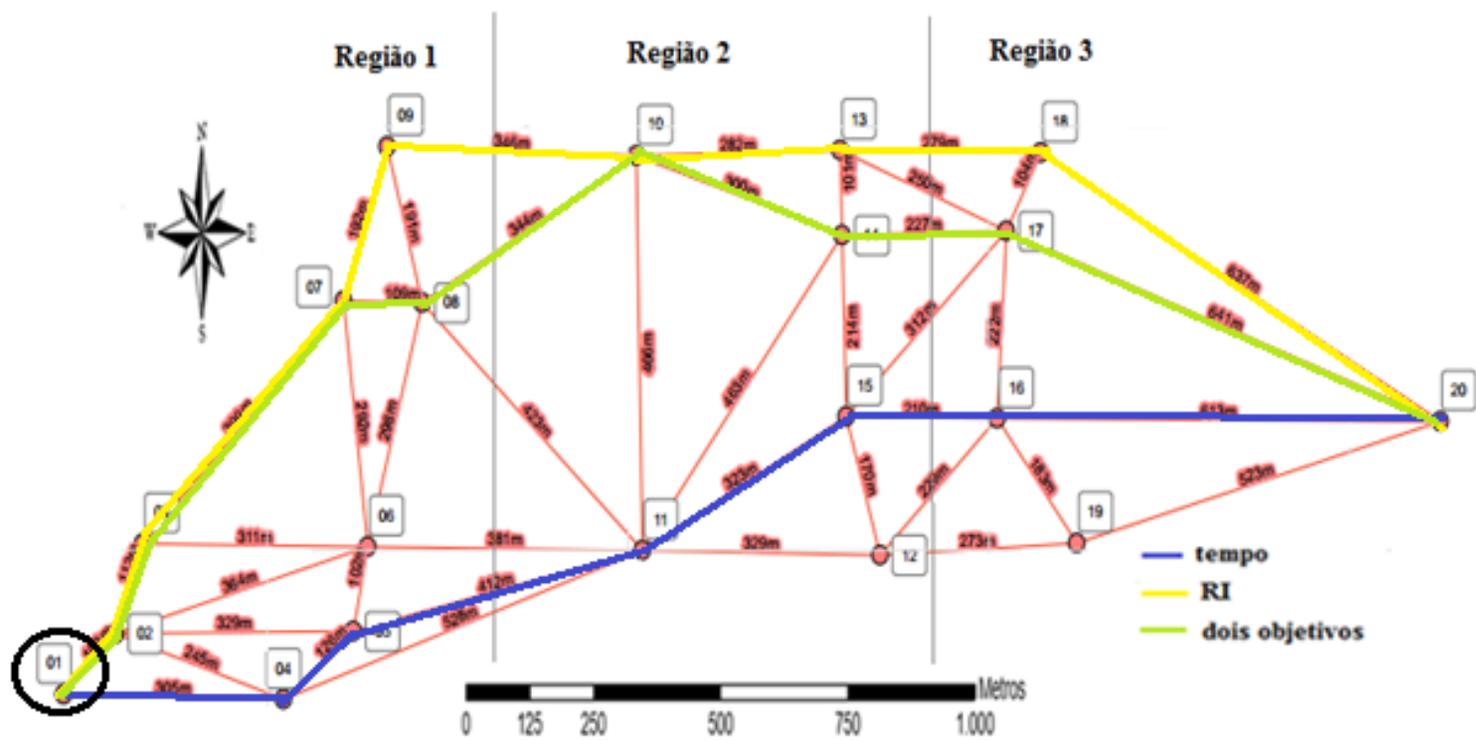


Figura 4.7 - Rotas ótimas de evacuação no cenário 4 - Refinaria

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

O trabalho foi desenvolvido em diversas etapas e, a partir delas, pôde-se entender o perigo intrínseco às principais unidades de processamento de refino de petróleo. Além disso, foram simulados cenários de formação de nuvem tóxica, onde ocorreu o vazamento de uma substância bastante perigosa para o homem, H_2S .

O problema de estudo buscou através da minimização de dois objetivos, tempo de evacuação e risco individual exposto durante esse trajeto, encontrar as rotas ótimas nas situações de liberação da nuvem tóxica. Para isso, foi utilizado o algoritmo de Dijkstra como ferramenta da otimização multiobjetivo.

Inicialmente, no estudo, foram identificados os principais riscos que podem ser encontrados na UDA, UCR e HDT de uma refinaria de petróleo hipotética; foi utilizada a técnica APR para tal fim. Essa análise qualitativa baseou a etapa seguinte, onde foi utilizado o *software* ALOHA durante as fases de quantificação do risco. Essa atividade é uma etapa anterior à simulação pelo algoritmo de Dijkstra modificado, desenvolvido em C++. Após todos esses passos pôde-se encontrar as rotas ótimas (R^*) levando em consideração os dois objetivos estudados (minimização do tempo de percurso e do risco individual durante a evacuação); também apresentou-se os percursos ótimos quando somente um dos objetivos foi considerado, R_T^* para a rota com o menor tempo de evacuação e R_D^* para a rota com o menor risco individual calculado e, também, os respectivos tempos de evacuação, distâncias percorridas e riscos individuais dessas rotas.

