



SELEÇÃO DE ROTAS DE FUGA PARA EVACUAÇÃO DE UMA REFINARIA DE  
PETRÓLEO UTILIZANDO FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE DISPERSÃO DE  
SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Guilherme de Oliveira Ferreira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Rio de Janeiro

Abril de 2016

SELEÇÃO DE ROTAS DE FUGA PARA EVACUAÇÃO DE UMA REFINARIA DE  
PETRÓLEO UTILIZANDO FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE DISPERSÃO DE  
SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Guilherme de Oliveira Ferreira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Examinada por:

---

Prof. Virgílio Jose Martins Ferreira Filho, D.Sc.

---

Prof.<sup>a</sup> Laura Silvia Bahiense da Silva Leite, D.Sc.

---

Prof.<sup>a</sup> Adriana Leiras, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2016

Ferreira, Guilherme de Oliveira

Seleção de rotas de fuga para evacuação de uma refinaria de petróleo utilizando ferramentas de análise de dispersão de substâncias químicas e sistemas de informações geográficas/ Guilherme de Oliveira Ferreira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

X, 111 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Virgílio Jose Martins Ferreira Filho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Produção, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 100-104.

1. Evacuação de área. 2. Roteamento de veículos em situações de emergência. 3. Refinaria de petróleo. I. Ferreira Filho, Virgílio José Martins. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Produção. III. Título.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por todas as oportunidades que me foram concedidas e que me fizeram chegar a este momento. Ele, que me deu sabedoria para ouvir quando, por impulso, queria falar, e fez-me paciente e perseverante nos momentos mais difíceis desta trajetória.

A meus pais Sonia e Wilson e minha irmã Cristiane pelo apoio durante todos estes anos de estudo.

A minha noiva Kelen, pelo carinho e compreensão quando me ausentei devido aos estudos e por estar sempre ao meu lado.

A minha querida amiga Tais Quaresma por sua dedicação e auxílio para a execução deste estudo. E também ao meu amigo Fabini Alvarez por todo apoio que me concedeu desde os primeiros momentos da graduação.

Ao professor e meu orientador Virgílio, pela dedicação e paciência durante o desenvolvimento deste estudo.

A professora Adriana Leiras, que me recebeu com muito entusiasmo como seu aluno na PUC e por toda orientação dada durante minha pesquisa, e por aceitar o convite para fazer parte da banca de avaliação deste trabalho.

A professora Laura Bahiense, por sempre me receber, mesmo que por telefone, quando solicitei e por aceitar participar da banca de avaliação deste trabalho.

A Petrobras pelo apoio financeiro concedido sem o qual esta pesquisa não seria possível.

A todos os professores e funcionários do mestrado em Engenharia de Produção que de alguma forma deram sua contribuição durante este curso.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

SELEÇÃO DE ROTAS DE FUGA PARA EVACUAÇÃO DE UMA REFINARIA DE PETRÓLEO UTILIZANDO FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE DISPERSÃO DE SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Guilherme de Oliveira Ferreira

Abril/2016

Orientador: Virgilio Jose Martins Ferreira Filho

Programa: Engenharia de Produção

Para elaboração de um plano de evacuação em uma indústria química devido a vazamento de substâncias tóxicas é necessário que os gestores conheçam não apenas o número de pessoas presentes na indústria e a geografia do local, mas também a forma como diferentes elementos químicos se comportam quando dispersos pelo ar e qual a extensão da área afetada por vazamento de determinado produto. O presente trabalho tem como objetivo a elaboração de um modelo matemático para determinação de rotas de fuga para colaboradores de uma indústria petroquímica considerando a área afetada pelo vazamento de produtos químicos, utilizando ferramentas de modelagem e análise de dispersão de elementos químicos e Sistemas de Informação Geográficos. O modelo apresentado é construído como um modelo de roteamento em dois estágios utilizando a formulação de fluxo em grafos direcionados. O modelo permite rastreamento das rotas individuais de pessoas que partem de uma determinada unidade produtiva e dos veículos utilizados para evacuação. Por fim, a aplicabilidade do modelo é demonstrada através de estudo de caso de evacuação em uma refinaria de petróleo de grande porte.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ESCAPE ROUTES SELECTION FOR EVACUATION OF AN OIL REFINERY  
USING CHEMICALS DISPERSION ANALYSIS TOOLS AND GEOGRAPHIC  
INFORMATION SYSTEMS

Guilherme de Oliveira Ferreira

April/2016

Advisor: Virgilio Jose Martins Ferreira Filho

Department: Production Engineering

In order to draw up an evacuation plan in a chemical industry is necessary for managers to know not only the number of people in site and the geography of the place, but also how different chemical elements behave when dispersed in the air and the extent of the affected area by leak of a product. This paper aims at developing a mathematical model to determine escape routes for employees of a chemical plant considering the area affected by the spill of chemicals, using modeling and dispersion analysis tools for chemical elements and their related risks. The model is built as a routing model in two stages using the flux formulation for directed graphs. The model allows tracking of individual routes of people in a particular production unit and the vehicles used for evacuation. Lastly, the applicability of the model is demonstrated through a case study of evacuation in a large oil refinery.

## Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVOS .....	3
1.1.1. Objetivo geral .....	3
1.1.2. Objetivos específicos .....	4
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	4
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	6
2.1. GERENCIAMENTO DE DESASTRES .....	6
2.1.1. Definição de desastre.....	6
2.1.2. Ciclo de gerenciamento de desastres .....	7
2.1.3. Desastres industriais .....	26
2.2. LOGÍSTICA HUMANITÁRIA.....	44
2.2.1. Objetivos da logística humanitária .....	44
2.2.2. Características da logística humanitária .....	45
2.2.3. Fatores críticos de sucesso de operações em logística humanitária .....	47
2.3. EVACUAÇÃO DE ÁREA .....	50
2.3.1. Definição .....	50
2.3.2. Revisão de estudos e modelos de evacuação existentes .....	52
3. DEFINIÇÃO DAS ROTAS DE FUGA DA REFINARIA .....	55
3.1. DETERMINAÇÃO DA ÁREA AFETADA PELO VAZAMENTO.....	56
3.2. MODELO MATEMÁTICO .....	57
3.2.1. Estágio 1 – Roteamento de colaboradores aos Pontos de Reunião .....	58
3.2.2. Estágio 2 – Roteamento dos ônibus para evacuação dos PR.....	62
4. EXPERIMENTAÇÃO .....	67
4.1. A REFINARIA .....	67
4.1.1. Colaboradores e Unidades Produtivas .....	67

4.1.2.	Pontos de reunião e suas capacidades.....	68
4.1.3.	Frota de veículos e estacionamentos .....	69
4.1.4.	Saídas da refinaria .....	70
4.1.5.	Vias da refinaria.....	71
4.2.	DEFINIÇÃO DO ACIDENTE E SUAS CONDIÇÕES.....	71
4.2.1.	Condições ambientais e do solo .....	73
4.2.2.	Condições do vazamento .....	74
4.3.	AREAS AFETADAS PELO VAZAMENTO .....	74
4.4.	CARACTERÍSTICAS DE IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO .....	77
4.4.1.	Limitação de memória e utilização de matrizes esparsas .....	77
4.4.2.	Seleção das funções objetivo do segundo estágio .....	77
5.	RESULTADOS OBTIDOS .....	79
5.1.	ROTAS SELECIONADAS PARA EVACUAÇÃO DAS UNIDADES .....	79
5.2.	ROTAS SELECIONADAS PARA EVACUAÇÃO DOS PONTOS DE REUNIÃO ATRAVÉS DE VEÍCULOS.....	83
5.2.1.	Aplicação da primeira parte do segundo estágio do modelo .....	83
5.2.2.	Aplicação da segunda parte do segundo estágio do modelo .....	89
5.3.	RESULTADOS DO SEGUNDO CENÁRIO .....	94
6.	CONCLUSÃO.....	97
7.	REFERÊNCIAS .....	100
	APÊNDICE I.....	105

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo de gerenciamento de desastres .....	8
Figura 2: Fases do ciclo de vida do processo de resposta a desastres .....	24
Figura 3: Exemplo da aplicação das ferramentas ALOHA e MARPLOT para vazamento de propano .....	57
Figura 4: Localização das unidades produtivas da refinaria.....	68
Figura 5: Localização dos pontos de reunião da refinaria .....	68
Figura 6: Localização dos estacionamentos da refinaria .....	70
Figura 7: Localização das saídas da refinaria.....	71
Figura 8: Extensão das áreas de risco para vazamento de benzeno.....	74
Figura 9: Zonas de risco sobrepostas ao mapa da refinaria utilizando MARPLOT .....	75
Figura 10: Arcos (vias) afetados pelo vazamento de H <sub>2</sub> S .....	76
Figura 11: Rota para evacuação da Unidade 12 (em verde claro).....	81
Figura 12: Rota para que o ônibus 2 chegue ao PR 9 para extração dos evacuados (em verde claro).....	88
Figura 13: Rota para que o ônibus 23 saia do PR 4 em direção a saída 7.....	92
Figura 14: Rota para que o ônibus 2 saia do estacionamento 3, passando PR 9 e evacuando pela saída 8 .....	93
Figura 15: Área afetada pelo vazamento de H <sub>2</sub> S no turno da noite.....	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Grandes acidentes na indústria química e de energia entre 1920 e 2013 .....	30
Tabela 2: Grandes desastres industriais ocorridos nos últimos cinco anos .....	35
Tabela 3: Quadro comparativo entre logística empresarial e logística humanitária.....	46
Tabela 4: Exemplos de fatores críticos de sucesso comuns .....	48
Tabela 5: Relação de colaboradores por unidade .....	67
Tabela 6: Relação de PR e suas respectivas capacidades .....	69
Tabela 7: Relação de número de ônibus por estacionamentos .....	69
Tabela 8: Efeitos da exposição ao H <sub>2</sub> S .....	72
Tabela 9: Funcionários de unidades alocados por PR .....	79
Tabela 10: Número de pessoas designadas a cada um dos PR.....	80
Tabela 11: Rotas ótimas para evacuação dos colaboradores de cada unidade .....	82
Tabela 12: Número de veículos necessários para evacuação de cada um dos PR.....	83
Tabela 13: Número de veículos alocados por estacionamento.....	84
Tabela 14: Rotas selecionadas para movimentação dos veículos dos estacionamentos até os PR.....	84
Tabela 15: Número de veículos utilizando as saídas da refinaria.....	89
Tabela 16: Rotas utilizadas pelos veículos para transitar entre os PR e as saídas da refinaria.....	89
Tabela 17: Funcionários de unidades alocados por PR no turno da noite.....	95
Tabela 18: Número de veículos necessários para evacuar cada PR no turno da noite ...	96

## 1. INTRODUÇÃO

No outono de 1987, analistas das bolsas de valores e investidores de todo o mundo se reuniram para ver o anúncio do mais novo presidente da *Aluminum Company of America* – Alcoa – uma das três maiores empresas de alumínio do mundo e criadora do atual processo de fundição de alumínio.

Quando Paul O’Neil assumiu a direção da empresa, a Alcoa encontrava-se em meio a uma grave crise econômica e, por isso, todos investidores esperavam ansiosos por ouvir as propostas de melhoria das vendas e dos lucros da empresa.

Em vez disso, em seu discurso de posse, O’Neil afirmou: “Eu pretendo fazer da Alcoa a companhia mais segura da América e zerar os acidentes”. Isto para época era algo impensável, haja vista que a Alcoa é um gigante da indústria metalúrgica com filiais em todo mundo. Na época havia pelo menos um acidente de trabalho por semana na empresa, e isto era considerado normal, inclusive pelos colaboradores, devido à natureza perigosa do trabalho. (Duhigg, 2012)

Quando questionado sobre impostos ou políticas para aumentar os lucros da empresa, O’Neil se manteve irredutível em focar seu discurso na segurança dos trabalhadores: “Minha meta é **Acidente Zero** (...) Todos merecem sair do trabalho tão ilesos quanto chegaram. Ninguém deveria ter medo de morrer sustentando a família.” (Duhigg, 2012)

Apesar do choque inicial causado por seu discurso, que propiciou uma venda em massa das ações da Alcoa, menos de um ano após a posse de O’Neil os lucros da Alcoa atingiram seu recorde histórico e quando O’Neil anunciou sua aposentadoria, em 2000, o faturamento da empresa era 5 vezes maior do que quando ele assumiu 13 anos antes. (Duhigg, 2012)

Hoje, é mais do que claro para as organizações que a segurança (física e psicológica) de seus colaboradores é um dos principais fatores para aumento da qualidade dos produtos e serviços e da produtividade da empresa, aumentando, conseqüentemente, a sua lucratividade. Por isso, a maioria das empresas investe boa parte de seus recursos para garantir a segurança e o bem-estar de seus trabalhadores.

Esses recursos são ainda maiores em indústrias de base, como metalúrgicas e petroquímicas, cujas normas de segurança são mais rigorosas, uma vez que um erro pode implicar em um acidente de grandes proporções.

Contudo, mesmo com o grande investimento destas empresas em segurança, ninguém está livre de erros ou casualidades, causados por defeitos pontuais ou não conformidades nos processos de produção ou mesmo nas medidas e mecanismos de segurança adotados.

Por isso, é necessário que as empresas estejam sempre preparadas para situações de emergência. Logo, é necessária a elaboração e manutenção de planos bem definidos de contingência e combate à emergência; de auxílio às vítimas e também à sociedade na qual a empresa está inserida; e por fim, de evacuação de um setor ou da empresa como um todo, caso seja necessário.

A pesquisa aqui apresentada encaixa-se neste contexto. É realizada dentro de uma indústria petroquímica de grande porte localizada em território brasileiro, e terá como foco a logística humana em situações de emergência.

Atualmente a empresa objeto de estudo de caso conta com cerca de 4 mil funcionários e uma frota de 70 veículos, abrangendo uma área de aproximadamente 13 km<sup>2</sup>, possuindo 16 unidades produtivas (dentre unidades de transformação de produto e prédios administrativos).

Utilizando-se dos conceitos, algoritmos e técnicas de Pesquisa Operacional, ferramentas de análise de dispersão de produtos químicos e Sistemas de Informações Geográficas a pesquisa apresenta um modelo matemático para otimizar o processo de evacuação da empresa devido ao vazamento de produtos químicos, buscando diminuir o tempo necessário para a completa evacuação da área e aumentar a segurança tanto de trabalhadores quanto de equipes de resgate. O modelo apresentado permite o rastreamento das rotas individuais de veículos e pedestres dentro da rede de vias sem a necessidade de aplicação de algoritmos pós processamento.

Sistemas de Informações Geográficas (GIS) são ferramentas capazes de analisar e apresentar dados em ambientes visuais através de mapas e tabelas digitalizados, auxiliando planejamento e tomadas de decisão baseadas em posicionamento geográfico. Tais ferramentas são comumente utilizadas em diversas etapas do gerenciamento de

desastres naturais em áreas urbanas, como planos de mitigação, resposta e recuperação de áreas afetadas por desastres.

*Softwares* GIS possuem capacidade de modelar e apresentar diferentes cenários para previsão e estimativas do impacto de um desastre. Tais sistemas, aliados a sistemas de análise e simulação de dispersão de substâncias químicas podem ser utilizados para previsão de áreas afetadas por vazamento de produtos tóxicos em indústrias petroquímicas, auxiliando a gestão de emergências não apenas em ambientes urbanos, mas também em ambientes industriais de alto risco.

Desta forma, a pesquisa desenvolvida tem como foco a busca pelas melhores, e mais seguras, rotas para evacuação de cada setor da empresa, levando-se em conta não apenas as menores rotas a partir de cada setor, mas também a geografia da empresa; a velocidade máxima de segurança das vias que os veículos podem trafegar; a capacidade de escoamento do tráfego de cada via; a localização das unidades produtivas e das saídas da empresa; e as possíveis áreas afetadas pelo vazamento após o acidente. Apresenta-se, então uma proposta de melhoria do processo de evacuação de uma empresa petroquímica em situações de emergência, com o objetivo de aumentar a segurança dos trabalhadores e equipes de resgate, minimizando os riscos e o tempo necessário para evacuar a área.

A relevância do tema advém da importância da conservação do bem-estar e da saúde de cada colaborador dentro de uma organização empresarial. Para isso, empresas investem em equipamentos de proteção individual e coletiva, dispositivos e travas de segurança para equipamentos, planos de contingência e combate a emergência e planos de evacuação de área, de modo a assegurar a segurança de seus funcionários diante de situações de risco.

## 1.1.OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo geral

Utilizar-se de técnicas e algoritmos de programação matemática para a seleção de rotas de fuga para auxiliar na elaboração de planos de evacuação de área para diferentes cenários de ameaças em uma refinaria de petróleo de grande porte.

### 1.1.2. Objetivos específicos

- Conceituar gerenciamento de desastres, logística humanitária e evacuação de área.
- Desenvolver um modelo matemático eficiente para seleção de rotas de fuga para evacuação em uma refinaria de petróleo.
- Demonstrar como a utilização de Sistemas de Informações Geográficas e Sistemas de Modelagem de Riscos associados a algoritmos de roteamento e localização pode otimizar o processo de evacuação de uma área exposta a um acidente industrial.

## 1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente estudo se divide em sete capítulos, descritos a seguir.

O primeiro capítulo introduz o trabalho, apresentando o problema a ser estudado, sua justificativa e relevância, bem como seus objetivos gerais e específicos.

O segundo capítulo apresenta uma revisão da bibliografia existente em gerenciamento de desastres e elaboração de planos de evacuação. Inicialmente são apresentadas as definições de desastre e gerenciamento de desastres. Em seguida, faz-se uma breve abordagem a Logística Humanitária. Por fim, são apresentados os conceitos de Evacuação de Área e discutidos alguns dos trabalhos realizados na área que serviram como base para elaboração deste estudo.

O terceiro capítulo define, com detalhes, o problema a ser estudado. São apresentadas as ferramentas ALOHA e MARPLOT utilizadas para determinação da área afetada pelo acidente abordado no estudo. Em seguida, são descritos os modelos matemáticos utilizados para determinação das rotas de fuga para evacuação de colaboradores e veículos.

O capítulo quatro apresenta a implementação do problema e define os objetos do estudo: A refinaria, o acidente simulado e a área afetada por ele. São apresentados os dados relativos à refinaria, como número de colaboradores, Pontos de Reunião, veículos disponíveis para evacuação, etc. São dispostos também os dados relativos ao acidente, como condições ambientais, bem como o elemento químico envolvido e suas

características. Por fim são apresentados alguns detalhes importantes da implementação do modelo proposto.

O capítulo cinco discute os resultados obtidos através da implementação do modelo proposto. Apresenta as rotas utilizadas por colaboradores, pedestres, para dirigirem-se aos Pontos de Reunião e as rotas utilizadas por veículos para fazer a evacuação dos colaboradores dos Pontos de Reunião para cada um dos cenários simulados.

O capítulo seis apresenta as considerações e observações finais relacionadas ao estudo, bem como propostas para trabalhos futuros.

Por fim, o capítulo sete traz as referências utilizadas para realização deste estudo.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1. GERENCIAMENTO DE DESASTRES**

Uma vez que esforços para recuperação e alívio de desastres possuem considerável complexidade e incertezas, eles precisam ser devidamente gerenciados de modo a implantar melhores respostas, o mais rapidamente possível. (Cozzolino, 2012). Por isso o gerenciamento de desastres é um fator chave para o sucesso da execução de operações de ajuda humanitária. (Van Wassenhove, 2006)

Porém, antes de abordar o gerenciamento de desastres, é necessário definir o que é um desastre.

#### **2.1.1. Definição de desastre**

Desastre pode ser definido como “o resultado de eventos naturais ou provocados pelo homem sobre um ecossistema vulnerável, causando danos humanos e/ou ambientais e consequentes prejuízos econômicos e sociais”. (Castro, 2002).

Neste ponto é importante observar que existem muitas definições diferentes para desastre. De fato, Perry e Quarantelli (2005) examinam os diferentes significados da palavra desastre, debatendo o assunto com diferentes pesquisadores, de diferentes nacionalidades e áreas de atuação distintas, cada um apresentando sua definição de desastre e discutindo as definições apresentadas pelos outros pesquisadores. De modo que Shaluf *et al.* (2003) e Perry e Quarantelli (2005), afirmam que a definição de desastre parece depender da ciência que o utiliza.

Porém, Carter (2008), afirma que de forma geral todas as definições refletem as seguintes características de um desastre:

- Perturbação dos padrões de vida de uma sociedade, por vezes de forma severa;
- Efeitos sobre vidas humanas, tais como mortes, ferimentos, disseminação de doenças e fome;
- Efeitos sobre a estrutura, tais como destruição ou danos a construções e interrupção de serviços básicos como comunicação e energia, podendo atingir uma grande área;
- Necessidades da comunidade atingida por assistência social: comida, abrigo, roupas, remédios e serviços médicos.

Considerando a causa e previsibilidade, (Cozzolino, 2012) identifica quatro tipos de desastres:

- Calamidades: desastres naturais e de início súbito, tais como tornados, terremotos e vulcões;
- Ações destrutivas: ações antropogênicas e de início súbito, tais como atentados terroristas e acidentes industriais;
- Pragas: desastres naturais de início progressivo, tais como fome, miséria, secas e epidemias;
- Crises: desastres antropogênicos e de início progressivo, tais como crises políticas e de refugiados.

Calamidades e ações destrutivas requerem alto esforço logístico, tanto em termos de conhecimento quanto de custo, uma vez que desastres de início súbito exigem respostas rápidas nas áreas atingidas. (Cozzolino, 2012). A autora ainda aponta que os quatro tipos de desastres podem ser interligados, uma vez que uma calamidade (como a Tsunami que atingiu a Indonésia e diversas ilhas no oceano Índico em 2004) pode provocar pragas (como doenças) e crises (econômica e política).

Por fim, é importante ressaltar que diferentes tipos de desastres devem ser abordados de maneira diferente: as necessidades de uma região afetada por um desastre natural são muito diferentes da assistência fornecida a um campo de refugiados de uma região em conflito, por exemplo. (Kovács e Spens, 2007).