Além das três simulações feitas, uma quarta foi realizada. Esse novo cenário (cenário 4 – Refinaria) foi referente à ocorrência de um acidente gerador de nuvem tóxica, mas sem nenhum outro conhecimento prévio, como o nó origem desse acidente ou gravidade do acidente. Com isso, pôde-se encontrar a rota ótima R^* , que também pode ser dita como de fundamental importância para o desenvolvimento do plano de resposta à emergência.

Pode se apontar como contribuição do trabalho a análise de sensibilidade realizada. A partir dela, pôde-se ratificar que os parâmetros de decaimento, α e β , podem ser obtidos de maneira aleatória, sem prejudicar o resultado final do algoritmo.

Assim, obtiveram-se as rotas ótimas de evacuação em caso de formação de nuvem tóxica em pontos distintos e importantes de uma refinaria de petróleo hipotética e, também, para a mesma. Esses resultados podem servir de base para o desenvolvimento de um bom planejamento de segurança de empreendimento desse perfil cujo objetivo é a proteção dos indivíduos frente às consequências de um acidente dentro do ambiente estudado. Com tudo isso, pôde-se observar que a metodologia aplicada é viável, tendo capacidade de aplicação em diferentes cenários.

5.2 Limitações e Sugestões para Trabalhos Futuros

Uma limitação encontrada foi vista na etapa quantitativa do estudo (determinação das concentrações pelo ALOHA) onde o *software* simula substâncias puras ou algumas misturas determinadas na biblioteca do programa. Os cenários apresentados foram calculados com essa limitação e, por isso, somente o sulfeto de hidrogênio foi simulado. Em geral, em unidades de refinaria, as correntes são mistas, compostas de hidrocarbonetos, sulfeto de hidrogênio e outros contaminantes em menores proporções.

Além disso, pôde-se considerar como limitação a utilização do nó 1 como local de partida do indivíduo. Foi utilizada essa premissa em todos os cenários simulados. Em uma situação real uma pessoa poderia estar presente em qualquer nó pertencente ao *layout*, onde os nós representam unidades e prédios possíveis dentro de uma refinaria.

Os trabalhos futuros podem reduzir ou eliminar essas limitações apresentadas, buscando trabalhar mais perto da realidade de uma refinaria. Além disso, podem adaptar o algoritmo para diferentes tipologias acidentais como incêndio e explosão em nuvem ou considerar outras funções objetivos como o risco social, por exemplo. A otimização de evacuação também pode ser aplicada em diferentes ambientes como, por exemplo, para otimizar a evacuação devido a um acidente em local público.

REFERÊNCIAS

AHUJA, B. K.; MAGNANTI, T. L.; ORLIN, J. B.. **NETWORKS FLOWS: Theory, Algorithms, and Applications**. [s.l.]: Prentice-hall, 1993.

ALIKAR, N.; MOUSAVI, S. M.; GHAZILLA, R. A. R.; TAVANA, M.; OLUGU, E. U.; Application of the NSGA-II algorithm to a multi-period inventory-redundancy allocation problem in a series-parallel system. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 160, p.1-10, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2016.10.023>.

AMYOTTE, P. R.; BERGER, S.; EDWARDS, D. W.; GUPTA, J. P.; HENDERSHOT, D. C.; KHAN, F. I.; MANNAN, M. S.; WILLEY, R. J.. Why major accidents are still occurring. **Current Opinion In Chemical Engineering**, [s.l.], v. 14, p.1-8, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coche.2016.07.003>.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H.. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Elsevier: Abepro, 2011. Recurso digital.

AVEN, T. On how to define, understand and describe risk. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 95, n. 6, p.623-631, jun. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2010.01.011>.

BANDARU, S.; NG, A. H.C.; DEB, K.. Data mining methods for knowledge discovery in multi-objective optimization: Part A - Survey. **Expert Systems With Applications**, [s.l.], v. 70, p.139-159, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2016.10.015>.

BARBUSINSKI, K.; KALEMBA, K.; KASPERCZYK D.; URBANIEC, K.; KOZIK V.; Biological methods for odor treatment – A review. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 152, p.223-241, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.093>.

BASU, S. **Plant Hazard Analysis and Safety Instrumentation Systems**. Londres: Academic Press, 2016.

BLUM, C. Ant colony optimization: Introduction and recent trends. **Physics Of Life Reviews**, [s.l.], v. 2, n. 4, p.353-373, dez. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.plrev.2005.10.001>.

BOTTELBERGHS, P.H. Risk analysis and safety policy developments in the Netherlands. **Journal Of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 71, n. 1-3, p.59-84, jan. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3894\(99\)00072-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3894(99)00072-2).

CCPS – Center for Chemical Process Safety. **Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis**. 2 ed., American Institute of Chemical Engineers, New York, 2000.

_____. **Layer of Protection Analysis: Simplified process risk assessment**, American Institute of Chemical Engineers New York, 2001.

_____. **Guidelines for Hazard Evaluation Procedures**, 3 ed., American Institute of Chemical Engineers, New York, 2008.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Norma Técnica P4.261: Risco de Acidente de Origem Tecnológica – Método para decisão e termos de referências**. 2 ed. São Paulo, 2014.