O foco deste trabalho é o gerenciamento de ações destrutivas, mais precisamente de acidentes industriais. Porém, embora cada tipo de desastre possua suas particularidades, todos possuem características semelhantes e, por isso, possuem estrutura de gerenciamento semelhante. (Carter, 2008; Kovacs e Spens, 2007; Cozzolino, 2012). Tal estrutura será abordada posteriormente neste trabalho.

### **2.1.2. Ciclo de gerenciamento de desastres**

Gerenciamento de desastres pode ser definido como a ciência que busca, através da observação sistemática e análise dos desastres, desenvolver e melhorar medidas relativas à prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação dos efeitos de um desastre (Carter, 2008).

Estas atividades não podem existir de maneira isolada, de modo que as ações de recuperação devem, sempre que possível, abranger a elaboração de novas medidas de prevenção em áreas sensíveis a novos impactos (Carter, 2008; Shadeck *et al.*, 2013). Por isso, os autores apresentam o conceito de ciclo de gerenciamento de desastres, que indica que o gerenciamento de desastres é um contínuo de atividades interligadas e não uma série de etapas que se iniciam e se encerram a cada impacto. A Figura 1 a seguir apresenta o ciclo de gerenciamento de desastres proposto pelos autores:



Figura 1: Ciclo de gerenciamento de desastres

Fonte: adaptado de Carter (2008)

É importante ressaltar ainda que não existem fronteiras específicas (físicas ou temporais) entre as etapas do ciclo de gerenciamento de desastres. As etapas do ciclo se sobrepõem, de modo que algumas ações são comumente apresentadas em mais de uma etapa do ciclo. (Tabbara, 2008).

As atividades do Ciclo de Gerenciamento de Desastres serão detalhadas a seguir:

#### 2.1.2.1. Prevenção

A etapa de prevenção aborda medidas que tem como objetivo prevenir a ocorrência de um desastre e/ou prevenir que tal ocorrência tenha um efeito nocivo à comunidade atingida. (Carter, 2008).

Esta etapa é desenvolvida anteriormente ao desastre. Sua elaboração é fundamentada em estudos sobre riscos estimados e registros históricos sobre eventos no local, uma vez que não existe risco real iminente. (Shadeck, *et al.*, 2013).

Ainda Segundo Shadeck, *et al.*, (2013) as ações de prevenção se dividem em duas frentes: Avaliação de riscos de desastres e Redução de riscos de desastres.

A etapa de avaliação de riscos tem como objetivo identificar e avaliar todos os eventos potencialmente perigosos para a vida humana e para a estrutura de uma determinada área. Para isso, é importante ressaltar a necessidade da criação de um mapa de riscos do local. Este mapa deve identificar de forma quantitativa e qualitativa os riscos existentes no local analisado. Fatores como magnitude, frequência, duração, alcance e velocidade de um possível impacto devem estar descritos no mapa de riscos. Além disso, é importante registrar indicadores demográficos e socioeconômicos da região, tais como idade média da população, distribuição e densidade da população, etc. Para mapear um risco de inundação, por exemplo, devem estar presentes no mapa indicadores como profundidade máxima possível da inundação, força da correnteza, duração média da inundação, nível de poluição das águas, registros históricos de precipitação, etc.. Tais indicadores auxiliam a ter uma visão geral de um possível cenário caso o evento ocorra e como combatê-lo, caso necessário. (Weichselgartner, 2001).

Já a etapa de redução de riscos de desastres visa minimizar as vulnerabilidades das áreas estudadas. Isto é atingido, por exemplo, através do planejamento da ocupação do espaço geográfico em função dos riscos conhecidos (e mapeados na etapa de avaliação de riscos) e programas de conscientização da população sobre os riscos existentes. Além de medidas estruturais, tais como obras de contenção de encostas e piscinões para armazenamento de água da chuva. (Shadeck *et al.*, 2013).

Um dos maiores problemas da etapa de prevenção é o elevado custo que algumas medidas preventivas podem ter (tais como construção de diques para evitar alagamentos ou reforço da estrutura de edifícios para suportar abalos sísmicos) fazendo com que sua execução seja descartada, muitas vezes antes de uma análise detalhada da relação custo-benefício e dos riscos existentes no local. (Carter, 2008).

Carter (2008) ainda aponta outros problemas relativos à implantação de medidas de prevenção de desastres em uma comunidade, dentre eles:

- Crescimento desordenado da população, que empurra comunidades para áreas de risco, tais como encostas de morros e entorno de aeroportos;
- Aspectos políticos, uma vez que algumas medidas de prevenção podem atrapalhar os interesses políticos de determinados setores do governo e empresas privadas. Por exemplo, obrigar a mudança de pessoas que vivem em área de risco pode causar mal estar com políticos regionais.
- A apatia de uma comunidade frente aos riscos de desastres pode significar pouca ou nenhuma pressão sobre os governos para implantar medidas de gerenciamento de desastres, principalmente medidas de prevenção.

É consenso entre pesquisadores que ameaças apresentam caráter extremamente dinâmico. Níveis de precipitação, por exemplo, oscilam em torno de um valor médio, podendo haver valores muito abaixo ou valores muito acima do esperado. Por isso, ameaças devem ser constantemente monitoradas, pois sempre existe a possibilidade de que tais ameaças assumam patamares que apresentem risco real de desastre a uma comunidade. (Shadeck *et al.*, 2013).

Neste contexto, é essencial o estabelecimento e manutenção de um Centro de Gerenciamento de Desastres, que tem como principal objetivo identificar o avanço de ameaças e apontar se tais ameaças representam ou não risco de desastre e, conseqüentemente, apontar a necessidade da criação de novas medidas preventivas. (Carter, 2008; Shadeck *et al.*, 2013).

Além disso, Centro de Gerenciamento de Desastres deve garantir que revisões pós-desastres sejam realizadas após o impacto de um desastre. Esta revisão deve incluir os resultados do desastre (por exemplo, número de feridos e desabrigados), bem como o desempenho das medidas preventivas adotadas e, caso necessário, a identificação da necessidade de adoção novas medidas preventivas. Também é responsabilidade do Centro informar aos governos as necessidades de medidas preventivas e priorizar sua execução. (Carter, 2008).

#### 2.1.2.2. Mitigação

Sabendo que uma prevenção total contra desastres em um ambiente é inatingível, as ações de mitigação têm como objetivo minimizar a magnitude de impactos sofridos por

uma área ou comunidade durante um desastre. (Weichselgartner, 2001; Shadeck *et al.*,2013).

Isto é feito através da identificação das áreas que estão sujeitas a danos em potencial e da magnitude de um possível impacto e, com isso, identificar quais ações devem ser tomadas para minimizar tais danos. (Weichselgartner, 2001).

Fortalecimento de estruturas para resistir aos impactos de inundações, terremotos, etc.; planejamento da ocupação urbana e controle de acesso a áreas de risco; criação de diques para evitar alagamentos em cidades abaixo do nível do mar e plantação de certas espécies de legumes e verduras resistentes a determinado tipo de desastre podem ser consideradas medidas comuns de mitigação de impactos de desastres. (Carter, 2008).

É importante observar que muitos dos fatores e atividades que se aplicam a prevenção também se aplicam a mitigação de impactos de desastres. (Carter, 2008).

Carter (2008) aponta as principais necessidades para o estabelecimento de uma política de mitigação de desastres eficiente. Dentre eles pode-se destacar:

- Avaliação e monitoramento adequados dos riscos e vulnerabilidades das áreas estudadas;
- Monitoração e avaliação contínua das medidas de mitigação, de modo que possam responder rapidamente a mudanças nos padrões de risco, vulnerabilidades e/ou recursos disponíveis.
- Consideração apropriada dos planos de mitigação nos planos de desenvolvimento de um país, ou região, incluindo a análise das relações custo-benefício, imediatas e em longo prazo, de possíveis medidas adotadas;
- Programas de educação e conscientização da população local;
- Suporte a medidas de mitigação comumente utilizadas, onde estas devam ser utilizadas;
- Suporte ao desenvolvimento do sentimento de autoajuda dentro das comunidades vulneráveis através da criação de forças tarefa dentro das comunidades para auxiliar a população na ocorrência de um desastre.

Dadas as principais necessidades de programas de mitigação, Carter (2008) divide os principais componentes de um programa de mitigação de desastres em duas frentes:

mitigação não estrutural e mitigação estrutural, exemplos de ambas as frentes são abordados a seguir.

#### *Componentes de mitigação não estrutural*

- Estrutura legal:

De forma geral, legislações relacionadas a desastres não dão ênfase suficiente a ações de mitigação. Por isso, uma revisão de tais legislações se faz necessária para garantir que as necessidades de mitigação de desastres sejam devidamente atendidas. Regulamentação de uso de terras, para agricultura e moradia, e códigos de construção civil, por exemplo, fornecem uma base legal para o sucesso de um programa de mitigação.

- Incentivos:

Incentivos são mais atrativos para as comunidades do que imposições legais. Subsídios e garantias do governo (tais como redução de impostos e redução do valor de seguros) podem convencer indústrias e comunidades a implantar medidas de mitigação em suas plantas e construções.

- Treinamento, educação e conscientização:

As necessidades de um programa de mitigação devem ser bem conhecidas e entendidas. Por isso existe a necessidade de treinar e educar todos os envolvidos no processo seja governo, construtores, empresas ou o público em geral. De modo que, programas de treinamento e educação são essenciais para que programas de mitigação sejam bem implantados em uma comunidade.

- Sistemas de alerta:

A capacidade das autoridades de alertar eficientemente sua população de um desastre iminente tem aumentado significativamente. Porém, a evacuação de uma área só deve ser determinada se um impacto for praticamente certo, uma vez que uma evacuação forçada de uma comunidade a respeito de um desastre que não aconteça diminui a confiança da população nos sistemas de alerta e pode arruinar anos de planejamento e preparação.

- Medidas de mitigação agrícola:

Várias medidas podem ser aplicadas às plantações para mitigar o impacto de um desastre, tais como: plantação de árvores e arbustos a barlavento para diminuir os efeitos de ventanias sobre a plantação; diversificação da plantação; ajustar o ciclo de plantio e colheita das plantações para evitar que sejam afetadas por desastres cíclicos conhecidos, tais como alagamentos em regiões mais suscetíveis; e programas de armazenamento de comida e sementes para garantir que o fornecimento não seja interrompido em caso de desastre.

#### *Componentes de mitigação estrutural*

- Estruturas formais de engenharia:

Estruturas de engenharia envolvem a participação de engenheiros e arquitetos durante a fase de desenvolvimento e construção. Embora profissionais sejam treinados para desenvolver e supervisionar construções de modo a satisfazer certos níveis de segurança, eles precisam de um treinamento mais específico de como implantar práticas de mitigação em seus projetos de modo a construir estruturas resistentes ao impacto de desastres, tais como abalos sísmicos, tempestades, inundações, etc.

- Estruturas informais de engenharia:

São aquelas estruturas construídas pelos próprios donos de propriedade ou carpinteiros locais, que geralmente não possuem treinamento formal. Tais estruturas geralmente são pequenas residências ou abrigos construídos com materiais locais. Durante desastres, grande parte das casualidades é causada devido ao desabamento destas estruturas.

Por isso, um aspecto importante para aumentar a segurança destas estruturas é garantir que não sejam construídas em locais de risco, tais como encostas sujeitas a deslizamentos ou áreas sujeitas a alagamentos. Além disso, a substituição destas construções por construções de engenharia deve ser realizada, sempre que seja economicamente viável, e quando não for, devem-se introduzir medidas de mitigação formais nas construções informais, de modo a aumentar sua segurança.

Além disso, um programa de mitigação de danos não pode ser eficientemente implantado sem a participação ativa da comunidade. Por isso, medidas de mitigação de desastres devem ser incluídas como parte do programa de desenvolvimento socioeconômico das áreas vulneráveis (Newport e Jawahar, 2003).

Por isso, as atividades de mitigação de desastres devem ser vistas como mais que um processo biofísico, mas também como um processo social, onde grupos sociais nas comunidades vulneráveis devem se organizar para debater seus problemas e necessidades comuns frente à possibilidade de desastres, de modo a buscar soluções com os recursos disponíveis. Porém, para que a participação da comunidade seja realmente efetiva, existe a necessidade de educação e conscientização para a vulnerabilidade, tanto por parte da comunidade quanto do governo local e do público em geral. (Weichselgartner, 2001; Newport e Jawahar, 2003).

Por fim, medidas de mitigação e prevenção podem ser introduzidas dentro das etapas de preparação e de reconstrução de uma localidade atingida por um desastre, ressaltando o aspecto cíclico das atividades de Gerenciamento de Desastres. (Carter, 2008; Shadeck *et al.* 2013).

#### 2.1.2.3. Preparação

Dada a recorrência ou a previsibilidade de desastres em determinadas áreas, o tema preparação para desastres deve ser a pedra angular para atividade de ajuda humanitária e deve ser focado em desenvolver a habilidade de responder de forma rápida e apropriada ao impacto de um desastre (Newport e Jawahar, 2003).

A etapa de preparação corresponde às operações realizadas antes do impacto do desastre, e reúne estratégias que permitem a implantação de uma operação de resposta a desastres eficiente. (Cozzolino, 2012).

A preparação para um desastre depende diretamente da geografia do local vulnerável e dos possíveis riscos no local, podendo assim assumir diversas formas distintas. (Kovács e Spens, 2007). Porém Shadeck *et al.* (2013) destacam que alguns fatores comuns devem ser considerados durante a fase de preparação para qualquer desastre, tais como:

- Coordenação das equipes de auxílio e resgate;
- Sistemas de informação e comunicação;

- Sistemas de alerta de desastres e elaboração de medidas de precaução após o recebimento do alerta, como a criação de planos de evacuação e abrigos para a população;
- Conscientização, mobilização e treinamento da população das áreas vulneráveis e das equipes de resposta à emergência, tais como corpo de bombeiros e Polícia Militar.

Tais fatores serão abordados a seguir:

#### *Coordenação das equipes de auxílio e resgate*

Medidas de prevenção e mitigação, em sua maioria, tendem a ser executadas e coordenadas pelos diversos níveis de governo dentro de uma localidade. Medidas de preparação, porém, tendem a ser orientadas a ações de organizações individuais (Carter, 2008).

Porém, nenhuma organização consegue suprir as necessidades de uma comunidade atingida por um desastre sozinha. De modo que, o grande número de organizações necessárias e envolvidas na preparação para desastres evidencia uma maior necessidade de coordenação entre organizações durante a etapa de preparação do que as etapas de prevenção e mitigação (Gustavsson, 2003).

A coordenação dos diferentes atores envolvidos em uma situação de desastre (corpo de bombeiros, Polícia Militar, agências governamentais, etc.), cada um com procedimentos e formas de agir próprios, pode se tornar difícil em meio a uma situação de crise. A falta de coordenação pode gerar informações desencontradas e dificultar os trabalhos de resgate. Por isso, é durante a fase de preparação que os atores envolvidos no gerenciamento de desastres devem desenvolver uma plataforma de colaboração para momentos de crise, como por exemplo, o Centro Comum de Logística das Nações Unidas (UNJLC, sigla em inglês para *United Nations Joint Logistics Centre*), que deverá ser responsável pela coordenação dos trabalhos durante a crise. (Kovács e Spens, 2007).

#### *Sistemas de informação e comunicação*

Pesquisa realizada por Thomas e Kopczak (2005), do *Fritz Institute*, com as organizações que trabalharam no resgate e auxílio às vítimas e recuperação local após o

Tsunami de 2004, que atingiu a Indonésia (e outras ilhas no Pacífico), revela que embora 72 % das organizações afirmarem possuir processos que permitam a elaboração de planos de ação para situações de emergência, 50 % das organizações admitiram que seus planos de ação originais para gerenciamento de desastres não eram precisos, prejudicando sua capacidade de avaliação dos impactos do tsunami e mobilização dos recursos necessários. Além disso, apenas 33 % dos profissionais logísticos que atuaram no auxílio às vítimas do desastre afirmaram que os planos de ação foram executados conforme o planejado. O instituto atribui estes resultados a particularidade do desastre e, principalmente, a problemas nos processos de comunicação utilizados.

Com isso, torna-se claro que durante a preparação para desastres são necessários métodos para identificar, avaliar e monitorar ameaças de desastres em determinadas áreas, de forma mais precisa possível. Para isso, várias tecnologias e sistemas de apoio à decisão têm sido desenvolvidos. (Silva, 2001; Carter, 2008). Tais sistemas têm como objetivo possibilitar uma previsão razoavelmente confiável dos efeitos de um desastre sobre uma área. Estes efeitos são a maior preocupação da preparação para um desastre, uma vez que constituem as reais circunstâncias, eventos e problemas para o qual preparação deve ser feita (Carter, 2008). Tais efeitos incluem:

- Casualidades;
- Destruição da infraestrutura;
- Interrupção dos serviços básicos;
- Perdas econômicas.

Desta forma, um fator importante para os esforços em preparação para um desastre são os sistemas de informação adotados. Pesquisadores necessitam de informações precisas para a criação de cenários de desastres realísticos sobre os quais possam desenvolver planos de evacuação ou desenvolver procedimentos de compra emergenciais para suprimentos. (Long, 1997; Silva, 2001). Desta forma, o sucesso da preparação das operações de resgate em um desastre depende, em grande parte, do sucesso dos sistemas de informação adotados. (Long, 1997).

Além disso, Long (1997) ressalta que em uma situação de crise, o conceito sistema de informação não pode ser utilizado somente para aplicações em tecnologia da informação, como é feito normalmente em uma organização empresarial. A definição dos meios de comunicação a ser utilizados pelas equipes de resgate no local do desastre

é fundamental para que as informações trafeguem de forma confiável e o mais rápido possível pela cadeia de suprimentos e de assistência. O autor destaca que a utilização de meios de comunicação por satélite, como telefones, é mais eficiente do que relatórios escritos, pois são lentos, ou aparelhos telefônicos ou celulares convencionais, que dependem da disponibilidade da infraestrutura local, que pode estar danificada.

### *Sistemas alerta*

Sistemas de alerta tem como objetivo informar e proteger o público de um desastre iminente. Isto é feito através da combinação de sistemas de detecção e monitoramento científicos, fatores sociais e componentes de comunicação e notificação do público. (Collins e Kapucu, 2008).

Sistemas de alerta desempenham um papel crucial dentro do gerenciamento de desastres, uma vez que representam o elo entre as medidas de preparação para um desastre e as ações de resposta a um desastre. (Carter, 2008). Do ponto de vista de preparação para desastres, o autor destaca os seguintes aspectos de um sistema de alertas eficiente:

- Sistemas e procedimentos de alerta devem estar devidamente documentados em planos e padrões de procedimentos de emergência;
- Sistemas de alerta devem ser bem entendidos e conhecidos por todos os envolvidos em situações de emergência, tais como organizações governamentais, organizações humanitárias, militares, e público em geral;
- Sistemas de alerta devem possuir redundância, para o caso de um dos componentes do sistema falhar;
- O público e as organizações devem possuir meios adequados de receber alertas e saber exatamente quais ações tomar a partir do recebimento do alerta;
- Todos os procedimentos e planos de resposta devem estar de prontidão para reagir a um alerta. Além disso, devem ser funcionais para situações de emergência onde não existe a possibilidade de alarmes antecipados, como terremotos e ataques terroristas.
- Todos os componentes de um sistema de alarme devem ser periodicamente testados, de modo a garantir seu funcionamento adequado quando for realmente necessário.

Após o Tsunami de 2004, ficou evidente para pesquisadores que é necessário, também, ser capaz de alertar a população transiente no local (visitantes e turistas), da iminência de um desastre. Turistas geralmente possuem pouco ou nenhum conhecimento dos riscos do local, o que implica que eles estão sujeitos a maior desorientação na ocasião de um desastre. Por isso, hotéis, motéis e agências de turismo devem arcar com o treinamento e com a conscientização de seus funcionários e, principalmente, de seus clientes, quando expostos a um local de risco. Além disso, devem se integrar com os operadores dos sistemas de alarme locais, de modo a possuírem a capacidade de alertar e assegurar a segurança seus clientes. (Johnston *et al.*, 2007).

É importante observar que medidas de precaução tomadas após o recebimento do alerta variam em diferentes situações e em diferentes tipos de desastres, por isso é de responsabilidade das autoridades definir e aplicar as medidas que melhor se aplicam a cada situação.

#### *Conscientização, mobilização e treinamento.*

Um público informado e consciente é o bem mais valioso de uma preparação para desastres. Programas de conscientização da população podem ser apresentados de várias formas. Eventos como um Dia Nacional de Prevenção de Desastres podem ser implantados, auxiliando a manter a consciência e alerta de uma população vulnerável. Além disso, a inclusão de conscientização para desastres em currículos escolares destas comunidades produz resultados efetivos em longo prazo. (Carter, 2008).

Como parte das atividades de mobilização e treinamento as comunidades devem elaborar um plano de contingência local. Um plano de contingência local é uma lista de atividades que os habitantes concordam em realizar para evitar perda de vidas e danos à estrutura local. O plano deve conter uma descrição detalhada da comunidade vulnerável, (incluindo aspectos sociais e recursos disponíveis), detalhes dos possíveis riscos no local e estratégias para minimização de riscos através da participação da comunidade. (Newport e Jawahar, 2003).

Newport e Jawahar (2003) ainda ressaltam a importância da criação de uma força tarefa de combate a efeitos de um desastre dentro da comunidade, compostas pelos jovens mais ativos. Membros da força tarefa devem ser divididos em subgrupos com tarefas e responsabilidades específicas durante a preparação para um desastre, durante o desastre

e após o desastre. Tais tarefas devem incluir: Patrulhamento e alerta de possíveis desastres; gerenciamento de abrigos; auxílio durante a evacuação dos locais atingidos; aplicação de primeiros socorros; e limpeza da comunidade após o desastre. Membros da força tarefa devem ser treinados em procedimentos pré e pós-desastres, de modo a aumentar suas habilidades para cumprir as tarefas a eles atribuídas. Detalhes do funcionamento das forças tarefas devem ser enviados a departamentos formais de administração pública, para que possam ser efetivamente utilizados durante situações de desastre. Além disso, forças tarefas podem ser utilizadas para conscientizar e treinar a comunidade através da demonstração de técnicas e procedimentos que devem ser seguidos durante situações de crise.

Além disso, é fundamental a existência de exercícios de simulação de resposta a desastres periódicos para preparação da população afetada e para sua conscientização sobre os riscos existentes no ambiente em que estão inseridos. Estes exercícios são importantes, também, para a preparação e treinamento das equipes de resgate que atuarão no local atingido, além de possibilitar uma análise de desempenho das equipes, como, por exemplo, dimensionamento do tempo de resposta à emergência ou tempo necessário para a evacuação de uma determinada área (Shadeck *et al.*, 2013).

#### 2.1.2.4. Resposta

Esta etapa se inicia no momento do impacto do desastre. Aqui são desenvolvidas as atividades de socorro às vítimas, tais como evacuação e atendimento médico a população necessitada. (Shadeck, *et al.*, 2013).

Os maiores problemas da fase de resposta são a coordenação do envio de suprimentos as vítimas, a imprevisibilidade da demanda e o transporte dos suprimentos até as vítimas no local atingido. (Long, 1997). Isto por que a natureza da maior parte dos desastres demanda ação imediata, fazendo com que a cadeia de suprimentos seja iniciada mesmo sem haver conhecimento total da situação corrente da área afetada (Kovács e Spens, 2007).

Segundo Ernst (2003), existe três processos principais distintos em logística empresarial: Gerenciamento de demanda; Gerenciamento de suprimentos e; Gerenciamento de execução. Atores envolvidos na cadeia de suprimentos humanitária não são os mesmos dos atores envolvidos na cadeia empresarial. Fornecedores,

geralmente doadores, não estão diretamente interessados em satisfazer a demanda e consumidores, as vítimas assistidas, não geram demanda de forma voluntária e espera-se que não gerem a mesma demanda novamente. Porém, para o autor, o fluxo básico de bens, informações e finanças são os mesmos. Por isso, Kovács e Spens (2007) relacionam os três processos fundamentais da logística empresarial com a fase de resposta a desastres da logística humanitária:

#### *Gerenciamento de demanda*

A demanda em locais atingidos por desastres é, geralmente, imprevisível em relação à quantidade de suprimentos necessários, ocorrem em intervalos de tempo irregulares, e sua localização é completamente incerta até que a demanda ocorra. (Long, 1997; Balcik e Beamon, 2005; Murray, 2005).

Além disso, a falta de informações durante as primeiras horas após o impacto do desastre faz com que suprimentos doados sejam enviados indiscriminadamente ao local, gerando alto tráfego de veículos, pessoas e suprimentos nas proximidades do local e obstruindo o trabalho das equipes de resgate. Somente após obtenção de dados mais precisos com relação ao desastre é que as necessidades das vítimas são identificadas permitindo que os suprimentos sejam encaminhados de forma adequada aos locais onde são necessários. (Long e Wood, 1995; Kovács e Spens, 2007).

Por este motivo, Hoffman (2005) descreve a cadeia de suprimentos de logística humanitária como sendo a mais dinâmica do mundo. Para o autor, para se estabelecer um sistema logístico em situações de desastres são necessários gestores para atuar nas localidades atingidas, de modo a organizar estoques de suprimentos, identificar necessidades e prioridades da população e direcionar e rastrear o tráfego de bens e serviços até as localidades.

#### *Gerenciamento de suprimentos*

Frequentemente, agências de ajuda humanitária e autoridades recebem doações de suprimentos não solicitados e, muitas vezes, não desejados, tais como alimentos e remédios com prazos de validade vencidos, aparelhos eletrônicos em regiões cuja estrutura está destruída, ou roupas sujas e/ou rasgadas. Doações não desejadas tornaram-se tão comuns que equipes de ajuda humanitária passaram a portar incineradores para destruir itens considerados perigosos, inúteis ou redundantes que

estejam sobrecarregando a cadeia de suprimentos (Murray 2005). Holguín-Veras *et al.*, (2014) abordam profundamente o problema gerado por doações inapropriadas em locais atingidos por desastres.

Mesmo itens solicitados e necessários podem gerar problemas, pois podem chegar ao local do acidente de maneira pouco manuseável, por isso Murray (2005) aponta para a necessidade de que os pacotes com doações sejam pequenos em tamanho e peso, de modo que uma pessoa consiga manusear, pois muitas vezes equipamentos para descarga de materiais não estão disponíveis nos locais afetados. Além disso, como suprimentos podem ser originados de diversas partes do mundo, itens podem ser embalados e rotulados de diversas formas e em linguagens distintas. Sendo assim, agências de ajuda humanitária passaram a utilizar um sistema de codificação dos rótulos dos itens por cores, como por exemplo, azul para roupas e vermelho para alimentos (Murray 2005).

Agências de ajuda humanitária geralmente contam com o suporte de redes varejistas locais para gerenciamento dos suprimentos em situações de crise. (Murray 2005). Por vezes, as redes varejistas são as primeiras a prestar socorro às vítimas em regiões afetadas por desastres, uma vez que possuem custos de aquisição, transporte e armazenamento reduzidos por já terem estruturas para este fim, além de, na maioria dos casos, possuírem alimentos suficientes para satisfazer a dieta da população local por alguns dias (Kovács e Spens, 2007).

A utilização de sistemas de informação também se destaca durante o gerenciamento de suprimentos em uma situação de crise. Várias agências humanitárias, bem como institutos de pesquisa, estão desenvolvendo aplicações para gerenciar os suprimentos recebidos durante situações de crise. Tais aplicações têm como objetivo: rastrear doações desde o doador até o local do acidente; eliminar redundâncias e identificar a real necessidade da população afetada; apresentar catálogos de itens necessários para compra através de páginas de internet; e permitir troca de informações sobre suprimentos necessários entre várias organizações humanitárias (Hoffman, 2005; Murray, 2005; Kovács e Spens, 2007).

### *Gerenciamento de execução*

O gerenciamento de execução envolve ações de transporte, distribuição dos suprimentos necessários até os usuários finais, bem como seu armazenamento e acondicionamento (O'Leary, 2004).

Alguns dos principais problemas encontrados nesta etapa envolvem a falta de equipamentos para descarga de materiais e Infraestrutura local danificada ou destruída (Murray, 2005). A disponibilidade de combustível na área atingida também é um fator relevante a ser considerado durante a execução de missões de resgate, uma vez que a falta de combustíveis pode fazer com que equipamentos e veículos de resgate deixem de funcionar (Kovács e Spens, 2007).

Além disso, Kovács e Spens (2007) apontam a falta de energia como um dos principais entraves às ações humanitárias no local do desastre. Alguns alimentos e remédios distribuídos à população necessitam ser mantidos em um ambiente com temperatura controlada para sua segurança e higiene, e a falta de energia no local dificulta seu acondicionamento apropriado.

Por isso, Kaatrud *et al.* (2003) propõe uma lista de verificação para auxiliar gestores a identificar a situação no local do desastre e planejar a execução das operações de resgate. Dentre os itens propostos encontram-se verificações da situação e disponibilidade da infraestrutura e serviços no local, tais como disponibilidade de portos, aeroportos, equipamentos de descarga nos portos e aeroportos, frota de veículos, ferrovias, armazéns e combustível. Encontra-se, também, verificações sobre a situação da acessibilidade ao local, como necessidade de visto para entrada de trabalhadores e voluntários no país e procedimentos de liberação alfandegária dos suprimentos emergenciais necessários. Além disso, *Sphere Project* (2004) elaborou um Acordo Humanitário, apresentando as necessidades mais básicas para manter a vida e a dignidade de populações atingidas por desastres. O documento aborda o comprometimento que organizações de ajuda humanitária devem ter com o fornecimento padrões mínimos de qualidade aceitáveis de água, higiene, abrigos, serviços de saúde, alimentação e nutrição no local do impacto.

O maior desafio para os profissionais logísticos trabalhando no local do desastre é o que os estudiosos de logística humanitária chamam de *Last Mile* - a última milha (Murray,

2005). Ao se aproximar do local do desastre, estradas podem estar destruídas, lameladas ou alagadas. Em zonas de conflito, rebeldes podem tentar impedir a passagem de suprimentos (Murray, 2005; Pettit e Beresford, 2009). De modo que a entrega de suprimentos nestes locais por vezes precisa ser feita por veículos menores capazes de lidar com terrenos irregulares, botes ou mesmo veículos de tração animal em regiões montanhosas. Além disso, os carregamentos de suprimentos precisam ser menores, aumentando consideravelmente os custos relacionados ao transporte (McClintock, 2009).

Durante a Guerra do Golfo Pérsico, o exército iraquiano isolou um grupo de refugiados curdos em uma região montanhosa no norte do Iraque, onde foram abandonados. O exercito americano designou um grupo de especialistas logísticos para fornecer suporte ao resgate dos refugiados. O maior desafio encontrado pelo exército americano foi de encontrar um ponto de entrada para os suprimentos e equipamentos necessários ao resgate dos refugiados, uma vez que a infraestrutura local estava destruída. Foi necessário que um trator subisse a montanha para abrir uma área de pouso improvisada para que helicópteros, contendo comida e suprimentos aos refugiados, pudessem descer enquanto as estradas estavam sendo reparadas para que caminhões e ônibus pudessem fazer a extração dos refugiados do local. (Long, 1997).

Segundo Beamon (2005) quatro fases podem ser identificadas durante o ciclo de vida do processo de resposta a um desastre, bem como a quantidade de recursos empregados por cada uma delas: Avaliação, desenvolvimento, sustentação e reconfiguração. A fase de *avaliação* corresponde à identificação dos recursos e suprimentos necessários através da análise das características do desastre. Durante a fase de *desenvolvimento* a utilização de recursos aumenta de modo a atingir as necessidades da população da área afetada. Durante a fase de *sustentação*, a utilização dos recursos se mantem constante enquanto durarem as operações de resgate e assistência no local. Por fim, durante a fase de *reconfiguração* as operações são reduzidas gradativamente, e conseqüentemente os recursos utilizados, até que sejam completamente terminadas, ao final das operações de resgate. O gráfico apresentado na Figura 2 representa as fases do ciclo de vida do processo de resposta a um desastre.

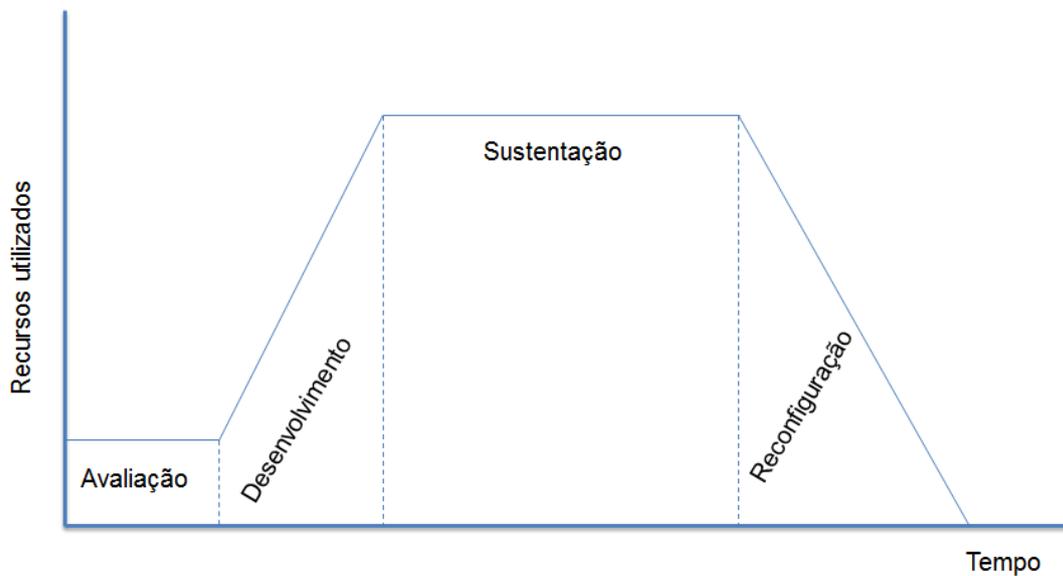


Figura 2: Fases do ciclo de vida do processo de resposta a desastres

Fonte: Adaptado de Beamon (2005)

Governos e organizações de ajuda humanitária vivenciarão este ciclo toda vez que responderem a um desastre. (Beamon, 2005). A autora ressalta ainda que após o ciclo de *reconfiguração* de uma missão de resposta uma nova etapa de *desenvolvimento* pode se iniciar, relativa às ações de recuperação do local atingido.

Neste ponto vale-se ressaltar a importância dos projetos desenvolvidos na fase de preparação, pois é nesta etapa em que as ações discutidas e programadas na fase de preparação são postas em prática. É fundamental que as equipes de resgate estejam de prontidão e devidamente treinadas para o cenário que irão enfrentar no local do desastre, e que a estrutura de resgate esteja preparada para o atendimento da população, permitindo que esta seja rapidamente assistida, de modo que as vítimas sejam socorridas e população devidamente amparada no menor tempo possível.

#### 2.1.2.5. Recuperação

É nesta etapa que se realizam as ações de reabilitação do local do desastre, tais como limpeza, descontaminação e remoção de escombros (se houverem) das áreas atingidas. É nesta etapa, também, que as estruturas de resgate provisórias (caso necessárias) devem ser desmontadas (Shadeck *et al.*, 2013).

Em seguida, são realizadas as ações de reconstrução da localidade, restituindo serviços públicos, reestabelecendo o comércio e economia da localidade e recuperando a infraestrutura do local (reconstrução de casas, prédios, unidades produtivas, vias danificadas, etc.). Além da reabilitação do meio ambiente local (fauna e flora) (Shadeck *et al.*, 2013).

Um desastre pode, ainda, ter consequências em longo prazo sobre uma região e sua economia, como por exemplo, paralização de portos e destruição de estradas e ferrovias e destruição da indústria local. (Kovács e Spens, 2007), podem produzir impactos políticos e causar instabilidade social nas áreas atingidas, afetando a segurança da comunidade e suas relações internacionais. (Rodríguez *et al.*, 2013). Tais consequências tornam ainda mais importante a reconstrução da estrutura da comunidade afetada.

Infelizmente, para a maior parte dos casos de desastre, doadores concentram suas doações à fase de resposta ao desastre, e fazem questão que as doações sejam destinadas para alimentos, remédios ou abrigo das vítimas atingidas, pois exigem que suas doações sejam utilizadas em itens tangíveis e em curto prazo (Hoffman, 2005; Murray, 2005), e por isso, ações de reconstrução são, por vezes, negligenciadas. De modo que governos regionais, empresas e organizações não governamentais devem ficar responsáveis tanto pela preparação para o desastre, quanto pela recuperação da área após o impacto (Kovacs e Spens, 2007).

A reconstrução da área deve ainda, sempre que possível, se somar as ações de prevenção contra novos desastres (Shadeck *et al.*, 2013). Ações como realocação da população em áreas de menor risco (quando possível), reforçar estruturas existentes contra o desastre e construção de estruturas de contenção podem evitar novos desastres ou mitigar o efeito de novos impactos no local.

Com isso, é possível observar que o ciclo de gerenciamento de desastres auxilia a compreensão da relação entre os principais aspectos do gerenciamento de desastres; pode ser utilizado em programas de treinamento e educação da população, tais como educação para desastres em escolas ou em exercícios simulados, para indicar aos envolvidos o ponto preciso do ciclo onde o exercício se situa dentro do gerenciamento de desastres; pode ser usado ainda como referência para verificar o andamento dos planos de ação de medidas de gestão de desastres, tais como a implantação de medidas de prevenção de desastres por parte dos governos e demais organizações; por fim, pode

ser utilizado para apresentar deficiências dentro do processo de gestão de desastres e apontar as necessidades de melhoria. (Carter, 2008).

### **2.1.3. Desastres industriais**

Instalações de alto risco, como indústrias petroquímicas, estações de tratamento de esgoto e plantas de geração de energia, são extremamente necessárias para sustentação e desenvolvimento de todos os países, fornecendo a energia necessária para suas indústrias, agricultura, sistemas de transporte, etc. (Shaluf, 2007).

Embora instalações de alto risco tenham diferentes configurações, armazenando diferentes formas de energia e substâncias químicas diversas, todas elas possuem uma característica em comum: eventos não controlados envolvendo fogo, explosões ou vazamento de uma ou mais substâncias podem resultar em morte ou ferimento de um grande número de pessoas, dentro e fora das plantas industriais, ou causar considerável dano as instalações e/ou ao meio ambiente. Estes acidentes são frequentemente chamados de Grandes Acidentes ou Grandes Desastres. (Organização Internacional do Trabalho, 1988).

Grandes desastres industriais estão presentes desde o surgimento das indústrias, com a revolução industrial. Desastres como a explosão de um armazém em uma planta de produção de fertilizantes, ocorrido em Oppau, Alemanha (1921), que vitimou 561 pessoas e a explosão seguida de desabamento na mina de carvão de Honkeiko, China (1942), que deixou mais de 1500 trabalhadores mortos, embora esporádicos, já alertavam para os riscos em instalações industriais. (Kharbanda e Stallworthy, 1989; Khan e Abbasi, 1999).

Porém, o aumento considerável da produção e do consumo de energia global, principalmente após a segunda guerra mundial, fez com que tais instalações passassem a armazenar grandes quantidades de substâncias perigosas e energia em um único lugar. Além disso, pressões econômicas fizeram que as plantas industriais aumentassem não apenas em tamanho, mas também em complexidade, fazendo com que até mesmo substâncias aparentemente inofensivas tornem-se um risco quando armazenadas em grande quantidade ou quando armazenadas próximas a outras substâncias. Por isso, estas instalações apresentam um potencial para ocorrência de acidentes que não poder

ser ignorado. (Anônimo, 1985; Granot, 1998a; Organização Internacional Do Trabalho, 1988; Shaluf, 2007; Zio; Aven, 2013).

De modo que, após a Segunda Guerra Mundial, desastres passaram a ocorrer com mais frequência, principalmente devido ao grande desenvolvimento e crescimento da indústria e tecnologia e, conseqüentemente das plantas industriais, gerado pela demanda militar. Os acidentes significativos da segunda metade do século passado, tais como Bhopal (1984), Chernobyl (1986) e Piper Alpha (1988), contribuíram para a conscientização das autoridades e indústrias da necessidade de controlar os riscos em seus processos industriais. (Granot, 1998a)

Até meados da década de 70, acidentes industriais eram identificados apenas como falhas aleatórias em equipamentos e não como uma serie de eventos ou falhas em processos que culminariam em um desastre. Embora muitos estudos fossem realizados, sua grande maioria era focada no momento do acidente e os estágios subseqüentes de alívio e recuperação. (Kippenberguer, 1999).

Foram os desastres de Flixborough, Reino Unido (1974) e Seveso, Itália (1976), que alertaram as autoridades mundiais para o problema de segurança em suas instalações industriais, levando a criação de uma diretiva sobre Grandes Riscos de Acidentes (1982), que regulamentava o planejamento de emergências em indústrias nos países europeus. Tal diretiva apresentava uma serie de recomendações para auxiliar as indústrias a reduzir a frequência de acidentes e minimizar suas conseqüências. (Organização Internacional do Trabalho, 1988; Kharbanda e Stallworthy, 1989).

Foi a partir dos anos 80 que as diretorias das organizações industriais se conscientizaram e assumiram a responsabilidade pela segurança de suas plantas e de seus funcionários. Planos de combate à emergência passaram a ser elaborados, abrangendo desde treinamentos dos colaboradores para situações de crise até planos de cooperação com as autoridades locais caso o incidente fugisse ao escopo das instalações Da Indústria. (Granot, 1998b; Kharbanda e Stallworthy, 1989).

Porém, apenas quando um vazamento de metil-isocianato, gás altamente tóxico, matou milhares de pessoas que viviam próxima a uma fábrica de inseticidas, na cidade de Bhopal, Índia, em dezembro de 1984, que as empresas e governos passaram a dar real

atenção aos riscos à que as comunidades próximas a plantas industriais estão submetidas. (Anônimo, 1985).

O desastre em Bhopal fez com que vários países incorporassem à sua legislação medidas de proteção à população nas periferias das plantas industriais. As organizações passaram a ser obrigadas, legalmente, a manter o público informado dos riscos envolvidos em seus processos produtivos. Além disso, tiveram de garantir que seus processos não trariam nenhuma ameaça a população e/ou ao meio ambiente local. Em caso de desastre, as organizações passaram a ser responsáveis por compensar e assistir a população atingida (Kharbanda e Stallworthy, 1991).

#### 2.1.3.1. Consequências de um desastre industrial

Desastres podem ter diversos tipos de impactos sobre uma empresa. Em nível organizacional uma empresa pode sofrer com diminuição das vendas, oposição da sociedade, perda de investidores, perda de produção, danos a instalações e equipamentos e, conseqüentemente, diminuição dos lucros. Além disso, empresas envolvidas com acidentes industriais podem responder a processos por danos ambientais e sociais, podendo ser submetidas a uma série de restrições legais e de regulamentação. (Kharbanda e Stallworthy, 1989).

Porém, muito além dos impactos sobre a organização está o impacto humano, tanto sobre colaboradores quanto sobre a sociedade ao redor das instalações das indústrias.

A magnitude do impacto sobre as pessoas está diretamente relacionada ao escopo do incidente. Em um incidente restrito a planta da indústria, a população afetada é, geralmente, composta por funcionários e seus familiares. Mortes e ferimentos envolvem mais diretamente os familiares, que necessitarão de suporte financeiro e emocional. Além disso, os demais trabalhadores podem se sentir inseguros, desmotivando equipes de trabalho e diminuindo sua autoestima. Podem existir, ainda, perdas financeiras, tanto para funcionários quanto para investidores. (Granot, 1998b).