_____. **CETESB segue trabalho de contenção do acidente em Guarujá: Técnicos da CETESB trabalham para evitar impacto ao meio ambiente**. 2016. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/2016/01/15/cetesb-segue-trabalho-de-contencao-do-acidente-em-guaruja/>>. Acesso em: 03 out. 2016a.

_____. **FISPQ: Ficha de Informação de Produtos Químicos**. [s.l.]: 2016b. Disponível em: <http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=SULFETO%20ODE%20HIDROG%CANIO>. Acesso em: 23 dez. 2016b.

CHEN, Y.; SHEN, S.; CHEN, T.; YANG, R.. Path Optimization Study for Vehicles Evacuation based on Dijkstra Algorithm. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 71, p.159-165, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.04.023>.

COELLO COELLO, C. A. A Comprehensive Survey of Evolutionary-Based Multiobjective Optimization Techniques. **Knowledge And Information Systems**, [s.l.], v. 1, n. 3, p.269-308, ago. 1999. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/bf03325101>.

COVA, T. J.; DENNISON, P. E.; DREWS, F. A.. Modeling Evacuate versus Shelter-in-Place Decisions in Wildfires. **Sustainability**, [s.l.], v. 3, n. 12, p.1662-1687, 29 set. 2011. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su3101662>.

COX, A. B.; GIFFORD, Fred. An overview to geographic information systems. **The Journal Of Academic Librarianship**, [s.l.], v. 23, n. 6, p.449-461, nov. 1997. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0099-1333\(97\)90169-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0099-1333(97)90169-5).

DENG, Y.; CHEN, Y.; ZHANG, Y.; MAHADEVAN, S.. Fuzzy Dijkstra algorithm for shortest path problem under uncertain environment. **Applied Soft Computing**, [s.l.], v. 12, n. 3, p.1231-1237, mar. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2011.11.011>.

DIJKSTRA, E. W. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. **Numerische Mathematik**. Vol. 1, pp.269-271, 1959.

DUIJM, N. J. Safety-barrier diagrams as a safety management tool. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 94, n. 2, p.332-341, fev. 2009. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.ress.2008.03.031

DUIVES, D. C.; DAAMEN, W.; HOOGENDOORN, S. P. State-of-the-art crowd motion simulation models. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, [s.l.], v. 37, p.193-209, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2013.02.005>.

EPA – Environmental Protection Agency. **Profile of the Petroleum Refining Industry**. Washington: Sector Notebook Project, 1995

_____. **ALOHA Software**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/comeo/aloha-software>>. Acesso em: 26 set. 2016.

FAHIM, M. A.; AL-SAHHAF, T. A.; ELKILANI, A. S.. **Introdução ao Refino de Petróleo**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. (Engenharia de Petróleo). Tradução por Lersch Traduções.

FANG, Z.; ZONG, X.; LI, Q.; LI, Q.; XIONG, S.. Hierarchical multi-objective evacuation routing in stadium using ant colony optimization approach. **Journal Of Transport Geography**, [s.l.], v. 19, n. 3, p.443-451, maio 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2010.10.001>.

FYFFE, L.; KRAHN, S.; CLARKE, J.; KOSSON, D.; HUTTON, J.. A preliminary analysis of Key Issues in chemical industry accident reports. **Safety Science**, [s.l.], v. 82, p.368-373, fev. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2015.10.008>.

GAI, W.; DENG, Y.; JIANG, Z.; LI, J.; DU, Y.. Multi-objective evacuation routing optimization for toxic cloud releases. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 159, p.58-68, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2016.10.021>.

GALÁN-GARCÍA, J. L. AGUILERA-VENEGAS, G.; GALÁN-GARCÍA, M. A.; RODRÍGUEZ-CIELOS, P.. A new Probabilistic Extension of Dijkstra's Algorithm to simulate more realistic traffic flow in a smart city. **Applied Mathematics And Computation**, [s.l.], v. 267, p.780-789, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2014.11.076>.

GALEEV, A.D.; PONIKAROV, S.I.. Numerical analysis of toxic cloud generation and dispersion: A case study of the ethylene oxide spill. **Process Safety And Environmental**

Protection, [s.l.], v. 92, n. 6, p.702-713, nov. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2013.12.004>.

GEORGIADOU, P. S.; PAPAZOGLU, I. A.; KIRANOUDIS, C. T.; MARKATOS, N. C. Modeling emergency evacuation for major hazard industrial sites. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 92, n. 10, p.1388-1402, out. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2006.09.009>.

GEORGIADOU, P. S.; PAPAZOGLU, I. A.; KIRANOUDIS, C. T.; MARKATOS, N. C.; Multi-objective evolutionary emergency response optimization for major accidents. **Journal Of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 178, n. 1-3, p.792-803, jun. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.02.010>.

GEYER, C. J.. Introduction to Markov Chain Monte Carlo. In: BROOKS, Steve et al (Ed.). **Handbook of Markov Chain Monte Carlo**. [s.l.]: Chapman And Hall/crc, 2011. p. 3-48.

GOERIGK, M.; DEGHDAK, K.; HEßLER, P.. A comprehensive evacuation planning model and genetic solution algorithm. **Transportation Research Part e: Logistics and Transportation Review**, [s.l.], v. 71, p.82-97, nov. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2014.08.007>.