Incidentes que alcançam além da planta industrial possuem uma magnitude maior. Os impactos econômicos, políticos, sociais, ambientais, médicos e culturais sobre a população nos arredores da instalação podem ser muito maiores do que os impactos diretos sobre a planta industrial e seus impactos financeiros podem ser incalculáveis. Além disso, os danos à imagem da corporação ou da indústria podem ser irreparáveis.

Incidentes como *Windscale* (1957), *Three Mile Island* (1979) e Chernobyl (1986) danificaram permanentemente a imagem da indústria de produção de energia nuclear. (Granot, 1998b). Do mesmo modo, o rompimento de uma barragem de resíduos de mineração em Mariana- MG (2015) danificou permanentemente a imagem da Samarco Mineração, proprietária da barragem.

Girolamo *et al.*, (1992) destacam que desastres industriais têm consequências mais severas em países ou regiões menos desenvolvidas, como Bhopal, uma vez que serviços de emergência são menos equipados e preparados para lidar com situações de emergência complexas. Além disso, a alta densidade populacional em subúrbios e favelas (muitas erguidas ao redor de grandes empresas, na busca dos moradores de usufruir da prosperidade econômica trazida pela instalação da indústria no local) contribui para a propagação e agravamento dos efeitos de um desastre.

Por fim, autores como Girolamo *et al.*, (1992) e Spindler *et al.*, (2010) estudam os impactos psicológicos de um desastre industrial sobre os colaboradores de uma indústria e sobre as sociedades nas quais as instalações estão inseridas. Recomenda-se a leitura dos artigos citados para maiores informações.

#### 2.1.3.2. Desastres industriais na indústria química

Na tarde de sábado, 1 de junho de 1974, uma explosão causada por um vazamento de gás praticamente destruiu uma planta de produção de caprolactama, um composto químico utilizado na produção de nylon, próxima a vila de Flixborough, Reino Unido.

Segundo o relatório da Comissão de Inquérito (1975) instaurada para investigar o acidente, a explosão matou 28 funcionários presentes na planta e deixou outros 36 feridos. A comissão ainda apontou que o desastre poderia ter sido maior se tivesse ocorrido em um dia de trabalho normal, com todos os funcionários presentes na instalação. Além disso, a planta era situada em uma região rural, diminuindo a impacto sobre a comunidade local. Ainda sim, mais de 2000 instalações próximas (entre elas 1817 residências, além de lojas e outras indústrias) foram danificadas pela explosão e pelo menos 50 moradores locais reportaram-se a polícia apresentando ferimentos devido à explosão.

O desastre de Flixborough foi seguido pelo desastre de Seveso, Itália (1976), quando um vazamento de dioxina em forma de gás deixou 30 feridos e obrigou 220.000 pessoas

a evacuar vilas próximas a indústria. (Organização Internacional do Trabalho, 1988; Zio e Aven, 2013). Além disso, milhares de animais domésticos, além de aves e animais utilizados na pecuária morreram, ou tiveram de ser sacrificados, devido à intoxicação ou contaminação pelo gás. (Khan e Abbasi, 1999; Zio e Aven, 2013).

Embora ambos os desastres retratados anteriormente sejam considerados extremamente graves, como citado anteriormente neste trabalho, não figuram entre os maiores desastres da indústria química. Kharbanda e Stallworthy (1989), Khan e Abbasi (1999) e Zio e Aven (2013) apresentam os maiores desastres industriais ocorridos no mundo desde o desastre de Oppau, em 1921, e suas consequências. A Tabela 1 apresentada a seguir é uma compilação dos desastres apresentados pelos autores, com ênfase nos desastres ocorridos nas indústrias químicas e de energia ao redor do mundo.

Tabela 1: Grandes acidentes na indústria química e de energia entre 1920 e 2013

<b>Data</b>	<b>Local</b>	<b>Descrição</b>	<b>Consequência</b>
<b>1921</b>	Oppau, Alemanha	Explosão de um armazém utilizado para armazenamento de sulfato de amônia em uma planta de fertilizantes	561 mortos, mais de 2.000 feridos
<b>1942</b>	Honkeiko, China	Explosão e desmoronamento de uma mina de carvão	Mais de 1.500 mortos
<b>1947</b>	Cidade de Texas, Estados Unidos	Incêndio seguido de explosão em um cargueiro carregado de nitrato de amônia ancorado no porto da cidade. A explosão causou a explosão de uma planta de produção de estireno próxima e vários focos de incêndio na cidade. Este é considerado o maior desastre industrial da história dos EUA.	578 mortos. Mais de 3500 feridos
<b>1948</b>	Ludwigshafen, Alemanha	Explosão em um vagão tanque com combustível em um trem dentro de uma instalação da BASF	207 mortos

<b>Data</b>	<b>Local</b>	<b>Descrição</b>	<b>Consequência</b>
<b>1962</b>	Centralia, Estados Unidos	Incêndio em uma mina de carvão forçou a evacuação da vila de Centralia, Pennsylvania. A mina continua a queimar em 2016, 55 anos após o desastre.	Evacuação da vila e danos ambientais.
<b>1967</b>	Cornwall, Inglaterra	O navio petroleiro <i>Torrey Canyon</i> , considerado o primeiro supercargueiro, encalhou após colidir com um recife. Este foi o primeiro grande derramamento de óleo no mar registrado na história.	Danos ambientais
<b>1974</b>	Flixborough, Inglaterra	Explosão em uma planta de produção de caprolactama, composto químico utilizado na produção de nylon.	28 mortos e 86 feridos.
<b>1975</b>	Chasnala, Índia	Explosão em mina de carvão	431 mortos
<b>1976</b>	Seveso, Itália	Vazamento de uma nuvem de dioxina devido a uma explosão na planta.	Danos ambientais. 220.000 pessoas evacuadas da cidade
<b>1978</b>	São Carlos, Espanha	Explosão de caminhão carregado de propileno após colisão com um muro.	Mais de 500 mortos
<b>1979</b>	Novosibirsk, União Soviética	Acidente em uma instalação química militar. (detalhes desconhecidos)	Aproximadamente 300 mortos
<b>1979</b>	Harrisburg, Estados Unidos	Derretimento parcial de um reator nuclear da usina de <i>Three Mile Island</i> causou o vazamento de gases radioativos na atmosfera.	Não houve vítimas
<b>1979</b>	Golfo do México, México	Incêndio na plataforma de perfuração de petróleo Ixtoc I causou grande vazamento de petróleo no mar.	Danos Ambientais

<b>Data</b>	<b>Local</b>	<b>Descrição</b>	<b>Consequência</b>
<b>1980</b>	Lago Peigneur, Luísiana, Estados Unidos	Uma plataforma de exploração de petróleo da Texaco acidentalmente atingiu o teto de uma mina de exploração de sal, transformando o lago, anteriormente de água doce, em um lago de água salgada.	Danos Ambientais
<b>1984</b>	Romeoville, Estados Unidos	Explosão em uma refinaria de petróleo ( <i>Union Oil</i> )	19 mortos
<b>1984</b>	Cubatão, Brasil	Vazamento de gasolina de um duto resultando em fogo e explosão	Mais de 500 mortos. 93 mortes confirmadas, mais de 400 corpos não encontrados.
<b>1984</b>	San Junico, México	Explosão de tanque de armazenamento em uma planta de produção de Gás de Petróleo Líquido (GLP).	Mais de 500 mortos
<b>1984</b>	Bhopal, Índia	Vazamento de metil-isocianato em uma planta de produção de inseticidas. Considerado o maior acidente industrial da história	Mais de 2.500 mortos imediatamente após o desastre. Estimam-se mais de 20.000 mortos devido aos efeitos do gás nos meses seguintes. Milhares de feridos. Severos danos ambientais

Data	Local	Descrição	Consequência
1986	Chernobyl, Ucrânia	Testes no reator número quatro da planta de energia nuclear de Chernobyl saíram do controle resultando em derretimento do reator e consequente vazamento de materiais radioativos. A região continua contaminada e evacuada em 2015	81 mortos (oficialmente). Estimam-se mais de 4.000 mortes subsequentes devido a câncer e mais de 600.000 afetados pela radiação
1988	Auburn, Estados Unidos	Mistura incorreta de elementos químicos durante a limpeza de um tanque. O funcionário encarregado da limpeza morreu por asfixia. Outros 4 funcionários morreram por asfixia ao tentar resgatá-lo.	5 mortos.
1988	Norco, Estados Unidos	Explosão em uma refinaria de petróleo da Shell devido a vazamento de gás de um duto corroído	7 mortos, 42 feridos.. Mais de U\$ 700 mi em prejuízo
1988	Mar do norte	Explosão seguida de incêndio na plataforma de exploração de Petróleo e Gás Piper Apha. O maior desastre <i>off shore</i> já registrado na história	167 mortos. 3.4 bilhões de libras em prejuízo
1989	Pasadena, Estados Unidos	Incêndio seguido de explosão em uma planta de produção de polietileno. Os abalos resultantes registraram 3.5 na escala Richter	23 mortos. 314 feridos
1989	Long Beach, Estados Unidos	O cargueiro Exxon Valdez atingiu um recife, derramando 250.000 barris de petróleo no oceano (aproximadamente 41 milhões de litros). É considerado um dos maiores desastres ambientais causados pelo homem na história	Danos Ambientais

Data	Local	Descrição	Consequência
2001	Toulouse, França	Explosão em uma planta de produção de fertilizantes	29 mortos. 2.500 feridos
2005	Cidade de Texas, Estados Unidos	Uma explosão ocorreu em uma refinaria da <i>British Petroleum</i> após derramamento de gasolina devido ao transbordamento do combustível de um tanque sobrecarregado. O vapor de gasolina ficou concentrado próximo ao chão e foi inflamado pelo motor de um caminhão que passava pelo local.	15 mortos. 100 feridos
2005	Hertfordshire, Inglaterra	Série de explosões em um terminal de armazenamento de petróleo.	Não houve vítimas.
2010	Middletown, Estados Unidos	Uma grande explosão ocorreu durante a realização de testes no sistema de energia de uma planta de geração de energia termoelétrica, no estado de Connecticut.	5 mortes, 27 feridos
2010	Golfo do México, Estados Unidos	Explosão seguida de incêndio na plataforma de exploração de petróleo <i>Deepwater Horizon</i> , causando um grande vazamento de óleo no oceano.	11 mortos. Danos ambientais

Fonte: adaptado de Kharbanda e Stallworthy (1989), Khan e Abbasi (1999) e Zio e Aven (2013).

Além dos desastres apresentados pelos autores, outros acidentes industriais atingiram as indústrias químicas nos últimos cinco anos, alguns deles de grande porte. A Tabela 2 a seguir apresenta os acidentes ocorridos nos últimos anos de maior destaque no cenário mundial.

Tabela 2: Grandes desastres industriais ocorridos nos últimos cinco anos

<b>Data</b>	<b>Local</b>	<b>Descrição</b>	<b>Consequência</b>	<b>Fonte</b>
<b>2011</b>	Fukushima, Japão	A usina nuclear de Fukushima entrou em colapso após uma explosão que derrubou parte do prédio que comporta o reator 1 da usina. A explosão foi consequência do impacto de um terremoto de magnitude 8.9 e consequente tsunami, que atingiu a costa do Japão.	Danos ambientais	<a href="http://www.telegraph.co.uk/news/worldnews/asia/japan/8953574/Japan-earthquake-tsunami-and-Fukushima-nuclear-disaster-2011-review.html">http://www.telegraph.co.uk/news/worldnews/asia/japan/8953574/Japan-earthquake-tsunami-and-Fukushima-nuclear-disaster-2011-review.html</a> Acesso em 08/04/2016
<b>2013</b>	Shanxi, China	Uma válvula de drenagem defeituosa em uma planta da indústria “Tianji Coal” causou o vazamento de 39 toneladas de anilina dentro do rio Zhuozhang, rio de água potável que alimenta varias cidades no norte da China, além de 28 vilas, afetando a distribuição de água para mais de 1 milhão de pessoas	Danos ambientais	<a href="http://www.nytimes.com/2013/03/03/world/asia/spill-in-china-lays-bare-environmental-concerns.html?_r=0">http://www.nytimes.com/2013/03/03/world/asia/spill-in-china-lays-bare-environmental-concerns.html?_r=0</a> Acesso em 08/04/2016
<b>2013</b>	Tavares, Estados Unidos	Uma chama provocada por uma empilhadeira causou a explosão de tanques de gás propano armazenados indevidamente na planta de produção <i>Blue Rhino</i> .	7 feridos	<a href="http://edition.cnn.com/2013/07/30/us/florida-propane-explosion/">http://edition.cnn.com/2013/07/30/us/florida-propane-explosion/</a> Acesso em 08/04/2016

<b>Data</b>	<b>Local</b>	<b>Descrição</b>	<b>Consequência</b>	<b>Fonte</b>
<b>2013</b>	West, Estados Unidos	Um incêndio em uma planta de produção de fertilizantes na cidade de West, Texas, resultou em explosão causada pela combustão de nitrato de amônia. A explosão ocorreu enquanto bombeiros tentavam controlar as chamas	15 mortos. 226 feridos	<a href="http://edition.cnn.com/2014/04/22/us/west-texas-fertilizer-plant-explosion-investigation/">http://edition.cnn.com/2014/04/22/us/west-texas-fertilizer-plant-explosion-investigation/</a> Acesso em 08/04/2016
<b>2014</b>	Mie, Japão	Um trocador de calor explodiu por falta de manutenção na planta de produção de silicone da Mitsubishi Materials.	5 mortos. 12 feridos	<a href="http://www.japantimes.co.jp/news/2014/01/11/national/police-raid-mitsubishi-materials-silicon-plant-after-deadly-explosion">http://www.japantimes.co.jp/news/2014/01/11/national/police-raid-mitsubishi-materials-silicon-plant-after-deadly-explosion</a> Acesso em 08/04/2016
<b>2014</b>	Nagaram, Índia	Um vazamento de gás em um duto corroído da companhia estatal de gás da Índia causou uma grande explosão após uma hospedaria próxima ao duto acender o forno durante o café da manhã.	22 mortos. 38 feridos	<a href="http://indianexpress.com/article/india/india-others/22-would-not-have-died-in-pipeline-blast-had-gail-installed-safety-features-as-it-had-promised-probe-report/">http://indianexpress.com/article/india/india-others/22-would-not-have-died-in-pipeline-blast-had-gail-installed-safety-features-as-it-had-promised-probe-report/</a> Acesso em 08/04/2016
<b>2015</b>	Shanxi, China	Vazamento de dissulfeto de carbono, utilizado como solvente industrial. As causas do acidente ainda estão sendo investigadas	8 mortos. 2 feridos	<a href="http://www.chinadailyasia.com/nation/2015-05-16/content_15265258.html">http://www.chinadailyasia.com/nation/2015-05-16/content_15265258.html</a> Acesso em 08/04/2016

<b>Data</b>	<b>Local</b>	<b>Descrição</b>	<b>Consequência</b>	<b>Fonte</b>
<b>2015</b>	Tianjin, China	Explosão em depósito de produtos químicos no porto da cidade	Mais de 170 mortos.	<a href="http://www.theguardian.com/world/2015/sep/12/tianjin-explosion-china-sets-final-death-toll-at-173-ending-search-for-survivors">http://www.theguardian.com/world/2015/sep/12/tianjin-explosion-china-sets-final-death-toll-at-173-ending-search-for-survivors</a> Acesso em 08/04/2016
<b>2015</b>	Santos, Brasil	Uma explosão atingiu seis tanques de combustível em uma área industrial da empresa Ultracargo, provocando um incêndio de grandes proporções. As chamas foram totalmente extintas apenas 9 dias depois do acidente	Danos ambientais.	<a href="http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2015/04/1614967-apos-nove-dias-bombeiros-anunciam-extincao-do-incendio-de-santos.shtml">http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2015/04/1614967-apos-nove-dias-bombeiros-anunciam-extincao-do-incendio-de-santos.shtml</a> Acesso em 08/04/2016
<b>2015</b>	Mariana, Brasil	Rompimento de barragens de lama oriunda de resíduos de mineração da empresa Samarco Mineração gerou uma avalanche de lama que destruiu o distrito de Bento Rodriguez, próximo às barragens.	16 mortos. 600 desabrigados. Danos ambientais.	<a href="http://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2015/11/06/o-que-se-sabe-sobre-o-rompimento-das-barragens-em-mariana-mg.htm">http://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2015/11/06/o-que-se-sabe-sobre-o-rompimento-das-barragens-em-mariana-mg.htm</a> Acesso em 08/04/2016
<b>2016</b>	Santos, Brasil	Vazamento de amônia do terminal 1 do porto de Santos gerou uma nuvem tóxica que se estendeu por 4 cidades do litoral de São Paulo (Santos, Guarujá, São Vicente e Praia Grande) .	1 morte. 119 pessoas deram entrada nos hospitais da região com dificuldades para respirar.	<a href="http://g1.globo.com/sp/santos-regiao/noticia/2016/01/idoso-morre-apos-inalar-fumaca-toxica-gerada-por-incendio-em-guaruja-sp.html">http://g1.globo.com/sp/santos-regiao/noticia/2016/01/idoso-morre-apos-inalar-fumaca-toxica-gerada-por-incendio-em-guaruja-sp.html</a> Acesso em 08/04/2016

As fontes para os desastres apresentados foram obtidas de jornais por falta de fontes acadêmicas.

A maior parte das perdas em acidentes em indústrias químicas é atribuída a explosões, correspondendo a aproximadamente dois terços do total de perdas. Este número chega a 75 % quando analisado entre todas as instalações industriais. Fogo e incêndio contribuem para 20 % total de perdas em indústrias. (Khan e Abbasi, 1999). As tabelas apresentadas anteriormente auxiliam a visualizar as estatísticas apresentadas pelos autores.

O relatório da comissão de inquérito (1975) responsável por investigar o desastre em Flixborough aponta que não existiam indícios de que a indústria tenha sido negligente com os riscos em seus processos. A comissão identificou que a direção da indústria era consciente e responsável com a segurança da instalação, e que medidas de prevenção eram tomadas para evitar acidentes. Por isso, a comissão de inquérito reconhece que riscos não podem ser totalmente eliminados e que nenhuma planta industrial pode ser projetada e construída absolutamente segura. De modo que, mesmo com todas as medidas preventivas possíveis, um evento inesperado ainda pode ocorrer, tais como vazamentos de gás ou produtos químicos, fogo ou explosões. (Kharbanda e Stallworthy, 1989, Granot, 1998a).

#### 2.1.3.3. Causas comuns de desastres industriais

Embora não seja possível identificar uma causa geral de acidentes em indústrias diversos autores, como Turner (1978), Organização Internacional do Trabalho (1988), Kharbanda e Stallworthy (1989), Granot (1998 b), Khan e Abbasi (1999), Kippenberger (1999) e Zio e Aven (2013) identificam características e causas comuns a acidentes industriais em diversos tipos de instalações.

Através destes trabalhos é possível sintetizar as seis causas mais comuns de desastres em instalações industriais:

##### *Erro Humano*

Grande parte dos desastres envolvendo a atividade humana é consequência de um erro humano. Granot (1998, b) afirma que quase metade dos acidentes em uma indústria tem como causa básica (ou principal) o erro humano, e apesar do crescimento em tamanho e complexidade e segurança, os atuais sistemas industriais, em sua maioria, ainda dependem de envolvimento humano para sua operação segura.

Por isso, a habilidade do ser humano em conduzir uma instalação de alto risco é fundamental não apenas para plantas manuais, mas para plantas extremamente automatizadas que só necessitam de intervenção humana esporadicamente.

Alguns dos erros mais comuns são:

- Erros de operador, como pressionar o botão errado ou fechar/abrir a válvula errada;
- Desconectar sistemas de segurança;
- Manutenção de equipamentos ineficiente;
- Mistura incorreta de produtos químicos;
- Manuseio incorreto de substâncias e ferramentas;
- Falta de atenção (especialmente por sono, cansaço ou problemas pessoais);
- Erros de julgamento e decisões equivocadas;
- Erros de projeto de instalações ou equipamentos.

Um problema comum em emergências industriais é a falha em perceber a magnitude de um risco iminente. Muitas vezes, os possíveis riscos de uma situação são subestimados, e mesmo quando a possibilidade de um risco real é aceita ela é minimizada por aqueles que a percebem. Isto ocorre ora por medo das pessoas de serem alarmistas, ora por que o resultado pode ser ruim demais para ser enfrentado pelos funcionários e por isso considerado impensável. (Slovic *et al.*, 1979).

Muitas vezes tais erros são causados por falta de treinamento adequado dos colaboradores ou pelo desconhecimento dos perigos envolvidos no trabalho. Além disso, alguns trabalhadores podem não ser aptos a determinados tipos de trabalho ou não saber lidar com situações de estresse.

Por isso, uma seleção cuidadosa dos colaboradores e treinamento adequado são fatores essenciais para o gerenciamento de pessoal em instalações de alto risco.

#### *Falhas em equipamentos*

É fundamental para segurança de uma instalação industrial que seus componentes suportem a carga solicitada durante o processo produtivo. São exemplos de falhas de equipamentos comuns:

- Falhas de contenção em dutos, tanques e vasos e alta pressão devido à falta de manutenção;
- Falhas em componentes de bombas, compressores e válvulas;
- Falhas em sistemas de controle de processo, como medidores de temperatura, pressão e fluxo de fluidos;
- Falhas em sistemas de segurança, tais como válvulas de segurança, sistemas de alívio de pressão, sistemas de neutralização de substâncias químicas e sistemas de combate a incêndio;

Cada uma destas falhas pode desencadear um grande acidente dentro de um ambiente industrial, por isso, é de responsabilidade da alta direção estabelecer quais destes sistemas necessitam de segurança adicional ou redundância e quais precisam ser atualizados.

#### *Desvios da condição normal de operação*

Embora falhas em equipamentos possam ser evitadas com desenvolvimento e manutenção adequados, mudanças na condição normal de operação de tais equipamentos podem ter graves consequências.

As seguintes condições podem gerar desvios na condição normal de operação de uma planta:

- Falha no monitoramento de parâmetros de processos, como temperatura, pressão, fluxo de fluidos;
- Falhas nos serviços básicos para funcionamento do sistema, tais como energia elétrica, ar comprimido, etc.;
- Falhas em procedimentos de inicialização ou encerramento de processos ou linhas de produção;
- Formação e tratamento inadequado de produtos secundários e resíduos do processo.

As consequências de tais desvios podem ser devastadoras, e só podem encontradas após análise de todo o sistema de produção.

Programas de inspeção, programas de treinamento de pessoal e procedimentos bem detalhados e registrados ajudam a evitar tais desvios.

### *Interferências externas*

Desastres em uma instalação industrial podem ser causados não apenas por falhas em sua operação, mas por fatores externos próximos a planta, tais como:

- Estações de carga e descarga de substâncias perigosas;
- Tráfego aéreo, marítimo, ferroviário e rodoviário próximo à planta, especialmente para transporte de substâncias perigosas;
- Impactos externos, como quedas de torres ou guias;
- Plantas industriais de alto risco próximas.

Tais fatores não podem ser sempre evitados, mas devem ser considerados durante o desenvolvimento de uma planta ou sistema, de modo a minimizar o impacto de tais eventos.

### *Forças naturais*

Também são consideradas interferências externas, mas de causas naturais. O maior exemplo deste tipo de acidente é o recente acidente na usina nuclear de Fukushima, Japão. A usina entrou em colapso após uma explosão que derrubou parte do prédio que comporta o reator 1 da usina. A explosão foi consequência do impacto de um terremoto de magnitude 8.9 e consequente tsunami, que atingiu a costa do Japão em 12 de março de 2011.

Além de terremotos e tsunamis, outras forças naturais também devem ser consideradas, tais como:

- Ventos e tornados;
- Enchentes;
- Frio extremo;
- Calor extremo;
- Deslizamentos de terra e avalanches;
- Incidência de raios.

Se tais eventos ocorrem em regiões próximas à localização da instalação industrial medidas preventivas devem ser tomadas para minimizar seus impactos.

### *Sabotagem e atentados terroristas*

Toda instalação industrial pode ser alvo de sabotagem (por parte de funcionários ou de terceiros) ou de atentados terrorista, como ocorrido em Saint-Quentin Fallavier (França) em 26 de junho de 2015, onde um homem detonou cilindros de gás na planta da *Air Products*, ferindo 3 pessoas. Um corpo decapitado foi encontrado no local.

Proteção contra tais ações é sempre difícil e demanda análise cuidadosa, especialmente em áreas de conflito. Por isso, embora tais atos tenham uma possibilidade mais remota, jamais devem ser desconsiderados em um projeto de planta industrial.

### *Outros fatores identificados*

Além disso, ao analisar diferentes tipos de acidentes industriais, Turner (1978) aponta alguns outros problemas capazes agravar crises ou dificultar às operações de resposta e salvamento durante um desastre. São eles:

- Inflexibilidade de crenças e percepções

Todas as organizações desenvolvem um conjunto de práticas ou culturas que determinam sua visão do ambiente em que estão situadas. Esta mentalidade pode gerar inflexibilidade nas organizações de admitir fatores ou perigos estranhos a seus preceitos, dificultando a percepção de perigos externos.

Embora alguns indivíduos não envolvidos de forma direta com as indústrias, ou suas atividades, consigam prever situações de perigo dentro do ambiente em que as empresas estão inseridas, suas preocupações são frequentemente ignoradas, uma vez que gestores acreditam que conhecem melhor do que terceiros os riscos envolvidos em seus processos.

- Problemas Camuflados

Muitas vezes as indústrias se atem ao gerenciamento de problemas bem conhecidos, familiares à atividade. Tais problemas podem camuflar problemas menos óbvios que, em última instância, podem ser a causa de um acidente. Este efeito é chamado pelos especialistas da área de *Decoy Problem* (ou problema chamariz). Granot (1998b) destaca ainda que este efeito é particularmente problemático durante a fase de resposta ao desastre, onde o estresse causado pelo evento súbito tende a reduzir a objetividade

dos envolvidos e afetados pelo desastre, fazendo com que os *decoys* desviem a atenção dos problemas e causas reais do acidente.

- Dificuldade de comunicação e falta de informação

Existem muitas pessoas envolvidas em um desastre industrial, e cada uma possui sua própria teoria sobre as causas e efeitos dos acidentes, de modo que, em alguns casos, todas as informações disponíveis são enviadas a qualquer pessoa, mesmo que apenas remotamente, envolvida em situações de emergência, tornando a responsabilidade pela tomada de ação emergencial distorcida e confusa.

Informações podem também ser distorcidas nos canais transmissão ou mal interpretadas pelos envolvidos na resposta ao desastre. Instruções de segurança podem ser insuficientes ou ineficazes. Por vezes, informações relevantes passam despercebidas em meio a uma grande quantidade de dados ou detalhes inúteis que são gerados de forma indiscriminada. Todos estes problemas retardam o processo de construção de informação e, conseqüentemente, de tomada de decisões preventivas ou de resposta a um desastre.

Granot (1998b) ainda destaca que o gerenciamento de informações em situações de emergência é tão importante que, se não tratado corretamente, podem causar falhas até nos planos de resposta a desastres mais bem preparados.

- Presença de estranhos na planta industrial.

Turner (1978) aponta o perigo de pessoas estranhas nas facilidades (como, por exemplo, visitantes), pessoas sem o conhecimento dos riscos envolvidos com o local, com o processo ou com os procedimentos de emergência.

- Não aplicação de normas e regulamentações de segurança

Falha ao implantar normas de segurança estabelecidas; ausência de inspeção e monitoramento de sistemas críticos; ignorância em relação às normas ou procedimentos de segurança; etc. são causas comuns de acidentes dentro de plantas industriais.

Além disso, mudanças sociais ou avanços tecnológicos podem, ainda, tornar as normas existentes obsoletas e desacreditadas, reduzindo sua aplicabilidade (Granot, 1998 b).

## 2.2. LOGÍSTICA HUMANITÁRIA

No que concerne à logística e ao gerenciamento da cadeia de suprimentos em situações de desastre, as atividades que englobam as maiores preocupações e desafios são preparação, resposta e recuperação. Juntas, estas atividades constituem a base da logística humanitária. (Cozzolino, 2012; Leiras *et al.*, 2014).

A logística humanitária pode ser definida como sendo o conjunto de processos e sistemas envolvidos em mobilizar pessoas, conhecimentos, habilidades e recursos para auxiliar pessoas vulneráveis, afetadas por desastres ou situações de emergência (O'Leary, 2004)

Beamon (2004), afirma que logística humanitária é a função que visa o fluxo de pessoas e materiais de forma adequada e em tempo oportuno na cadeia de assistência a vítimas de desastres, com o objetivo principal de atender, de maneira correta, o maior número de pessoas.

Contudo, Ernest (2003) aponta que Logística humanitária pode ser definida de forma semelhante à Logística, uma vez que logística humanitária também é um processo de gerenciamento do fluxo de bens, informações e finanças, de doadores (fornecedores) até as áreas afetadas por um desastre (clientes). O autor aponta que a principal diferença entre ambas é a motivação, que em logística humanitária não é o aumento da lucratividade, e sim aliviar o sofrimento das vítimas.

Desta forma, pode-se definir logística humanitária como o estudo dos conceitos logísticos adaptados às situações e às necessidades da cadeia de suprimentos em situações de emergência.

### 2.2.1. Objetivos da logística humanitária

O objetivo da logística é disponibilizar mercadorias e serviços, no instante e lugar certo, na condição desejada e ao menor custo possível, Ballou (1993). Neste contexto, (Cardoso e Hoffmann, 2012) apontam que a logística humanitária possui os mesmos objetivos da logística empresarial, de superar distancia e tempo, porém visando salvar vidas e aliviar o sofrimento de vítimas de um desastre.

De modo que, para Cardoso e Hoffman (2012), a logística humanitária deve considerar como mercadorias e serviços, alimentos ou serviços médicos prestados as vítimas; como lugar correto, postos de atendimento as vítimas ou centrais de distribuição; como instante correto, o momento em que as vítimas necessitam de um determinado suprimento ou serviço; e como condição desejada, que os produtos estejam devidamente identificados e aptos para utilização quando necessários. Por fim, identificam como recursos financeiros disponíveis desde doações até recursos públicos, que são finitos e, por isso, as operações de resgate devem ocorrer ao menor custo possível, quando viável.

A principal função de um especialista em logística é auxiliar as necessidades da cadeia de suprimentos. Isto é feito através da avaliação de necessidades, estabelecimento de relações com fornecedores e consumidores e construção da infraestrutura necessária, frequentemente, em condições adversas (Tabbara, 2008).

### **2.2.2. Características da logística humanitária**

A logística é fundamental para execução de missões de ajuda humanitárias, pois serve como elo entre a preparação para um desastre e a resposta a um desastre ocorrido. Isto é feito através de procedimentos de aquisição de suprimentos, relação e negociação com fornecedores, posicionamento de armazéns de suprimentos e conhecimento de condições de transporte do local (Thomas, 2003).

A logística humanitária deve abranger desde a aquisição de suprimentos, planejamento de transporte e armazenamento destes suprimentos, estabelecimento de serviços básicos necessários às operações de resgate e assistência às vítimas, até as ações de reabilitação e reconstrução das áreas afetadas pelo desastre (Kovács e Spens, 2007).

Ainda segundo Kovacs e Spens (2007), a logística humanitária deve lidar com algumas características particulares que a diferenciam da logística empresarial, tais como: ambientes com infraestrutura destruída ou comprometida pela ação do desastre; falta de serviços básicos, como energia elétrica e saneamento; e demanda por suprimentos inconstante e imprevisível. Por este motivo, Beamon (2005) e Ertem *et al.*, (2010) propõe quadros comparativos entre Logística Humanitária e Logística Empresarial, que são sintetizados na Tabela 3 a seguir:

Tabela 3: Quadro comparativo entre logística empresarial e logística humanitária

	<b>Logística Empresarial</b>	<b>Logística Humanitária</b>
<b>Padrão de demanda:</b>	Relativamente estável e previsível.	Imprevisível em relação a tempo, quantidade e localização.
<b>Tempo de espera:</b>	Determinado pela cadeia de fornecedores e centros de distribuição.	Aproximadamente zero.
<b>Clientes:</b>	Consumidor Final.	Beneficiários, vítimas.
<b>Partes interessadas:</b>	Acionistas, consumidores e fornecedores.	Militares, Organizações não governamentais, doadores, governos e vítimas.
<b>Configuração da rede de distribuição:</b>	Métodos existentes e eficientes para determinar o número e a localização de centros de distribuição.	A falta de conhecimento em relação à situação no local do desastre dificulta a localização de centros de distribuição.
<b>Controle de estoque:</b>	Em geral, níveis de estoque são baseados no tempo de espera pela matéria prima e pela demanda de um produto ou serviço.	Elevadas taxas de variação de demanda. Sua localização e tempo de espera pelos produtos ou serviços dificultam o controle de estoque.
<b>Sistemas de informação:</b>	Geralmente bem definidos com utilização de tecnologias avançadas.	Informações são frequentemente incompletas, não confiáveis ou não existentes.

	<b>Logística Empresarial</b>	<b>Logística Humanitária</b>
<b>Sistemas de medidas de desempenho:</b>	Foco em medidas de desempenho de resultados, tais como maximização de lucros ou minimização de custos.	Foco em medidas de desempenho de processos, tais como tempo de respostas e habilidade para definir as necessidades das vítimas do desastre.
<b>Objetivos estratégicos:</b>	Aumento da lucratividade e da satisfação do cliente com o produto ou serviço prestado.	Minimizar perdas humanas e aliviar o sofrimento das vítimas.

Fonte: adaptado de Beamon (2005); Ertem *et al.* (2010)

Long (1997) ainda destaca que a logística humanitária é uma forma de logística altamente especializada para tarefas que não podem ser antecipadas com nenhum grau de precisão. Além disso, ações de resposta a desastres necessitam ser tomadas em curto prazo, em um ambiente com alto nível de estresse, de modo que os especialistas logísticos necessitam possuir grande estabilidade emocional. (McClintock, 2009; Pettit e Beresford, 2009).

Por fim, Van Wassenhove (2006) aponta que a logística é um aspecto crítico para o sucesso de uma operação humanitária, posto que 80% dos esforços de uma operação de mitigação a desastres se destinam a atividades logísticas. Ainda sim, a maior parte das organizações de ajuda humanitária subestima a importância da logística em operações de resgate e mantém como seu foco de trabalho o levantamento de fundos e suprimentos para auxílio direto as vítimas (Murray, 2005), o que gera uma escassez de profissionais qualificados para atuar na logística em situações de emergência (Pettit e Beresford, 2009).

### **2.2.3. Fatores críticos de sucesso de operações em logística humanitária**

Fatores críticos de sucesso é um conjunto limitado de áreas de uma organização cujos resultados, se satisfatórios, garantem o desempenho competitivo da organização. Ou seja, são as áreas de atividade cujo bom desempenho é essencial para atingir os objetivos estratégicos organizacionais (Rockart, 1979)

Rockart (1979) aponta que estas áreas de atividade devem receber atenção especial dos gestores. A situação e o desempenho de cada área devem ser contínua e periodicamente medidos e seus resultados devem estar sempre disponíveis, pois se os resultados nestas áreas não forem adequados, o desempenho da organização será menor do que o desejado para o período.

Fatores críticos de sucesso podem ser definidos, ainda, como as características, condições ou variáveis que quando devidamente gerenciadas, sustentadas e medidas podem ter um impacto significativo no sucesso de uma organização (Korpela e Tuominen, 1996). Se tais condições não forem mantidas ou falharem, a organização também falhará (Huotari e Wilson, 2001).

A tabela a seguir, adaptada de Rockart (1979), apresenta alguns exemplos fatores críticos de sucesso comuns.

Tabela 4: Exemplos de fatores críticos de sucesso comuns

<b>Organização (Exemplo)</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Fatores Críticos de Sucesso</b>
<b>Supermercado</b> <b>(Organização focada em lucratividade)</b>	Parcela de Mercado	Mix de Produtos
	Retorno de investimentos	Gerenciamento de Estoque
	Ganhos por ação	Preço
	Sucesso de novos produtos	Promoção da marca
<b>Hospital público</b> <b>(Organização Filantrópica)</b>	Excelência cuidados médicos	Integração regional com outros hospitais
	Excelência em atendimento	Eficiência no uso de matérias médicos escassos
	Encontrar necessidades do ambiente futuro da saúde pública	Contabilidade de custos

Fonte: Adaptado de Rockart (1976)

Como pode ser observado na tabela apresentada anteriormente, gestores de organizações sem fins lucrativos também devem ser capazes de identificar os fatores críticos de sucesso de suas organizações.

Por isso, no contexto da logística humanitária, é essencial identificar os fatores críticos de sucesso de uma operação de ajuda e resgate, de modo a evitar falhas durante o processo de assistência às vítimas, tais como: exceder o limite de tempo aceitável para entrega de provisões; ou entrega de serviços e suprimentos inapropriados (Pettit e Beresford, 2009), uma vez que tais falhas representariam a falha de toda a missão de ajuda humanitária, pondo em risco a saúde, e frequentemente, a vida das pessoas nas localidades atingidas pelo impacto do desastre.

Embora as condições em que a cadeia de suprimentos humanitária opere sejam diferentes das cadeias de suprimentos comerciais, as atividades básicas em ambas as cadeias são essencialmente as mesmas. Isto indica que é possível analisar e avaliar os fatores críticos de sucesso da logística de organizações comerciais, e determinar sua importância perante a logística de assistência e resposta a desastres, auxiliando organizações de ajuda humanitária a aumentar a eficiência de suas atividades. (Pettit e Beresford, 2009).

Sob esta perspectiva Abidi *et al.*, (2013) sintetizam os fatores críticos de sucesso para logística apontados por Power; *et al.*, (2001), Lu *et al.*, (2006); Pettit e Beresford, (2009) e identificam os seguintes fatores críticos de sucesso para logística humanitária: Planejamento estratégico, gerenciamento de estoque, planejamento de transporte e capacidade, gerenciamento da informação e utilização de tecnologia, gerenciamento de recursos humanos, colaboração, melhoria contínua e estratégia da cadeia de suprimentos.

De acordo com Ernest (2003), organizações humanitárias devem aproveitar da experiência de organizações comerciais, absorvendo conhecimento e utilizando suas práticas em operações humanitárias, de modo a aprimorar seu desempenho e resultados.

Embora a recíproca também possa ser verdadeira, com organizações comerciais aprendendo com práticas de organizações humanitárias (Ernest, 2003), Gustavsson (2003) afirma que o setor humanitário ainda tem uma mentalidade ultrapassada e considera logística como uma despesa necessária; além de realizar poucos investimentos em tecnologias, meios de comunicação e modelagem de novas ferramentas e técnicas (modelagem matemática) para solução de seus problemas.

Além disso, o setor carece de profissionais especializados em logística, e seus processos são basicamente manuais. Tais limitações geram avaliações e planejamento inadequados da cadeia de suprimentos, além de prejudicar a colaboração e a coordenação dos trabalhos de diferentes organizações. (Kovács e Spens, 2007).

Por isso, ainda existe a clara necessidade de aprofundamento nos estudos da logística humanitária, de modo a auxiliar no planejamento e execução de operações de ajuda humanitária a regiões atingidas por desastres. (Beamon, 2004. Kovács e Spens, 2007).

## 2.3. EVACUAÇÃO DE ÁREA

### 2.3.1. Definição

Evacuação é definida como um processo onde pessoas ameaçadas por um evento são movidas de locais expostos a tal evento para locais seguros, de modo a reduzir a vulnerabilidade à saúde e vida de cada pessoa. (Saadatseresht *et al.*, 2009). Evacuações de área são fundamentais para a proteção de uma população em eventos como incêndios, furacões, tsunamis, desastres industriais, atentados terroristas, etc. que podem atingir uma determinada localidade. (Brachman e Dragicevic, 2014).

A erupção do vulcão Villarica, ocorrida em março de 2015 no Chile, que provocou a retirada de mais de 3000 pessoas das comunidades próximas ao vulcão; a passagem do ciclone Pam que obrigou centenas de pessoas a abandonarem as comunidades litorâneas no arquipélago de Vanuatu, também em março de 2015; o incêndio que destruiu parte do porto de Tianjin, China, vitimando mais de 100 pessoas e obrigando pessoas em um raio de 3km do local a evacuar a área, em agosto de 2015; e o rompimento de duas barragens de rejeitos de uma mineradora em Mariana (MG), novembro de 2015, que vitimou 13 pessoas e obrigou a evacuação do distrito de Bento Rodriguez, em além de outras dezenas de eventos que ocorrem anualmente ao redor do mundo, são lembretes constantes da necessidade de planejamento para evacuação de áreas em resposta a desastres naturais e antropogênicos.

Embora grandes problemas de evacuação de área tornassem-se evidentes durante a Segunda Guerra Mundial, o primeiro grande estudo sobre evacuação em larga escala foi realizado em 1961, em resposta ao furacão Carla, que atingiu a costa do Texas, Estados Unidos, e obrigou a evacuação de aproximadamente 250 mil pessoas. (Johnson e

Zeigler, 1986). Porém, o interesse em estudos de evacuação envolvendo desastres antropogênicos aflorou apenas após os desastres de Seveso, Itália 1976 e *Three Mile Island*, Estados Unidos 1979. (Johnson e Zeigler, 1986; Cova e Church, 2000; Shen *et al.*, 2014).

Juntamente com suporte logístico, evacuação de área é considerada a atividade mais importante em resposta a um desastre. (Ozdamar e Yi, 2007). Por isso, elaboração e treinamento apropriado de um plano de evacuação são partes primordiais da etapa de preparação para um desastre. (Ozdamar e Yi, 2007, Saadatseresht *et al.*, 2009).

Para que modelos de evacuação sejam precisos, é necessário que gestores saibam previamente a distribuição espacial das pessoas a serem evacuadas, dos possíveis riscos no local, localização de áreas seguras e das rotas e modais de transporte disponíveis. (Cova e Johnson, 2003; Brachman e Dragicevic, 2014; Shen *et al.*, 2014).

Além disso, inúmeros outros problemas podem surgir durante a evacuação de uma área, tais como: pistas e rotas comprometidas pelo desastre ou por uma ameaça, dificuldade de notificar a necessidade de evacuação e engarrafamentos em interseções das rotas de fuga. (Cova e Johnson, 2003).

Porém a elaboração de um plano de evacuação não pode ser considerada meramente como um exercício para engenheiros e gestores logísticos, uma vez que a evacuação de uma área possui um importante componente comportamental que não pode ser ignorado. Gestores precisam estar cientes a respeito da forma como as pessoas reagem e se comportam frente aos riscos, uma vez que durante situações de crise pessoas são afetadas por medo, incertezas e pela velocidade com que a crise se desenvolve. (Johnson e Zeigler, 1986; Silva, 2001; Saadatseresht *et al.*, 2009; Brachman e Dragicevic, 2014).

Uma vez que a ordem de evacuação de uma área é dada, o principal objetivo é retirar todos os habitantes da área, no menor tempo possível, e com o mínimo de fatalidades, ferimentos e danos à propriedade possível. (Johnson e Zeigler, 1986). Diversos modelos matemáticos e ferramentas foram desenvolvidos nos últimos anos com este objetivo, alguns deles são apresentados brevemente a seguir.

### 2.3.2. Revisão de estudos e modelos de evacuação existentes

Embora existam muitos estudos relacionados à evacuação de área, eles possuem diferentes perspectivas como: aperfeiçoar estratégias de controle de tráfego, maximização de fluxo na rede de transporte, comportamento dos evacuados frente aos riscos existentes, seleção de abrigos, seleção de rotas de fuga, etc.