HAN, L. D.; YUAN, F.; CHIN, S.; HWANG, H.. Global Optimization of Emergency Evacuation Assignments. **Interfaces**, [s.l.], v. 36, n. 6, p.502-513, dez. 2006. Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS). <http://dx.doi.org/10.1287/inte.1060.0251>.

HAN, Z.Y.; WENG, W.G.. Comparison study on qualitative and quantitative risk assessment methods for urban natural gas pipeline network. **Journal Of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 189, n. 1-2, p.509-518, maio 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.02.067>.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J.. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 8. ed. São Paulo: Mcgraw-Hill, 2006. Tradução por Ariovaldo Griesi.

HOLMES, N.S.; MORAWSKA, L.. A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available. **Atmospheric Environment**, [s.l.], v. 40, n. 30, p.5902-5928, set. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.06.003>.

HU, Z.; YANG, J.; SUN, H.; WEI, L.; ZHAO, Z.. An improved multi-objective evolutionary algorithm based on environmental and history information. **Neurocomputing**, [s.l.], v. 222, p.170-182, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2016.10.014>.

ISO, 2009. **Risk management vocabulary**. ISO/IEC Guide 73

JAIMES, A. L.; COELLO COELLO, C. A. Multi-Objective Evolutionary Algorithms: A Review of the State-of-the-Art and some of their Applications in Chemical Engineering. In: RANGAIAH, G. P. (Ed). **Multi-Objective Optimization: Techniques and Applications in Chemical Engineering**. [s. l.]: World Scientific, 2008. Cap. 3. 1 v. (Advances in Process Systems Engineering).

JONES, D. S. J.; PUJADÓ, P. R. (Ed.). **Handbook of Petroleum Processing**. [s.l.]: Springer, 2008.

JONKMAN, S.N.; VAN GELDER, P.H.A.J.M.; VRIJLING, J.K.. An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage. **Journal Of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 99, n. 1, p.1-30, abr. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3894\(02\)00283-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3894(02)00283-2).

KALANTARNIA, M.; KHAN, F.; HAWBOLDT, K.. Modelling of BP Texas City refinery accident using dynamic risk assessment approach. **Process Safety And Environmental**

Protection, [s.l.], v. 88, n. 3, p.191-199, maio 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2010.01.004>.

KHAN, F. I.; ABBASI, S.A.. Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries. **Journal Of Loss Prevention In The Process Industries**, [s.l.], v. 11, n. 4, p.261-277, jul. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0950-4230\(97\)00051-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0950-4230(97)00051-x).

KHAN, F. I; ABBASI, S.A. Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences. **Journal Of Loss Prevention In The Process Industries**, [s.l.], v. 12, n. 5, p.361-378, set. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0950-4230\(98\)00062-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0950-4230(98)00062-x).

KHAN, F. I; ABBASI, S.A. Modelling and simulation of heavy gas dispersion on the basis of modifications in plume path theory. **Journal Of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 80, n. 1-3, p.15-30, dez. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3894\(00\)00287-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3894(00)00287-9).

KHAN, F.; RATHNAYAKA, S.; AHMED, S.. Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future. **Process Safety And Environmental Protection**, [s.l.], v. 98, p.116-147, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2015.07.005>.

KIM, B.; KIM, T. Monte Carlo simulation for offshore transportation. **Ocean Engineering**, [s.l.], v. 129, p.177-190, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.11.007>.

KLETZ, T. A. **What Went Wrong?:** Case Histories of Process Plant Disasters and How They Could Have Been Avoided. 5 ed. EUA: Elsevier. 2009

KONAK, A.; COIT, D. W.; SMITH, A. E.. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 91, n. 9, p.992-1007, set. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2005.11.018>.

KOTEK, L.; TABAS, M.. HAZOP study with qualitative risk analysis for prioritization of corrective and preventive actions. In: 20th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2012. **Procedia Engineering**, [s. L.], v. 42, p.808-815, 2012.

LABIB, A.. Learning (and unlearning) from failures: 30 years on from Bhopal to Fukushima an analysis through reliability engineering techniques. **Process Safety And Environmental Protection**, [s.l.], v. 97, p.80-90, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2015.03.008>.

LIU, C.; MAO, Z.; FU, Z. Emergency Evacuation Model and Algorithm in the Building with Several Exits. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 135, p.12-18, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.072>.

LIU, M.; ZHANG, F.; MA, Y.; POTA, H. R.; SHEN, W.. Evacuation path optimization based on quantum ant colony algorithm. **Advanced Engineering Informatics**, [s.l.], v. 30, n. 3, p.259-267, ago. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2016.04.005>.

MAINIER, F. B.; VIOLA, E. D. M.. O sulfeto de hidrogênio (H₂S) e o meio ambiente. [s. l.], 2005. In: II Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia – SEGeT' 2005.

MANCARELLA, P. MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models. **Energy**, [s.l.], v. 65, p.1-17, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.041>

MANNAN, S. **Lees' Process Safety Essentials: Hazard Identification, Assessment and Control**. 1. ed. Grã-Bretanha: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2014.

MARHAVILAS, P.K.; KOULOURIOTIS, D.; GEMENI, V.. Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009. **Journal Of Loss Prevention In The Process**

Industries, [s.l.], v. 24, n. 5, p.477-523, set. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2011.03.004>.