Em seu trabalho Yamada (1996) visa atribuir os evacuados a abrigos de modo minimizar a distancia total percorrida pelos evacuados até abrigos pré-determinados durante a evacuação de uma cidade, utilizando-se da formulação de fluxo de custo mínimo.

Pidd *et al.*, (1996) apresentam um protótipo de ferramenta computacional (desenvolvida pelos autores) utilizada para simulação de planos de evacuação com uma abordagem de micro simulações, onde as entidades evacuadas são tratadas individualmente, sejam carros, ônibus ou pessoas. Eles utilizam-se da base de dados de um sistema GIS (*Geographical Information System*) para estabelecer as condições iniciais da simulação, como o terreno do local, as vias existentes e a existência de equipes de resgate próximas. Além disso, o simulador apresentado permite a introdução de fatores reais complicadores no modelo, tais como congestionamentos, acidentes ou barricadas policiais nas malhas viárias.

Cova e Church (2000) apresentam um modelo matemático para identificar áreas que possam enfrentar problemas de locomoção durante uma evacuação, tais como aquelas suscetíveis a acidentes e congestionamentos. Para isso, utilizam-se de um modelo de programação inteira denominado modelo de *cluster* crítico juntamente com um algoritmo heurístico, desenvolvido pelos autores, capaz de resolver o modelo de forma eficiente. Os autores utilizam como estudo de caso a cidade de Santa Barbara, Estados Unidos.

Cova e Johnson (2003) desenvolveram um modelo de roteamento de veículos durante uma evacuação baseado em direcionamento das faixas de rolagem, considerando o fluxo de veículos em vias públicas, objetivando a redução de engarrafamento em intercessões, diminuindo o tempo total para evacuação e minimizando o risco de acidentes em intercessões.

Liu *et al.*, (2006) apresentam diversas ferramentas computacionais desenvolvidas ao longo dos anos para simulação de planos de evacuação com base nas relações entre fluxo nas vias, velocidade das vias, densidade populacional, etc. Porém, como os próprios autores ressaltam, embora ferramentas de simulação sejam eficientes para avaliação de diversos cenários de evacuação, a maior parte delas é limitada a escolha de planos de evacuação candidatos fornecidos pelos usuários, o que pode gerar desvios da solução ótima, além de ser necessário um enorme tempo computacional para avaliar cada um dos planos e muito esforço para fazer os ajustes finais necessários.

Ozdamar e Yi (2007) propõe um modelo para transporte de mercadorias em uma área atingida por um desastre e, simultaneamente, para transporte e evacuação dos feridos para abrigos e unidades de emergência (moveis e permanentes). Para isto, os autores propõem um modelo de Programação Inteira Mista baseada na formulação de localização e roteamento capacitado com fluxo de redes com mais de uma mercadoria, cujo objetivo é minimizar a espera por mercadorias e serviços médicos da população atingida pelo desastre. De modo a simplificar a formulação do problema, o modelo apresentado considera a quantidade de pessoas e veículos com suprimentos em cada arco do grafo como variáveis inteiras, e não binárias, e por isso não permite rastrear as rotas de cada veículo de forma independente. Para identificar as rotas dos veículos os autores apresentam um algoritmo aplicado pós-otimização sobre a resposta dada pelo modelo. A aplicabilidade do modelo é demonstrada através de um cenário de terremoto hipotético na cidade de Istanbul, Turquia.

Alcada-Almeida *et al.*, (2009) apresentam uma extensão multi-objetivo do problema da *p-mediana* para determinar o número e localização de abrigos necessários em uma emergência (incêndios de grandes proporções) na cidade de Coimbra, Portugal. Seu trabalho também visa identificar a rota que os indivíduos devem tomar para chegar a tais abrigos percorrendo o menor caminho possível e com menor risco existente. O modelo proposto pode ser definido como um modelo de localização-roteamento multi-objetivo. Shen *et al.*, (2014) utilizam-se de metodologia e objetivo semelhantes para desenvolver um modelo de evacuação de pedestres em parques industriais de indústrias químicas, além disso os autores se utilizam de Modelos de Vulnerabilidade Humana e Funções de Satisfação de Tempo para determinar os níveis seguros de exposição dos evacuados durante o percurso.

Kalafatas e Peeta (2009) propõe um modelo de maximização do fluxo da rede viária em face de restrições orçamentárias. Em seu trabalho estudam a possibilidade da criação de novas pistas, inversão de faixas de rolagem, etc. e qual o impacto destas mudanças no orçamento disponível. Em seguida se utilizam de análise de sensibilidade sobre o modelo para avaliar os impactos da distribuição geográfica da população, o tamanho da população e diferentes localizações espaciais de saída em uma rede de transportes fictícia sobre o tempo de evacuação da rede.

Campos *et al.*, (2012) buscam a elaboração de um plano de evacuação em decorrência de um desastre natural. Para isso apresentam uma heurística interativa para definir dois caminhos disjuntos do ponto do desastre até os abrigos existentes, em uma rede de vias (hipotética), considerando tempo de viagem e capacidade da rede de transporte como parâmetros de análise.

Brachman e Dragicevic (2014) desenvolveram um modelo chamado *Network Science Emergency Evacuation Model*, que combina técnicas de otimização, ciência das redes e ferramentas GIS (*Geografic Information System*) em um modelo de Programação Inteira para tentar prever de maneira precisa possíveis pontos de congestionamento durante a evacuação de uma área ao redor de uma indústria química no Canadá. Os autores utilizam-se da ferramenta ALOHA (desenvolvida pela secretaria de gerenciamento de emergências do governo dos Estados Unidos) para definir a área afetada pelo vazamento de determinado produto químico da planta analisada, de modo a prever as vias que não seriam, ou pouco seriam, utilizadas, em uma possível evacuação e, conseqüentemente, o acúmulo de fluxo nas demais vias.

Por fim, Johnson e Zeigler (1986) afirmam que a maior parte dos modelos de evacuação elaborados considera sempre um cenário ideal, onde as pessoas estão em casa, ou trabalho, e atentas aos meios de comunicação. Tais modelos não consideram algumas particularidades de uma população, tais como: Pessoas com necessidades especiais, como deficientes físicos, crianças e idosos; instalações com necessidades especiais, como hospitais e presídios; e minorias étnicas que podem enfrentar dificuldade de comunicação durante uma evacuação de área. Este fato pode ser facilmente observado através da análise dos trabalhos apresentados anteriormente.

### **3. DEFINIÇÃO DAS ROTAS DE FUGA DA REFINARIA**

Como afirmado na sessão de Desastres Industriais deste trabalho, Instalações de Alto Risco (como refinarias de petróleo e indústrias de geração de energia) embora necessárias para o desenvolvimento de uma região, apresentam riscos consideráveis de acidentes, mesmo com todas as medidas de prevenção e normas segurança desenvolvidas e aplicadas atualmente. Tais acidentes podem ser gerados por uma infinidade de fatores e ter sérias consequências à indústria, seus colaboradores e, em casos extremos, a comunidade na qual está inserida.

Por isso, este estudo tem como objetivo apresentar um modelo matemático para seleção de rotas de fuga para os colaboradores dentro de uma refinaria de petróleo, auxiliando a elaboração de um Plano de Evacuação de Área (PEA) para situações de emergência.

Um Plano de Evacuação de Área contempla ações específicas a serem desenvolvidas para garantir que todas as pessoas presentes na refinaria sejam conduzidas para locais pré-definidos, identificados e considerados seguros para a concentração do pessoal evacuado.

Considerando que uma evacuação possa ser apenas preventiva, existirão sempre duas fases (ou estágios) na evacuação de uma refinaria. Na primeira fase as pessoas serão reunidas em um ponto seguro e próximo a unidade produtiva a qual estão designadas, chamado Ponto de Reunião (PR). Se necessário, na segunda fase as pessoas serão deslocadas para fora da refinaria, de forma a ficarem mais afastadas dos riscos.

Segundo os procedimentos da refinaria, os riscos identificados que poderão determinar uma evacuação parcial ou total da área são decorrentes de incêndio de grande proporção com possibilidades de explosões, grande vazamento de gases tóxicos (como benzeno e sulfeto de hidrogênio) ou vapores inflamáveis (como Cloro e Amônia).

A aplicabilidade do modelo proposto será demonstrada através de sua aplicação sob a ótica de cenários de acidentes hipotéticos. Para isso, será simulado o vazamento de Sulfeto de Hidrogênio ( $H_2S$ ) de um dos tanques de armazenamento da refinaria, impactando a escolha dos PR a serem utilizados e das rotas de fuga possíveis para pessoas e veículos.

### 3.1. DETERMINAÇÃO DA ÁREA AFETADA PELO VAZAMENTO

Para modelar a evacuação de uma área afetada por vazamento de um produto químico/tóxico é necessário saber a extensão da área afetada pela dispersão do produto. Para isto, foram utilizados os *softwares* ALOHA (*Areal Locations Of Hazardous Atmospheres*) e MARPLOT (*Mapping Application for Response, Planning and Local Operational Tasks*), desenvolvidos pela Agencia de Proteção Ambiental dos Estados Unidos.

O ALOHA é uma ferramenta para modelagem de dispersão atmosférica utilizada para avaliar e analisar dispersão de nuvens tóxicas oriundas de vazamentos de produtos químicos. A ferramenta permite estimar a dispersão de uma nuvem tóxica baseado nas características tóxico-físicas do material químico estudado, condições atmosféricas (como direção do vento, umidade relativa do ar e temperatura) e topologia do local. A ferramenta é capaz de indicar as áreas afetadas por um vazamento de um produto químico, chamadas zonas de risco, para diversas formas de incidentes como dispersão de nuvens de gás tóxico, incêndios e explosões. Estas zonas de risco podem ser mostradas em diferentes mapas através da ferramenta MARPLOT, permitindo a visualização das áreas afetadas. (EPA, 2016)

A ferramenta MARPLOT é um Sistema de Informações Geográficas (GIS) que possui diversas opções de mapas (Imagens por satélite, ruas e avenidas, etc.) que podem ser utilizados como base para planejamento de emergências. O usuário pode adicionar diversos objetos nos mapas apresentados, como as zonas de risco apresentadas pelo ALOHA ou informações para contatos de emergência em escolas ou hospitais identificados no mapa, por exemplo. (EPA, 2016)

A Figura 3 a seguir apresenta um exemplo da aplicação das ferramentas ALOHA e MARPLOT para a modelagem de zonas de risco devido a radiação térmica oriunda de incêndio causado por vazamento de propano.

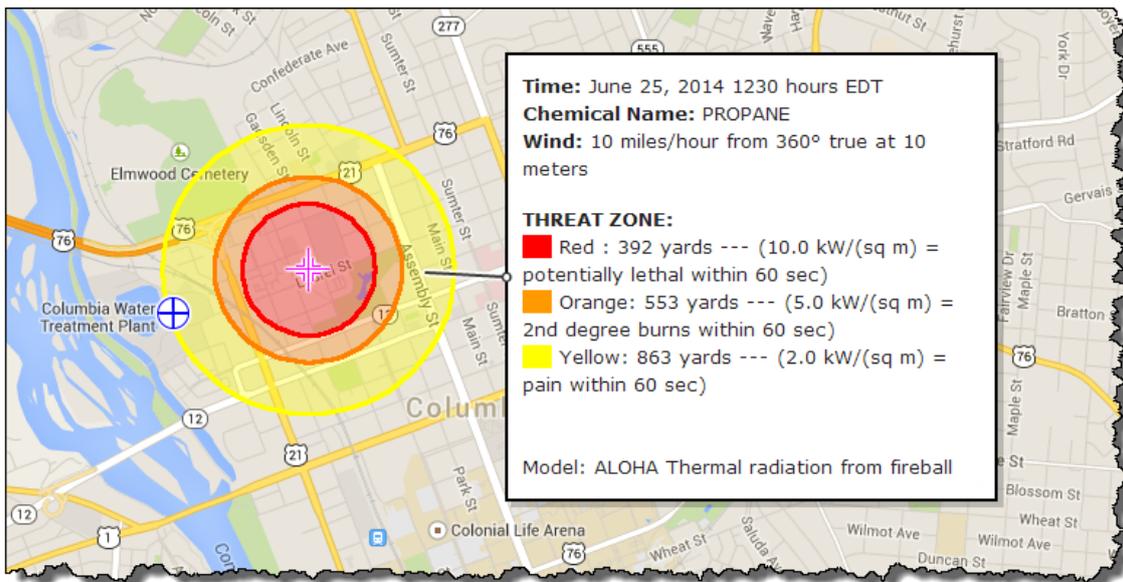


Figura 3: Exemplo da aplicação das ferramentas ALOHA e MARPLOT para vazamento de propano

ALOHA e MARPLOT fazem parte da CAMEO *software suite*, um conjunto de ferramentas computacionais criadas para auxiliar o planejamento e resposta à emergências. Dentre as ferramentas encontram-se bases de dados sobre produtos químicos e suas características, modelos de dispersão de produtos químicos e ferramentas de mapeamento geográfico (GIS).

### 3.2. MODELO MATEMÁTICO

Como dito anteriormente, a evacuação da refinaria ocorrerá sempre em dois estágios. Em um primeiro momento, as pessoas serão deslocadas de suas unidades para um dos PR disponíveis, sem exceder sua capacidade. Este deslocamento inicial é feito a pé pelos colaboradores, guiados por brigadistas treinados e devidamente instruídos nos caminhos a serem seguidos até o PR designado a cada unidade.

No segundo estágio, as pessoas são direcionadas às saídas da refinaria dentro de ônibus, sempre respeitando a capacidade máxima de transporte de cada veículo.

Por isso, o modelo matemático proposto neste estudo também será dividido em dois estágios. No primeiro estágio o objetivo é encontrar as rotas que cada colaborador deve percorrer a partir de sua unidade até um dos PR pré-determinados. No segundo estágio, o objetivo é encontrar as rotas que cada um dos ônibus deve percorrer, a partir de um dos estacionamentos, para recolher as pessoas de um dos PR e se dirigir a saída, de forma segura e o mais rapidamente possível.

A seguir serão apresentadas as formulações matemáticas de cada um dos estágios do modelo proposto para elaboração do PEA.

### **3.2.1. Estágio 1 – Roteamento de colaboradores aos Pontos de Reunião**

Como dito anteriormente, o objetivo deste estágio é encontrar as rotas que cada colaborador deve seguir, a partir da unidade produtiva em que se encontra, até um dos PR.

O modelo apresentado a seguir segue uma formulação de fluxo em grafos cuja função objetivo é minimizar a maior distância que os colaboradores precisam percorrer até chegar ao PR.

O mapa da refinaria, apresentado na Figura 4, é transformado em um grafo, apresentado na Figura 10, da seguinte forma: Cada arco do grafo representa uma via distinta da refinaria e cada vértice representa uma intercessão de vias (uma esquina). De modo que um arco  $(m, n)$  representa a via que une as intercessões de vias  $m$  e  $n$ . O grafo resultante é mostrado na Figura 10.

Para completar o grafo são criados dois vértices fictícios, uma origem e um sumidouro de onde partirão todos os trabalhadores e para onde eles se dirigirão, respectivamente. Além disso, serão criados 16 outros vértices fictícios adjacentes ao vértice origem do grafo, representando as 16 unidades da refinaria. Os funcionários de uma unidade  $u$  obrigatoriamente ativarão o arco  $(origem, u)$ . Os demais arcos partindo de  $u$  são as vias que dão acesso às unidades da refinaria. Da mesma forma, são criados 11 novos vértices fictícios representando os PR, que serão adjacentes ao vértice sumidouro, o arco  $(PR, sumidouro)$  será ativado pelas pessoas de uma unidade  $u$  caso o PR seja o destino dos evacuados da unidade  $u$ .

Algumas premissas foram adotadas para elaboração deste modelo:

- i. Todas as pessoas presentes em uma unidade devem se dirigir a um mesmo PR, isto porque podem existir pessoas fora de suas estações de trabalho habituais, e mesmo fora de suas unidades produtivas, no momento de uma emergência e seria inviável rastrear pessoa por pessoa dentro do sistema. Por isso as variáveis não rastreiam pessoas isoladamente, mas as unidades de produção onde se encontram no momento da ordem de evacuação. De modo

que a variável de decisão  $Y_{mnu}$  será considerada binária, indicando se os colaboradores presentes na unidade  $u$  utilizarão o arco  $(m, n)$  para evacuação.

- ii. Mesmo considerando que uma pessoa possa estar fora de sua unidade produtiva durante uma emergência, o fluxo de pessoas entre unidades é homogêneo, de modo que a diferença de pessoas que entram e saem de uma unidade é irrelevante.
- iii. As vias para pedestres na refinaria são suficientes para o escoamento do efetivo sem atrapalhar o trânsito de veículos, por isso sua capacidade de fluxo será considerada  $+\infty$  neste estágio do modelo.
- iv. Se um PR estiver dentro de uma das zonas de riscos identificadas pelo ALOHA ele não deverá receber pessoas, de modo a não expô-las a riscos desnecessários. Por isso será criada uma constante binária  $\gamma$  que receberá valor 0 se o PR estiver contido em uma zona de risco, e 1 caso contrário. Esta constante será multiplicada da capacidade do PR, de modo a inutilizá-lo caso seu valor seja nulo. Da mesma forma, vias que se encontram dentro de uma das zonas de risco não deverão ser utilizadas para evacuação de colaboradores, de modo que a constante  $\gamma$  também será multiplicada pela capacidade de deslocamento das vias.
- v. Se uma unidade estiver dentro de uma das zonas de risco, suas vias de acesso estarão contidas em uma das zonas de risco identificadas, porém precisarão ser utilizadas para evacuar a unidade, de modo que para este cenário a constante  $\gamma$  receberá valor 1, permitindo a utilização das vias.

A seguir, serão apresentadas e explicadas as variáveis de decisão e constantes utilizadas, além do modelo desenvolvido para o primeiro estágio do problema.

Variáveis de Decisão:

$Y_{mnu}$

= Indica se as pessoas de uma unidade  $u$  passaram pelo arco  $mn$  (binária)

Constantes:

$d_{mn}$  = distância entre os vértices  $m$  e  $n$

$N_u$  = número de pessoas na unidade  $u$

$C_{prj}$  = capacidade do ponto de encontro  $j$

$C_{mn}$  = capacidade de fluxo no trecho  $mn$

$\gamma_l = \{0,1\}$ , onde  $\gamma = \begin{cases} 1 & \text{se o PR} \in \text{zona de risco} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$

$l$  = índice das zonas de risco existentes

$P$  = fluxo total = número total de unidades

$A_m$  = conjunto de vértices adjacentes ao vértice  $m$

$V$  = conjunto de vértices

Modelo:

Função objetivo – Minimizar a maior distância percorrida pelos colabores de uma unidade  $u$  ate chegar ao ponto de reunião  $PR$

$$\text{Min } R \quad (1)$$

Sujeito a:

$$R \geq \sum_{m \in V, n \in A_m} Y_{mnu} * d_{mn}, \quad \forall u \in \text{Unidades} \quad (2)$$

$$\sum_{n \in A_m} Y_{mnu} - \sum_{n \in A_m} Y_{nm u} = 0, \quad \forall m \in V, u \in \text{unidades} \quad (3)$$

$$\sum_{u, m \in A_j} Y_{mju} * N_u \leq C_{prj} * \gamma_l, \quad \forall j \in PR \quad (4)$$

$$\sum_{n \in \text{unidades}} Y_{o u n} = 1, \quad \forall u \in \text{unidades} \quad (5)$$

$$\sum_u Y_{mnu} \leq C_{mn} * \gamma_l, \quad \forall m \in V, n \in A_m \quad (6)$$

$$\sum_{u,m \in A_j} Y_{mju} * N_u \leq CO * C_{mj} * |A_j|, \quad \forall j \in PR \quad (7)$$

$$Y_{sou} = 1, \quad \forall u \in V \quad (8)$$

$$Y_{oun_u} = 1, \quad \forall u \in unidades \quad (9)$$

$$Y_{mnu} \in \{0, 1\}, \quad \forall m, n \in \text{vértices}, u \in unidades \quad (10)$$

A restrição (2) completa a função objetivo, tornando o problema em um problema de minimizar a maior distancia  $R$  que uma pessoa tem de andar ao sair de sua unidade até um ponto de encontro.

A restrição (3) é uma restrição de equilíbrio de fluxo, garantindo que o número de “pessoas” que entra é um vértice é o mesmo que sai.

A restrição (4) garante que o número de pessoas que chega a um ponto de reunião  $j$  seja menor ou igual a capacidade do ponto de reunião. O fator  $\gamma_l$  indica se o PR poderá ser utilizado ou se encontra sobre uma zona de risco.

A restrição (5) garante que todas as unidades sejam evacuadas, isto é, para cada unidade  $u$ , existe um caminho de saída.

A restrição (6) garante que o número de pessoas transitando por um arco seja menor do que a capacidade do arco. Geralmente, esta capacidade é igual a  $\infty$ . O fator  $\gamma_l$  indica se o trecho poderá ser utilizado ou se encontra-se sobre uma zona de risco.

A restrição (7) é uma restrição de projeto, que garante que o número de pessoas que se desloca a um PR é menor do que a capacidade dos veículos de extraí-los durante o segundo estágio da evacuação.

A restrição (8) garante que todas as unidades (e seus colaboradores) cheguem a um PR e saiam do grafo.

A restrição (9) garante que os colaboradores de cada unidade transitem pelo arco inicial que representa a respectiva unidade.

A restrição (10) garante que as variáveis de decisão sejam binárias.

Uma vez que todos os colaboradores encontram-se nos respectivos PR os ônibus são responsáveis por busca-los e retirá-los em segurança da refinaria. O modelo para esta operação é descrito a seguir.

### **3.2.2. Estágio 2 – Roteamento dos ônibus para evacuação dos PR**

O modelo para roteamento dos ônibus proposto também segue uma formulação de fluxo em grafos cujo objetivo é minimizar o tempo necessário para todos os ônibus evacuarem a refinaria, ao partir de um dos estacionamentos, passar por um dos PR para coletar os evacuados e se dirigir a uma das saídas existentes.

Por limitações técnicas, como será explicado na próxima seção, o segundo estágio da evacuação é dividido em duas partes e cada parte é representada por um modelo matemático distinto. Em um primeiro momento, são encontradas as rotas ótimas para que cada veículo saia de um estacionamento e chegue a um dos PR para extração dos evacuados. Em um segundo momento, são encontradas as rotas ótimas para que os veículos evacuem a refinaria a partir dos PR, ao qual foram designados no primeiro momento, em direção a uma das saídas da refinaria.

Os grafos elaborados para ambas as etapas do segundo estágio seguem os mesmos moldes do grafo explicado no primeiro estágio do modelo. Dessa forma os vértices fictícios de origem e sumidouro também são adicionados, assim como 3 arcos fictícios representando os estacionamentos de origem de cada ônibus, 11 arcos fictícios representando os pontos de reunião e 9 arcos fictícios representando as saídas da refinaria.

As premissas adotadas para elaboração de cada etapa deste modelo são:

- i. Cada um dos ônibus utilizado deve, obrigatoriamente, passar por um dos pontos de encontro antes de se dirigir a uma das saídas da refinaria.
- ii. Embora a frota seja homogênea e, conseqüentemente os veículos possuam velocidade máxima de condução igual, as velocidades máximas de segurança permitidas por cada uma das vias é diferente. Por isso o objetivo não é diminuir a distância que os ônibus precisam trafegar, e sim o tempo necessário.

- iii. Caso um conjunto de vértices encontre-se sob uma zona de risco, o tempo necessário para um veículo atravessar estes vértices deverá ser menor do que o tempo máximo de exposição permitido para o acidente em estudo, fornecido pelo ALOHA e por organizações reguladoras e de saúde.

A seguir, são apresentadas e explicadas as variáveis de decisão e constantes utilizadas em ambas etapas do segundo estágio. Em seguida, são apresentados os dois modelos matemáticos desenvolvidos para cada parte do segundo estágio.

Variáveis de decisão:

$X_{mnk}$  = indica se o onibus  $k$  passa pelo arco entre  $m$  e  $n$  (binaria)

$T_{mk}$  = Tempo que um onibus  $k$  leva para chegar ao vértice  $m$

Constantes:

$d_{mn}$  = distancia do vertice  $m$  ao  $n$

$Vel_{mn}$  = Velocidade máxima desenvolvida no trecho  $(m, n)$

$Te_{mn}$  = Tempo de um onibus ir do vertice  $m$  ao  $n$

$$Te_{mn} = \frac{d_{mn}}{Vel_{mn}}$$

$NPR_i$  = Numero de pessoas por ponto de reunião  $i$

$NO_{pr}$  = Numero de onibus que passa por cada PR

$CE_j$  = Capacidade do estacionamento  $j$

$C_{mn}$  = capacidade de fluxo do trecho  $(m, n)$

$L$  = Conjunto de zonas de risco existentes

$\delta_l$  = Tempo de exposição máximo permitido para a zona de risco  $l$

$l$  = indice de zonas de risco existentes

$CO$  = Capacidade dos Onibus

$F$  = Fluxo total = Número total de onibus

$A_m =$  conjunto de vértices adjacentes ao vértice  $m$

$V =$  conjunto de vértices

$o =$  vértice origem

$s =$  vértice sumidouro

### 3.2.2.1. Modelo para seleção de rotas dos veículos a partir dos estacionamentos

Função Objetivo: Minimizar a soma dos tempos necessários para os veículos acessarem os PR

$$\text{Min} \sum_{m \in V, n \in A_m, k} X_{mnk} * T_{e_{mn}} \quad (11)$$

Sujeito a:

$$\sum_{n \in A_m} X_{mnk} - \sum_{n \in A_m} X_{nmk} = 0, \quad \forall m \in V, k \in \text{onibus} \quad (12)$$

$$\sum_k X_{sok} \leq F \quad (13)$$

$$\sum_k X_{ojk} \leq CE_j, \quad \forall j \in \text{estacionamentos} \quad (14)$$

$$\sum_{j \in PR} X_{PR_jsk} \leq 1, \quad \forall k \in \text{onibus} \quad (15)$$

$$\sum_o X_{PR_jsk} * CO \geq NPR_j, \quad \forall j \in PR \quad (16)$$

$$\sum_k X_{mnk} \leq C_{mn}, \quad \forall m \in V, n \in A_m \quad (17)$$

$$T_{nk} \geq (T_{mk} + T_{e_{mn}}) * X_{mnk}, \quad \forall m, n \in \text{vertices} \quad (18)$$

$$T_{nk} - T_{mk} \leq \delta_l, \quad \forall k \in \text{onibus}, m \in V \supset L, n \in A_m, l \in L \quad (19)$$

$$X_{mnk} \in \{0, 1\}, \quad \forall m, n \in \text{vertices}, k \in \text{onibus} \quad (20)$$

A restrição (12) é uma restrição de equilíbrio de fluxo em grafos, garantindo que cada ônibus que entre em um vértice saia deste vértice.

A restrição (13) assegura que o fluxo total de ônibus que evacua a refinaria seja menor ou igual ao número total de ônibus disponíveis.

A restrição (14) garante que o número total de ônibus que parte de um estacionamento seja menor ou igual ao número máximo de ônibus possíveis de serem estacionados em cada estacionamento.

A restrição (15) garante que um ônibus passe por no máximo um dos arcos que representam os pontos de reunião da refinaria.

A restrição (16) garante que a capacidade somada dos ônibus que passam por um PR seja suficiente para evacuar todas as pessoas presentes no PR.

A restrição (17) garante que o número de ônibus que passe por cada arco seja menor ou que a capacidade de escoamento do arco.

A restrição (18) é a restrição de mapeamento dos tempos de viagem para janelas de tempo. Que pode ser linearizada segundo a equação 21 abaixo, onde  $M$  é um número suficientemente grande:

$$T_{nk} \geq T_{mk} + T_{e_{mn}} - M * (1 - X_{mnk}), \quad \forall m, n \in vertices \quad (21)$$

A restrição (19) indica que se um conjunto de vértices encontra-se sob uma zona de risco fornecida, o tempo de transito de um ônibus entre estes vértices deve ser menor do que o tempo máximo tolerado para a exposição ao risco.

A restrição (20) indica a natureza binária das variáveis.

### 3.2.2.2. Modelo para seleção de rotas dos veículos a partir dos PR

Função Objetivo: Minimizar a soma dos tempos necessários para os veículos evacuarem a refinaria a partir de um PR

$$\text{Min} \sum_{m \in V, n \in A_m, k} X_{mnk} * Te_{mn} \quad (22)$$

Sujeito a:

$$\sum_{n \in A_m} X_{mnk} - \sum_{n \in A_m} X_{nmk} = 0, \quad \forall m \in V, k \in \text{onibus} \quad (23)$$

$$\sum_k X_{sok} \leq F \quad (24)$$

$$\sum_{j \in PR} X_{oPRjk} \leq 1, \quad \forall k \in \text{onibus} \quad (25)$$

$$\sum_k X_{oPRjk} = NO_{pr}, \quad \forall j \in PR \quad (26)$$

$$\sum_k X_{mnk} \leq C_{mn}, \quad \forall m \in V, n \in A_m \quad (27)$$

$$T_{nk} \geq (T_{mk} + Te_{mn}) * X_{mnk}, \quad \forall m, n \in \text{vertices} \quad (28)$$

$$T_{nk} - T_{mk} \leq \delta_l, \quad \forall k \in \text{onibus}, m \in V \supset L, n \in A_m, l \in L \quad (29)$$

$$X_{mnk} \in \{0, 1\}, \quad \forall m, n \in \text{vertices}, k \in \text{onibus} \quad (30)$$

É fácil perceber que as restrições da segunda etapa do segundo estágio são as mesmas da primeira etapa, com exceção das restrições (25) e (26) que substituem as restrições (14), (15) e (16) da primeira etapa. A restrição (25) indica que cada um dos ônibus deve partir de um único PR. A restrição (26) indica que o número de ônibus que sai de um PR é igual ao número de ônibus que entra. A restrição (28) pode ser linearizada segundo a equação (21) apresentada anteriormente.

## 4. EXPERIMENTAÇÃO

Para demonstrar a aplicabilidade do modelo apresentado o mesmo foi implantado em uma refinaria de grande porte através da simulação de um vazamento de H<sub>2</sub>S da área de armazenagem da refinaria.

O modelo foi aplicado utilizando a ferramenta Xpress IVE 7.7, executado em um sistema *Windows 7* (32 bits) com 2GB de memória principal e processador dual core AMD Athlon 7750. Estas configurações demonstram a limitação técnica durante a execução do modelo, que é discutida na seção 4.4 deste trabalho.

Porém, para aplicar o modelo para a seleção de rotas de fuga da refinaria é necessário identificá-la, bem como suas características e as características do acidente proposto, de modo a entender como sua configuração impacta o modelo proposto.

### 4.1. A REFINARIA

Antes de apresentar os dados relativos a refinaria estudada é importante ressaltar dois pontos relevantes em relação aos dados apresentados a seguir:

- i. Os dados relativos ao posicionamento geográfico das unidades produtivas e estacionamentos da refinaria e seu efetivo são hipotéticos, devido a restrições de divulgação de dados estratégicos da refinaria em questão.
- ii. Os dados relativos à rede de vias utilizadas para evacuação da refinaria, posição relativas das saídas em relação às vias, a posição dos PR e o mapa apresentado posteriormente para identificá-los são reais, uma vez que sua divulgação não compromete informações relevantes da refinaria nem permitem identificá-la. O mesmo vale para os dados relativos aos veículos utilizados para evacuação dos colaboradores.

#### 4.1.1. Colaboradores e Unidades Produtivas

A refinaria em questão possui 3945 colaboradores, distribuídos por 16 unidades produtivas (prédios administrativos são considerados unidades produtivas neste estudo, por motivos de simplificação). A Tabela 5, a seguir, apresenta a relação de colaboradores por unidade da refinaria.

Tabela 5: Relação de colaboradores por unidade

<i>Un.</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
<b>Col.</b>	282	47	7	19	244	213	52	260
<i>Un.</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>
<b>Col.</b>	1182	117	14	22	193	615	168	510

As unidades são numeradas (e nomeadas) no intervalo 1..16 para simplificação de aplicação e compreensão, e sua localização pode ser observada na Figura 4 a seguir:



Figura 4: Localização das unidades produtivas da refinaria

#### 4.1.2. Pontos de reunião e suas capacidades

A refinaria possui 11 PR distribuídos pela refinaria conforme a Figura 5 a seguir:



Figura 5: Localização dos pontos de reunião da refinaria

A capacidade de cada um dos PR impacta a quantidade de pessoas que cada ponto de encontro pode receber de forma segura em uma situação de emergência. Caso um ponto de encontro atinja com sua capacidade total, as demais pessoas deverão ser encaminhadas para outro PR. A relação da capacidade de cada um dos PR pode ser encontrada na Tabela 6.

Tabela 6: Relação de PR e suas respectivas capacidades

<i>PR</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
<b>Capac.</b>	800	700	1100	1400	750	400	500	1050	1200	800	600

#### 4.1.3. Frota de veículos e estacionamentos

A frota de veículos utilizados para evacuação da refinaria é homogênea, isto é, possui apenas um tipo de veículo e todos os veículos possuem a mesma capacidade de transporte.

A frota é composta por 70 ônibus com capacidade de transporte de 90 pessoas com segurança, ou seja, a frota possui uma capacidade de transporte total de 6300 pessoas. Todos os 70 ônibus ficam estacionados durante todo o expediente da refinaria, estando à disposição a qualquer momento necessário.

Os ônibus ficam distribuídos por 3 estacionamentos distintos dentro da refinaria, segundo a Tabela 7 a seguir.

Tabela 7: Relação de número de ônibus por estacionamentos

<i>Estacionamento</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Total</i>
<b>Capacidade</b>	30	20	20	70

A localização geográfica dos estacionamentos dentro da refinaria é exibida na Figura 6.



Figura 6: Localização dos estacionamentos da refinaria

#### 4.1.4. Saídas da refinaria

A refinaria possui um conjunto de 9 saídas que podem ser utilizadas para evacuação dos veículos. A capacidade das saídas é irrelevante no problema, uma vez que todas são suficientemente amplas para permitir a passagem de 4 ônibus por vez, permitindo fluidez durante a evacuação da área.

É importante ressaltar que em caso de emergência os colaboradores não têm permissão para deixar a refinaria a pé ou com meios próprios, todos devem se encaminhar para um dos PR para em seguida serem evacuados. Isto porque os ônibus fazem a retirada dos trabalhadores não apenas da refinaria, mas as levam para locais pré-determinados suficientemente afastados da refinaria, evitando que pessoas fiquem próximas à refinaria desnecessariamente.

A localização geográfica das saídas da refinaria é apresentada na Figura 7.



Figura 7: Localização das saídas da refinaria

#### 4.1.5. Vias da refinaria

As vias da refinaria podem ser observadas nas imagens apresentadas acima. A capacidade de trânsito considerada para cada via é de seis veículos.

As vias ressaltadas na cor laranja, observadas na Figura 7 possuem velocidade máxima de trânsito de 54 km/h, as demais vias possuem velocidade máxima de trânsito de 30 km/h.

A distância entre os vértices do grafo, i.e., o comprimento das vias da refinaria é apresentado no anexo I deste trabalho.

#### 4.2. DEFINIÇÃO DO ACIDENTE E SUAS CONDIÇÕES

O acidente simulado neste estudo é o vazamento de Sulfeto de Hidrogênio ( $H_2S$ ) de um dos tanques de armazenamento na área de estocagem da refinaria.

O Sulfeto de Hidrogênio é um gás incolor, inflamável (com a mistura ar/gás sendo explosiva) e altamente tóxico, conhecido pelo seu odor de “ovo podre” em baixas concentrações. É encontrado naturalmente em petróleo bruto, poços de gás natural, fontes termais e vulcões. Também é produzido pela decomposição de material orgânico e em dejetos de animais, como esgoto. Além disso, é utilizado e/ou gerado como subproduto em diversas indústrias, tais como extração e refino de gás e petróleo, mineração, tratamento de esgoto e produção de papel (OSHA, 2005).

Por ser mais denso que o ar o H<sub>2</sub>S pode se acumular em espaços mal ventilados próximos ao solo, como bueiros e galerias subterrâneas para passagem de tubulações e sistemas de comunicação, tornando trabalhos em espaços confinados potencialmente perigosos (OSHA, 2005).

A principal forma de exposição ao gás é através da inalação, uma vez que o gás é rapidamente absorvido pelos pulmões. Os efeitos a saúde causados pela exposição ao H<sub>2</sub>S dependem da concentração inalada pelo indivíduo e do tempo de exposição, e variam desde efeitos leves, como dores de cabeça e irritação nos olhos a problemas graves de saúde como edemas pulmonares, inconsciência e morte (OSHA, 2005). A Tabela 8, elaborada pela OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*), órgão ligado ao departamento de trabalho dos Estados Unidos, apresenta os efeitos da exposição ao H<sub>2</sub>S em cada indivíduo.

Tabela 8: Efeitos da exposição ao H<sub>2</sub>S

<b>Concentração (ppm)</b>	<b>Sintomas/efeitos</b>
0.00011-0.00033	Níveis normais no ar
0.01-1.5	Odor de ovo podre começa a ser sentido.
2-5	Exposição prolongada pode causar náusea, lacrimação dos olhos, dores de cabeça, perda de sono e problemas respiratórios para pacientes com asma.
20	Fadiga, perda de apetite, dores de cabeça, irritabilidade, perda de memória e tontura.
50-100	Conjuntivite e irritação no trato respiratório
100	Após 2 minutos: Tosse, irritação nos olhos, perda do olfato. Após 15 minutos: Dificuldades para respirar, tontura, irritação na garganta. Aumento gradual da gravidade dos sintomas após algumas horas. Após 48 horas: morte.
100-150	Perda de olfato (paralisia olfativa).
200-300	Conjuntivite e irritação do trato pulmonar. Edemas pulmonares após 1 hora.

Concentração (ppm)	Sintomas/efeitos
500-700	Até 5 minutos: Gagueira e inconsciência. Até 30 minutos: Sérios danos aos olhos. Após 30 minutos: Morte
700-1000	Rápida perda de consciência. Respiração é interrompida após 1 ou 2 inspirações do gás. Morte em minutos
1000-2000	Morte praticamente instantânea.

Fonte: <https://www.osha.gov/SLTC/hydrogensulfide/hazards.html>, acesso em 04/02/2016

Ainda segundo OSHA (2005), pessoas que inalaram H<sub>2</sub>S suficiente a ponto de perder a consciência podem sofrer efeitos em longo prazo, como perda de memória e déficit de atenção e problemas de coordenação motora e problemas cardiovasculares. Pessoas com asma são mais suscetíveis a exposição ao H<sub>2</sub>S.

Para simulação do vazamento o ALOHA necessita de informações precisas a respeito das condições locais no momento do acidente. Os dados utilizados para simulação serão apresentados a seguir, na mesma ordem em que são solicitados pela ferramenta.

Uma segunda simulação, de um segundo caso, é realizada utilizando as mesmas informações, modificando apenas a direção do vento no local segundo o período do dia. Isto é feito para comparar e analisar a resposta do modelo em diferentes situações.

#### 4.2.1. Condições ambientais e do solo

- O vento local viaja da direção Sul-Sudeste (SSE) a uma velocidade de 11.2 km/h, direção e velocidade predominantes na região da refinaria, e sua velocidade é medida a uma altura de 3 m acima do solo.
- O terreno ao redor dos tanques de armazenagem é gramado, em sua grande maioria, com exceção das vias de acesso e ruas, e existem poucos edifícios ao redor, de modo que o local é considerado “campo aberto” e não há necessidade de especificação direta da rugosidade do solo.
- O céu está claro e com poucas nuvens, a temperatura do ar no local é de 23 ° C no período da manhã.
- A umidade relativa do ar está em 50 %.

#### 4.2.2. Condições do vazamento

- O  $H_2S$  é armazenado em um tanque cilíndrico, vertical, de 500 galões de capacidade. Possui de 1,21 m de diâmetro e 1,62 m de altura. A substância é armazenada na forma líquida e a temperatura ambiente.
- Funcionários afirmam que o tanque está com sua capacidade total, pois foi carregado no início do dia, de modo que sua capacidade será considerada 100 % do tanque (500 galões). A massa do tanque cheio é igual a 1.65 tons.
- A substância está vazando do tanque através de um furo e não está queimando.
- O tanque possui uma fissura circular de 15,24 cm de diâmetro, que se encontra a 25,4 cm de altura em relação ao fundo do tanque.
- O resultado deste vazamento é uma nuvem de vapor tóxica estacionária, conforme calculado pelo ALOHA.

#### 4.3. AREAS AFETADAS PELO VAZAMENTO

Após inserir os dados atmosféricos e da forma do vazamento a ferramenta apresenta as extensões das zonas de risco para o vazamento e a concentração de  $H_2S$  em cada zona de risco, como mostrado na Figura 8 a seguir.

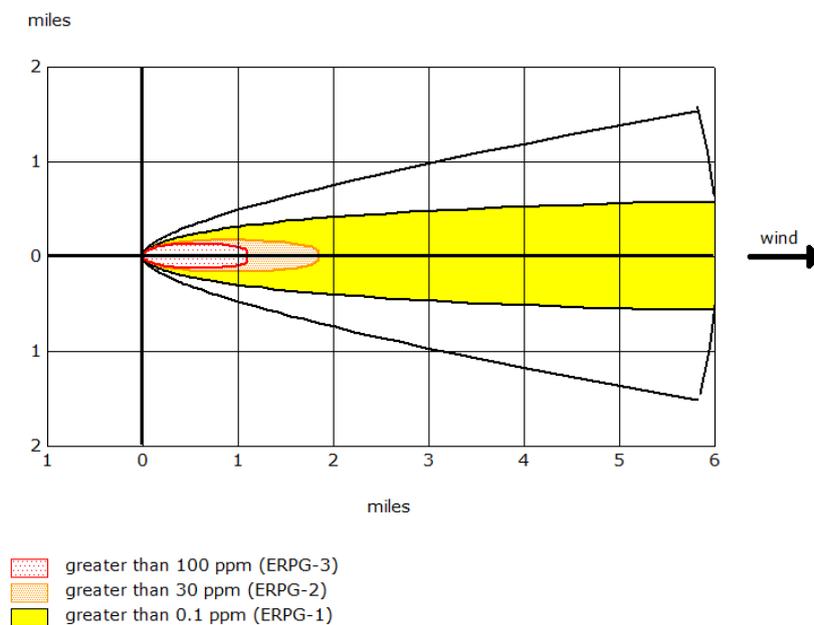


Figura 8: Extensão das áreas de risco para vazamento de benzeno

Este resultado pode ser transportado para o MARPLOT para identificar as zonas de risco dentro da refinaria, ou de um mapa qualquer, através da integração dos sistemas, como mostrado na Figura 9 a seguir.



Figura 9: Zonas de risco sobrepostas ao mapa da refinaria utilizando MARPLOT

Através das Figura 8 e Figura 9 e da Tabela 8, é possível identificar o tempo limite de exposição para cada área de risco apresentada. Neste trabalho foi considerada apenas a zona de risco vermelha, que apresenta uma concentração de 100 ppm de  $H_2S$ , uma vez que os riscos a saúde das zonas de risco amarela e laranja são muito pequenos e se estendem muito além dos limites da refinaria. A tolerância a exposição de 100 ppm sem danos a saúde, incluindo tontura (afetando a capacidade dos motoristas dos veículos de conduzir os evacuados), é de 2 minutos, por isso neste estudo o tempo tolerado  $\delta$  será considerado 1,5 minutos (90 segundos).