MARKOWSKI, A. S.; MANNAN, M. S.. ExSys-LOPA for the chemical process industry. **Journal Of Loss Prevention In The Process Industries**, [s.l.], v. 23, n. 6, p.688-696, nov. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2010.05.011>.

MARLER, R.T.; ARORA, J.S.. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. **Structural And Multidisciplinary Optimization**, [s.l.], v. 26, n. 6, p.369-395, 1 abr. 2004. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00158-003-0368-6>.

MARLER, R. T.; ARORA, J. S.. The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights. **Structural And Multidisciplinary Optimization**, [s.l.], v. 41, n. 6, p.853-862, 12 dez. 2009. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00158-009-0460-7>.

MELO, E. N. **O Efeito da Simulação de Evacuação de Multidão na Segurança e no Estudo de Layout**. 2015. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

METROPOLIS, N.; ULAM, S. The Monte Carlo Method. **Journal Of The American Statistical Association**, [s.l.], v. 44, n. 247, p.335-341, set. 1949. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1949.10483310>.

MOURA, M. C.; LINS, I. D.; DROGUETT, E. L.; SOARES, R. F.; PASCUAL, R.. A Multi-Objective Genetic Algorithm for determining efficient Risk-Based Inspection programs. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 133, p.253-265, jan. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2014.09.018>.

NAIDU, K.; MOKHLIS, H.; BAKAR, A.H.A.. Multiobjective optimization using weighted sum Artificial Bee Colony algorithm for Load Frequency Control. **International Journal**

Of Electrical Power & Energy Systems, [s.l.], v. 55, p.657-667, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.10.022>.

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration. **Cameo Chemicals: Hydrogen Sulfide**. Disponível em: <<https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/3625>>. Acesso em: 26 mar. 2017.

NOLAN, D. P.. Objective and Description of PHA, What-If, and HAZOP Reviews. **Safety And Security Review For The Process Industries**, [s.l.], p.8-13, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-323-32295-9.00003-3>.

PASMAN, H.; RENIERS, G.. Past, present and future of Quantitative Risk Assessment (QRA) and the incentive it obtained from Land-Use Planning (LUP). **Journal Of Loss Prevention In The Process Industries**, [s.l.], v. 28, p.2-9, abr. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2013.03.004>.

PENG, W.; HU, X.; ZHAO, F.; SU, J.. A Fast Algorithm to Find All-Pairs Shortest Paths in Complex Networks. **Procedia Computer Science**, [s.l.], v. 9, p.557-566, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2012.04.060>.

PEYER, S.; RAUTENBACH, D.; VYGEN, J. A generalization of Dijkstra's shortest path algorithm with applications to VLSI routing. **Journal Of Discrete Algorithms**, [s.l.], v. 7, n. 4, p.377-390, dez. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jda.2007.08.003>

RAMTEKE, M.; GUPTA, S. K. Multi-Objective Genetic Algorithm and Simulated Annealing with the Jumping Gene Adaptations. In: RANGAIAH, G. P. (Ed.). **Multi-Objective Optimization: Techniques and Applications in Chemical Engineering**. [s.l.]: World Scientific, 2008. Cap. 4. 1 v. (Advances in Process Systems Engineering).

RANGAIAH, G. P. Introduction. In: _____ (Ed.). **Multi-Objective Optimization: Techniques and Applications in Chemical Engineering**. [s.l.]: World Scientific, 2008. Cap. 1. 1 v. (Advances in Process Systems Engineering).

ROSQVIST, T. MOLARIUS, R.; VIRTA, H.; PERRELS, A.. Event tree analysis for flood protection—An exploratory study in Finland. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 112, p.1-7, abr. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2012.11.013>.

RUIJTERS, E.; STOELINGA, M. Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools. **Computer Science Review**, [s.l.], v. 15-16, p.29-62, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosrev.2015.03.001>.

SAADATSERESHT, M.; MANSOURIAN, A.; TALEAI, M. Evacuation planning using multiobjective evolutionary optimization approach. **European Journal Of Operational Research**, [s.l.], v. 198, n. 1, p.305-314, out. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2008.07.032>.

SEDEÑO-NODA, A.; RAITH, A. A Dijkstra-like method computing all extreme supported non-dominated solutions of the biobjective shortest path problem. **Computers & Operations Research**, [s.l.], v. 57, p.83-94, maio 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2014.11.010>

SHAO, H.; DUAN, G.. Risk Quantitative Calculation and ALOHA Simulation on the Leakage Accident of Natural Gas Power Plant. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 45, p.352-359, 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.170>.

SHEN, Y. WANG, Q.; YAN, W.; SUN, J.. An evacuation model coupling with toxic effect for chemical industrial park. **Journal Of Loss Prevention In The Process Industries**, [s.l.], v. 33, p.258-265, jan. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2015.01.002>.

SHI, L.; XIE, Q.; CHENG, X.; CHEN, L.; ZHOU, Y.; ZHANG, R.. Developing a database for emergency evacuation model. **Building And Environment**, [s.l.], v. 44, n. 8, p.1724-1729, ago. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.11.008>.

SHI, R.; LEE, K. Y.. Multi-Objective Optimization of Electric Vehicle Fast Charging Stations with SPEA-II. **Ifac-papersonline**, [s.l.], v. 48, n. 30, p.535-540, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.12.435>.

SHIMADA, Y.; KITAJIMA, T.; FUCHINO, T.; TAKEDA, K.. Process Safety Management Based on the Business Process Model of Engineering Activities. **J. Chem. Eng. Japan / Jcej**, [s.l.], v. 48, n. 8, p.609-618, 2015. Society of Chemical Engineers, Japan. DOI: 10.1252/jcej.14we319.

SHU-XI, W.. The Improved Dijkstra's Shortest Path Algorithm and Its Application. In: International Workshop On Information And Electronics Engineering (IWIEE). **Procedia Engineering**, 2012, v. 29, p.1186-1190, 2012. DOI:10.1016/j.proeng.2012.01.110

SILVA, E. L. da; MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2005. 138 p.

SKLET, S. Safety barriers: Definition, classification, and performance. **Journal Of Loss Prevention In The Process Industries**, [s.l.], v. 19, n. 5, p.494-506, set. 2006. Elsevier BV. doi: 10.1016/j.jlp.2005.12.004.

SORENSEN, J. Planning for protective action decision making: evacuate or shelter-in-place. **Journal Of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 109, n. 1-3, p.1-11, jun. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.03.004>.

SMYTH, T. A.G.. A review of Computational Fluid Dynamics (CFD) airflow modelling over aeolian landforms. **Aeolian Research**, [s.l.], v. 22, p.153-164, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.07.003>.

SZKLO, A. S.; ULLER, V. C.. **Fundamentos do refino do petróleo: tecnologia e economia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

TIXIER, J.; DUSSERRE, G.; SALVI, O.; GASTON, D.. Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. **Journal Of Loss Prevention In The Process Industries**, [s. l.], v. 15, p.291-30, 2002.

THOMAS, J. E., (Org.). **Fundamentos da engenharia de petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

TNO - Netherlands Organisation for Applied Scientific Research. **Purple Book - Guideline for quantitative risk assessment**, 3 ed., 2005a.

_____. **Yellow Book – Methods for the calculation of Physical Effects – due to release hazardous materials (liquids and gases)**, 3 ed., 2005b.

_____. **EFFECTS - SOFTWARE FOR SAFETY - AND HAZARD ANALYSIS**. Disponível em: <<https://www.tno.nl/en/focus-area/urbanisation/environment-sustainability/public-safety/effects-software-for-safety-and-hazard-analysis/>>. Acesso em: 14 out. 2016.

TSENG, J.M.; SU, T.S.; KUO, C.Y.. Consequence Evaluation of Toxic Chemical Releases by ALOHA. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 45, p.384-389, 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.175>.

WEI, C.; ROGERS, W. J.; MANNAN, M. S.. Layer of protection analysis for reactive chemical risk assessment. **Journal Of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 159, n. 1, p.19-24, nov. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.105>.

YUAN, Y.; WANG, D.. Path selection model and algorithm for emergency logistics management. **Computers & Industrial Engineering**, [s.l.], v. 56, n. 3, p.1081-1094, abr. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2008.09.033>.

XIE, C.; WALLER, S. T. Optimal Routing with Multiple Objectives: Efficient Algorithm and Application to the Hazardous Materials Transportation Problem. **Computer-aided Civil And Infrastructure Engineering**, [s.l.], v. 27, n. 2, p.77-94, 29 mar. 2011. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8667.2011.00720.x>.

ZIO, E. **An introduction to the basics of reliability and risk analysis**. Londres: World Scientific, 2006. 13 v. (Series in Quality, Reability and Engineering Statistics)

ZHANG, X.; ZHANG, Z.; ZHANG, Y.; WEI, D.; DENG, Y.. Route selection for emergency logistics management: A bio-inspired algorithm. **Safety Science**, [s.l.], v. 54, p.87-91, abr. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2012.12.003>.

ZHOU, Y.; LIU, M.. Risk Assessment of Major Hazards and its Application in Urban Planning: A Case Study. **Risk Analysis**, [s.l.], v. 32, n. 3, p.566-577, 29 ago. 2011. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1539-6924.2011.01670.x>.

APÊNDICES**Apêndice 1**

Em cada unidade de processamento de petróleo é realizada a etapa qualitativa de risco, sendo utilizada a técnica de Análise Preliminar de Risco (APR). As APRs das unidades são mostradas abaixo.

UDA:

Área/Unidade: UDA				
Sistema: Processo de Separação				
Descrição: Torre Atmosférica				
Risco	Causas	Consequências	Categoria de Risco (pessoal)	Medidas Preventivas e Mitigadoras
Vazamento de H ₂ S + Petróleo	Ruptura da torre ou fissura nas conexões devido má construção, corrosão, desgaste.	Nuvem Tóxica	III	Garantir boa construção e montagem do sistema; possuir sistema de manutenção preventiva (incluindo programa de corrosão)
		Incêndio em Poça	IV	

Área/Unidade: UDA

Sistema: Processo de Separação

Descrição: Linhas de saída e retorno de gás nos equipamentos

Risco	Causas	Consequências	Categoria de Risco (pessoal)	Medidas Preventivas e Mitigadoras
Vazamento de H ₂ S	Ruptura da linha ou fissura nas conexões devido má construção, corrosão, desgaste.	Nuvem Tóxica	IV	Garantir boa construção e montagem do sistema; possuir sistema de manutenção preventiva (incluindo programa de corrosão)

Área/Unidade: UDA

Sistema: Processo de Separação

Descrição: Vaso separador de gás (conectado a linha de retorno da Torre Atmosférica e linha da Unidade Tocha)

Risco	Causas	Consequências	Categoria de Risco (pessoal)	Medidas Preventivas e Mitigadoras
Vazamento de H ₂ S + água	Ruptura do vaso ou fissura nas conexões devido má construção, corrosão, desgaste.	Nuvem Tóxica	III	Garantir boa construção e montagem do sistema; possuir sistema de manutenção preventiva (incluindo programa de corrosão)

UCR:

Área/Unidade: UCR**Sistema: Processo de Conversão****Descrição: Reatores de Coque**

Risco	Causas	Consequências	Categoria de Risco (pessoal)	Medidas Preventivas e Mitigadoras
Vazamento de H ₂ S + Hidrocarbonetos pesados	Ruptura de reator ou fissura nas conexões devido má construção, corrosão, desgaste.	Nuvem Tóxica	III	Garantir boa construção e montagem do sistema; possuir sistema de manutenção preventiva (incluindo programa de corrosão)
		Incêndio em Poça	IV	

Área/Unidade: UCR**Sistema: Processo de Conversão****Descrição: Torre Fracionadora**

Risco	Causas	Consequências	Categoria de Risco (pessoal)	Medidas Preventivas e Mitigadoras
Vazamento de H ₂ S + Hidrocarbonetos pesados	Ruptura da torre ou fissura nas conexões devido má construção, corrosão, desgaste.	Nuvem Tóxica	III	Garantir boa construção e montagem do sistema; possuir sistema de manutenção preventiva (incluindo programa de corrosão)
		Incêndio em Poça	IV	

Área/Unidade: UCR

Sistema: Processo de Conversão

Descrição: Tambor de topo

Risco	Causas	Consequências	Categoria de Risco (pessoal)	Medidas Preventivas e Mitigadoras
Vazamento de H ₂ S + água	Ruptura do tambor ou fissura nas conexões devido má construção, corrosão, desgaste.	Nuvem Tóxica	III	Garantir boa construção e montagem do sistema; possuir sistema de manutenção preventiva (incluindo programa de corrosão)

Área/Unidade: UCR

Sistema: Processo de Conversão

Descrição: Linha de saída de topo de reatores de coque, linha de saída de topo de torre fracionadora e linha de saída de topo de tambor de topo

Risco	Causas	Consequências	Categoria de Risco (pessoal)	Medidas Preventivas e Mitigadoras
Vazamento de H ₂ S	Ruptura das linhas ou fissura nas conexões devido má construção, corrosão, desgaste.	Nuvem Tóxica	III	Garantir boa construção e montagem do sistema; possuir sistema de manutenção preventiva (incluindo programa de corrosão)

HDT:

Área/Unidade: HDT

Sistema: Processo de Tratamento

Descrição: Reator de tratamento

Risco	Causas	Consequências	Categoria de Risco (pessoal)	Medidas Preventivas e Mitigadoras
Vazamento de H ₂ S + hidrogênio (H ₂) + Hidrocarbonetos	Ruptura de reator ou fissura nas conexões devido má construção, corrosão, desgaste.	Nuvem Tóxica	III	Garantir boa construção e montagem do sistema; possuir sistema de manutenção preventiva (incluindo programa de corrosão)
		Incêndio em Poça	III	
		Incêndio em Nuvem	IV	

Área/Unidade: HDT

Sistema: Processo de Tratamento

Descrição: linhas de conexão

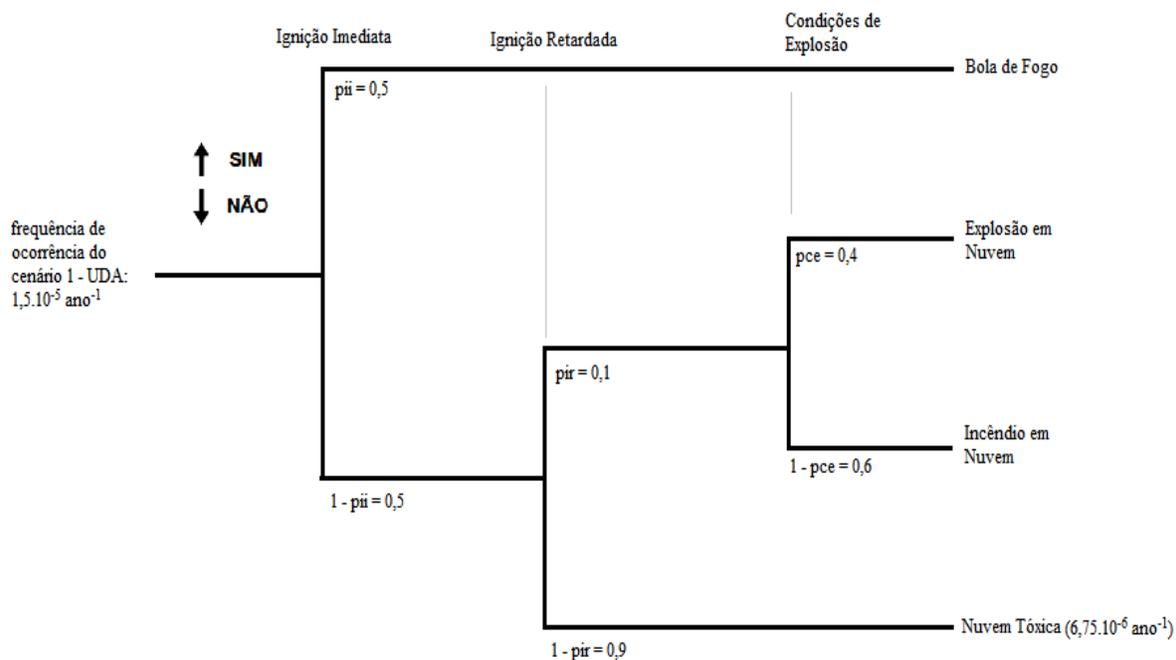
Risco	Causas	Consequências	Categoria de Risco (pessoal)	Medidas Preventivas e Mitigadoras
Vazamento de H ₂ S	Ruptura de linhas ou fissura nas conexões devido má construção, corrosão, desgaste.	Nuvem Tóxica	IV	Garantir boa construção e montagem do sistema; possuir sistema de manutenção preventiva (incluindo programa de corrosão)

Apêndice 2

São apresentadas nessa seção as análises de árvore de eventos realizadas para a obtenção do evento final Nuvem Tóxica obtida a partir do vazamento de uma tubulação e de vasos de reatores e de pressão.

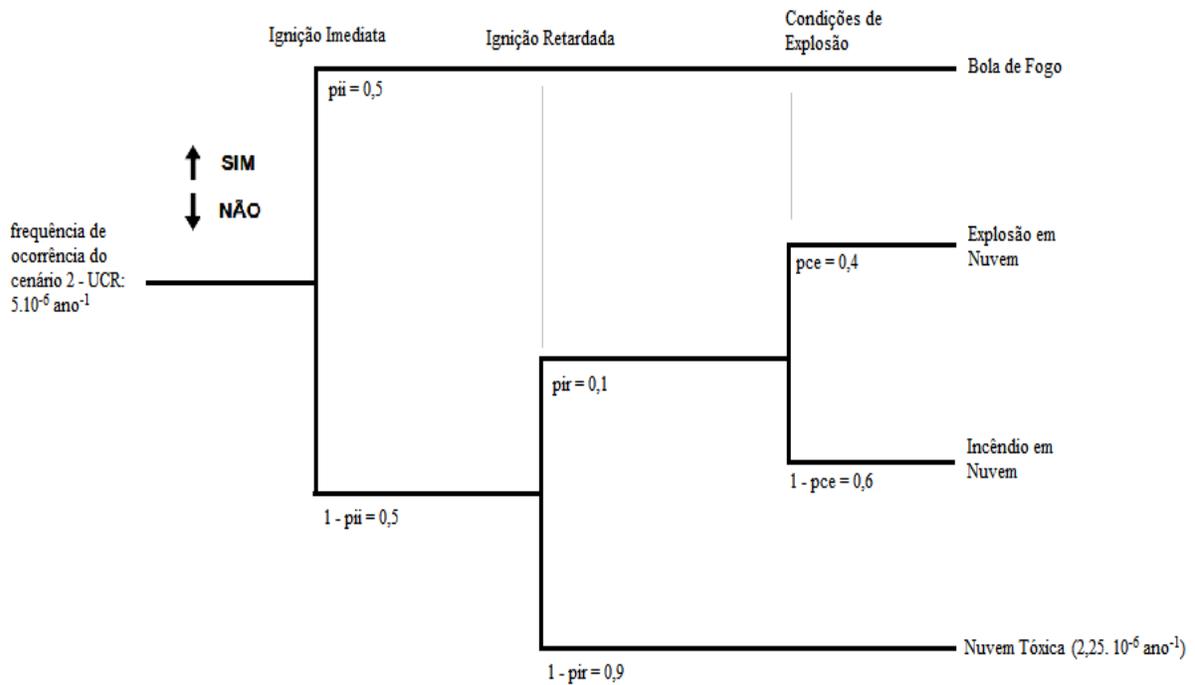
UDA:

Para a UDA, o cenário simulado ocorre a partir do vazamento de sulfeto de hidrogênio de uma tubulação. A frequência inicial de vazamento em tubulação é obtida a partir do *Purple Book* e a frequência final de ocorrência do evento é obtida através das operações matemáticas entre a frequência inicial e as probabilidades de falha de ignição imediata (p_{ii}) e ignição retardada (p_{ir}).



UCR:

A frequência inicial de vazamento é obtida a partir do *Purple Book*, onde foi considerada a frequência de falha em um vaso de reação. A partir disso, pode-se obter a frequência final de ocorrência do evento através da multiplicação da frequência inicial com p_{ii} e p_{ir} .



HDT:

Na HDT, o cenário simulado ocorre a partir do vazamento em um vaso pressurizado e com isso obtém-se a frequência inicial de vazamento no *Purple Book* e a frequência final de ocorrência do evento é obtida seguindo o mesmo raciocínio das unidades anteriores.