A Figura 10 apresenta os arcos afetados pelo vazamento após a sobreposição das zonas de risco com o mapa da refinaria. Os arcos apresentados em vermelho são os arcos afetados pelas zonas de risco. É importante observar que a unidade 5 está sobre uma das zonas de risco, de modo que uma de suas vias de acesso precisa ser liberada para evacuação dos funcionários. Por orientação do corpo de bombeiros e brigadistas as pessoas devem se deslocar perpendicularmente ao vento em situações de vazamento de substâncias tóxicas, de modo que o arco mostrado em verde é liberado para circulação de pessoas para evacuar a unidade.

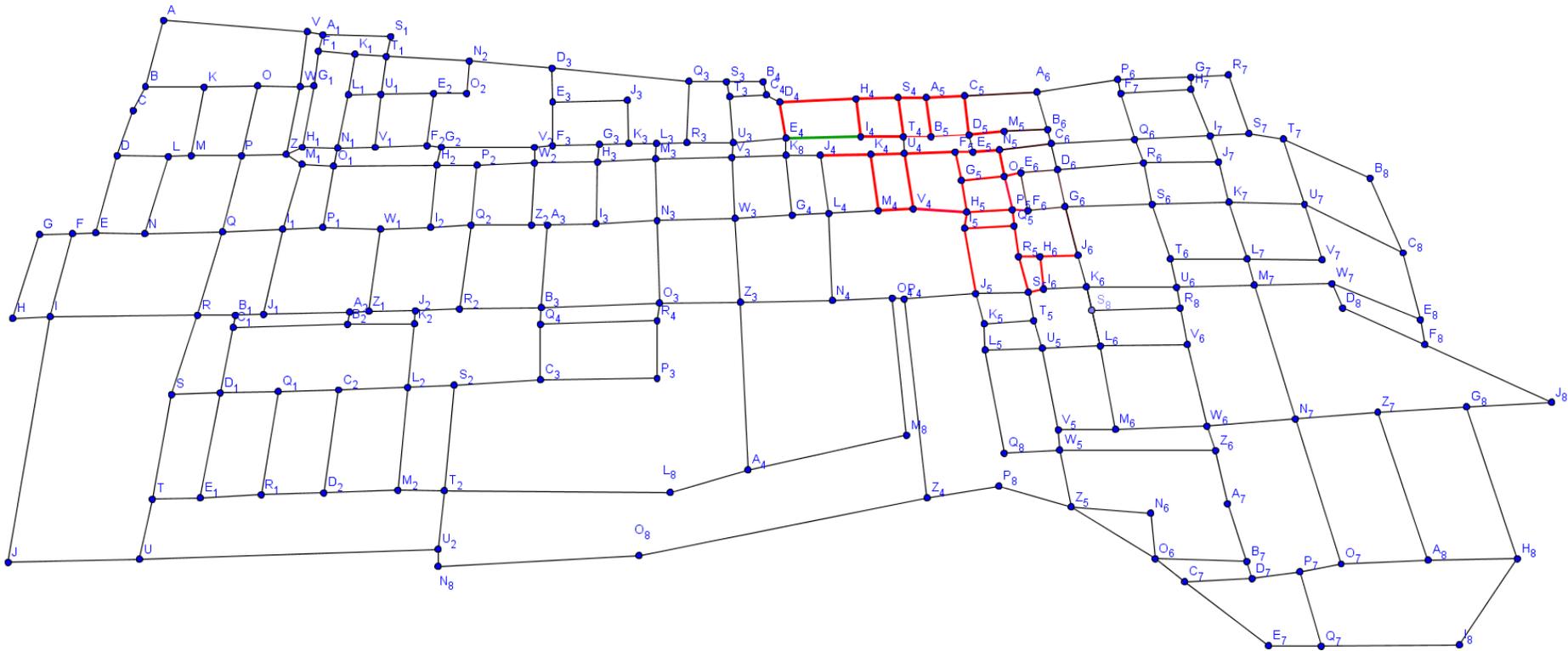


Figura 10: Arcos (vias) afetados pelo vazamento de H<sub>2</sub>S

#### 4.4. CARACTERÍSTICAS DE IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

##### 4.4.1. Limitação de memória e utilização de matrizes esparsas

Para facilidade de interpretação do modelo e dos resultados obtidos, optou-se neste trabalho por utilizar variáveis de decisão com 3 índices ( $X_{mnk} / Y_{mnu}$ ). Uma vez que é mais intuitivo trabalhar com uma matriz de adjacência de vértices do que com uma lista de arcos  $(m, n)$ , como é comumente utilizado em modelos de roteamento com 2 índices ( $X_{(m, n), k}$ ). Porém, esta abordagem de variáveis com 3 índices necessita de uma grande quantidade de memória das máquinas que executarão os algoritmos, uma vez que uma matriz de adjacências apresenta a relação de adjacência entre todos os vértices existentes no grafo, tornando esta abordagem mais custosa computacionalmente do que a abordagem com 2 índices.

Para solucionar o problema do alto custo computacional que esta abordagem impõe, o modelo foi implementado transformando as matrizes X e Y em matrizes esparsas, uma vez que tais matrizes possuem uma grande quantidade de elementos nulos que não representariam variáveis reais (não representam arcos válidos para tráfego de pessoas e veículos). Tal abordagem reduziu significativamente o número de variáveis existentes no modelo e, conseqüentemente, a quantidade de memória utilizada. De fato, é fácil perceber que a quantidade de variáveis criadas com as matrizes esparsas é exatamente a mesma quantidade de variáveis utilizadas pela abordagem com 2 índices, uma vez que foram criados apenas os elementos da matriz cujos vértices representantes são adjacentes, i. e., formam um arco entre si.

##### 4.4.2. Seleção das funções objetivo do segundo estágio

O modelo inicialmente proposto para o segundo estágio da evacuação tinha como objetivo minimizar o maior tempo percorrido pelos veículos da refinaria a fim de evacuar todos os PR de modo que nenhum funcionário permanecesse tempo excessivo na refinaria enquanto os demais são evacuados.

Porém, existem muitas rotas diferentes possíveis para que um determinado veículo faça a extração de um dos PR e se dirija a uma das saídas da refinaria. De modo que, considerando as diversas rotas existentes possíveis para um único veículo, todas elas podem ser consideradas parte da solução ótima, desde que sejam menores do que a rota

de maior tempo encontrada. Além disso, 70 veículos são disponibilizados para evacuação dos colaboradores.

Estes fatores fazem com que existam muitas soluções de mesmo valor para um modelo de minimizar o maior tempo, visto que existem muitas soluções possíveis com o mesmo valor para a função objetivo. Isto implica na incapacidade da relaxação linear do modelo de encontrar novos limitantes duais em tempo aceitável, uma vez que a relaxação encontra diversas soluções distintas com o mesmo valor.

Por isso, a função objetivo dos modelos do segundo estágio foi modificada para minimização do somatório dos tempos necessários para evacuar a refinaria, visto que qualquer arco distinto que qualquer um dos veículos utilize acrescentará um valor diferente à função objetivo e, conseqüentemente, impactará no resultado da relaxação linear, reduzindo o tempo necessário para a execução do modelo. Isto se torna ainda mais importante considerando-se que o modelo proposto é utilizado em situações de emergência que necessitam de respostas rápidas.

O mesmo principio é válido para o primeiro estágio do modelo, caso o número de unidades a serem evacuadas seja grande. No estudo apresentado, com 16 unidades, não é necessária a modificação da Função Objetivo, visto que a execução leva pouco mais de 3 minutos.

## 5. RESULTADOS OBTIDOS

O modelo apresentado neste trabalho pode ser considerado um modelo de localização – roteamento, já que permite não apenas identificar as melhores rotas que devem ser utilizadas para a evacuação dos colaboradores da refinaria, mas também quais os PR, estacionamentos e saídas da refinaria devem ser utilizados. Os resultados obtidos através da aplicação do modelo para o primeiro cenário (evacuação da refinaria no horário administrativo, turno manhã) serão apresentados a seguir. Em seguida são apresentados, brevemente, os resultados da aplicação do modelo no turno da noite da refinaria, modificando a direção em que o vento incide sobre a refinaria.

### 5.1. ROTAS SELECIONADAS PARA EVACUAÇÃO DAS UNIDADES

A aplicação do primeiro estágio do modelo permitiu identificar as rotas ótimas para a evacuação dos trabalhadores de cada uma das 16 unidades produtivas para um dos PR disponíveis, a distância percorrida pelos colaboradores de cada unidade, os PR a serem utilizados e o número de pessoas atribuídas a cada um dos PR durante a evacuação devido ao acidente simulado.

A distância máxima  $R$  percorrida por um colaborador para evacuar sua unidade em direção a um dos PR é de 681 metros, percorridos pelos colaboradores da unidade 12 para que se dirijam ao PR 8. A rota percorrida pelos colaboradores da unidade 12 é mostrada na Figura 11.

Além disso, através da análise dos resultados é possível identificar para quais PR os funcionários de cada unidade deverão se dirigir, como mostrado na Tabela 9. As rotas utilizadas para sua evacuação são mostradas na Tabela 11.

Tabela 9: Funcionários de unidades alocados por PR

PR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Funcionários alocados	Un1	Un2	Un3	Un9, Un10	Un5, Un8	Un6, Un7	--	Un12	Un4, Un14, Un16	--	Un11, Un13, Un15

Com isso, pode-se identificar o número de pessoas alocadas a cada um dos PR, como mostrado na Tabela 10. Nota-se ainda que os PR 7 e 10 não são utilizados para evacuação durante o acidente simulado.

Tabela 10: Número de pessoas designadas a cada um dos PR

PR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Nº pessoas	282	47	7	1299	504	265	0	22	1144	0	375

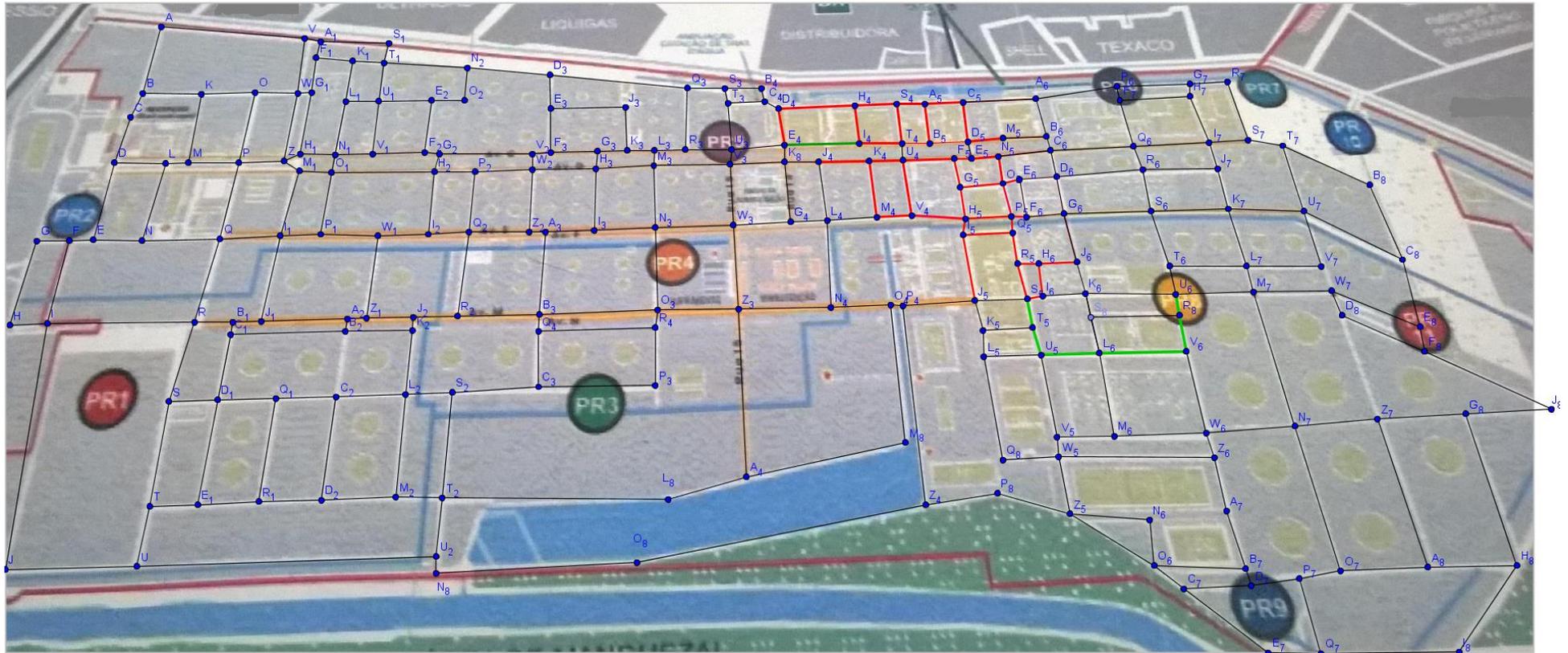


Figura 11: Rota para evacuação da Unidade 12 (em verde claro)

A Tabela 10 também serve como entrada de dados para o segundo estágio do modelo, identificando o número de pessoas que necessitam de extração em cada um dos PR, como será mostrado a seguir.

A Tabela 11 a seguir apresenta as rotas encontradas para deslocamento dos colaboradores de suas unidades aos PR aos quais são alocados.

Tabela 11: Rotas ótimas para evacuação dos colaboradores de cada unidade

<b>Unidade</b>	<b>Rota para evacuação</b>	<b>Distância percorrida (m)</b>
1	Un1 → L0 → N0 → Q0 → R0 → PR1	639
2	Un2 → N0 → E0 → PR2	128
3	Un3 → P3 → PR3	0
4	Un4 → O6 → C7 → PR9	98
5	Un5 → I4 → E4 → PR5	196
6	Un6 → A6 → PR6	0
7	Un7 → H7 → G7 → PR6	32
8	Un8 → V3 → U3 → PR5	38
9	Un9 → W3 → N3 → O3 → PR4	418
10	Un10 → O3 → PR4	0
11	Un11 → C8 → E8 → PR11	180
12	Un12 → S5 → T5 → U5 → L6 → V6 → R8 → U6 → PR8	681
13	Un13 → R8 → U6 → M7 → W7 → PR11	463
14	Un14 → W5 → Z5 → O6 → C7 → PR9	507
15	Un15 → E8 → PR11	0
16	Un16 → Z5 → O6 → C7 → PR9	356

É importante observar que as rotas com distância 0 são aquelas cujas unidade produtivas são adjacentes à Pontos de Reunião, por isso possuem um único vértice intermediário (o de acesso aos PR) entre as unidades e o PR.

## 5.2. ROTAS SELECIONADAS PARA EVACUAÇÃO DOS PONTOS DE REUNIÃO ATRAVÉS DE VEÍCULOS.

O segundo estágio do modelo permite identificar as melhores rotas para os veículos executarem a extração dos funcionários reunidos em cada um dos PR, alocados no primeiro estágio do modelo. Além disso, permite identificar quais os estacionamentos devem ser utilizados, o número de veículos alocados em cada estacionamento, número de veículo necessários para a extração de cada um dos PR e as saídas que devem ser utilizadas para cada veículo.

### 5.2.1. Aplicação da primeira parte do segundo estágio do modelo

Através da execução da primeira parte do segundo estágio foram encontradas as rotas ótimas para cada veículo, partindo de um dos estacionamentos existentes, realizar a extração dos funcionários evacuados e alocados nos pontos de reunião, bem como o tempo necessário para cada veículo chegar aos PR ao qual está alocado, como mostrado na Tabela 14.

O maior tempo necessário para um veículo partir de um estacionamento e chegar a um PR é de 359,25 segundos, tempo para que o ônibus 2 parta do estacionamento 3 e atinja o PR 9. A rota percorrida pelo veículo é apresentada na Figura 12. A soma dos tempos para que todos os ônibus atinjam os PR aos quais estão designados (Função Objetivo) é 7617,27 segundos.

A quantidade de veículos necessários para evacuar cada um dos PR é organizada na Tabela 12, esta informação é utilizada como entrada de dados para segunda parte do segundo estágio do modelo.

Tabela 12: Número de veículos necessários para evacuação de cada um dos PR

PR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Nº Veículos	4	1	1	15	6	3	0	1	13	0	5

Também é possível identificar o número de veículos que parte de cada um dos estacionamentos e, com isso, o número total de veículos necessários para evacuação da refinaria, como mostrado na Tabela 13.

Tabela 13: Número de veículos alocados por estacionamento

PR	1	2	3	Total
Nº Veículos / estacionamento	9	20	20	49

As rotas ótimas para que cada veículo parta de um estacionamento e atinja um dos PR são detalhadas na Tabela 14 a seguir

Tabela 14: Rotas selecionadas para movimentação dos veículos dos estacionamentos até os PR

Ônibus	Rota utilizada para evacuação	Tempo (s)	PR Evacuado
8	Est1 → T0 → S0 → PR1	34,625	1
21	Est1 → T0 → S0 → PR1	34,625	1
34	Est1 → T0 → S0 → PR1	34,625	1
37	Est1 → T0 → S0 → PR1	34,625	1
45	Est3 → B0 → C0 → D0 → E0 → PR2	50,5	2
18	Est2 → C3 → PR3	0	3
7	Est2 → C3 → Q4 → B3 → O3 → PR4	44,1667	4
9	Est2 → C3 → P3 → R4 → O3 → PR4	62,75	4
12	Est3 → O0 → P0 → Q0 → I1 → P1 → W1 → I2 → Q2 → Z2 → A3 → I3 → N3 → PR4	124,875	4
13	Est2 → C3 → Q4 → B3 → O3 → PR4	44,1667	4
14	Est3 → O0 → P0 → Q0 → I1 → P1 → W1 → I2 → Q2 → Z2 → A3 → I3 → N3 → PR4	124,875	4
16	Est2 → C3 → P3 → R4 → O3 → PR4	62,75	4
19	Est3 → O0 → P0 → Q0 → I1 → P1 → W1 → I2 → Q2 → Z2 → A3 → I3 → N3 → PR4	124,875	4
22	Est2 → C3 → Q4 → B3 → O3 → PR4	44,1667	4
23	Est1 → T0 → S0 → R0 → Q0 → I1 → P1 → W1 → I2 → Q2 → Z2 → A3 → I3 → N3 → PR4	166	4
31	Est2 → C3 → P3 → R4 → O3 → PR4	62,75	4
38	Est1 → T0 → S0 → R0 → Q0 → I1 → P1 → W1 → I2 → Q2 → Z2 → A3 → I3 → N3 → PR4	166	4
40	Est2 → C3 → P3 → R4 → O3 → PR4	62,75	4
46	Est2 → C3 → P3 → R4 → O3 → PR4	62,75	4
48	Est2 → C3 → Q4 → B3 → O3 → PR4	44,1667	4
49	Est1 → T0 → E1 → D1 → C1 → B1 → J1 → A2 → Z1 → W1 → I2 → Q2 → Z2 → A3 → I3 → N3 → PR4	174,858	4

<b>Ônibus</b>	<b>Rota utilizada para evacuação</b>	<b>Tempo (s)</b>	<b>PR Evacuado</b>
<b>3</b>	Est3 → V0 → A1 → F1 → K1 → T1 → N2 → D3 → Q3 → S3 → T3 → PR5	149,875	5
<b>25</b>	Est3 → V0 → A1 → F1 → K1 → T1 → N2 → D3 → Q3 → S3 → T3 → PR5	149,875	5
<b>27</b>	Est3 → W0 → G1 → H1 → N1 → V1 → F2 → G2 → V2 → F3 → G3 → K3 → L3 → R3 → PR5	92,075	5
<b>35</b>	Est3 → V0 → A1 → F1 → K1 → T1 → N2 → D3 → Q3 → S3 → T3 → PR5	149,875	5
<b>42</b>	Est3 → W0 → G1 → H1 → N1 → V1 → F2 → G2 → V2 → F3 → G3 → K3 → L3 → R3 → PR5	92,075	5
<b>43</b>	Est3 → V0 → A1 → F1 → K1 → T1 → N2 → D3 → Q3 → S3 → T3 → PR5	149,875	5
<b>20</b>	Est3 → W0 → G1 → H1 → N1 → V1 → F2 → G2 → V2 → F3 → G3 → K3 → L3 → R3 → U3 → E4 → I4 → T4 → B5 → D5 → M5 → B6 → A6 → PR6	168,025	6
<b>29</b>	Est3 → W0 → G1 → H1 → N1 → V1 → F2 → G2 → V2 → F3 → G3 → K3 → L3 → R3 → U3 → E4 → I4 → T4 → B5 → D5 → M5 → B6 → A6 → PR6	168,025	6
<b>47</b>	Est3 → W0 → G1 → H1 → N1 → V1 → F2 → G2 → V2 → F3 → G3 → K3 → L3 → R3 → U3 → E4 → I4 → T4 → B5 → D5 → M5 → B6 → A6 → PR6	168,025	6
<b>24</b>	Est3 → W0 → G1 → H1 → N1 → V1 → F2 → G2 → V2 → F3 → G3 → K3 → L3 → R3 → U3 → E4 → I4 → T4 → B5 → D5 → M5 → B6 → C6 → Q6 → R6 → PR8	182,558	8
<b>1</b>	Est2 → C3 → Q4 → B3 → O3 → Z3 → N4 → O4 → P4 → J5 → K5 → T5 → U5 → L6 → V6 → W6 → Z6 → A7 → B7 → D7 → PR9	261,817	9
<b>2</b>	Est3 → W0 → Z0 → M1 → O1 → H2 → P2 → W2 → H3 → M3 → V3 → K8 → J4 → K4 → U4 → F5 → E5 → N5 → C6 → D6 → G6 → S6 → K7 → L7 → M7 → N7 → O7 → P7 → D7 → PR9	359,25	9
<b>4</b>	Est2 → T2 → U2 → N8 → O8 → Z4 → P8 → Z5 → O6 → C7 → PR9	160,758	9
<b>5</b>	Est2 → T2 → L8 → A4 → Z3 → N4 → O4 → P4 → J5 → K5 → T5 → U5 → L6 → V6 → W6 → Z6 → A7 → B7 → D7 → PR9	333,083	9
<b>6</b>	Est1 → U0 → U2 → N8 → O8 → Z4 → P8 → Z5 → O6 → C7	239,633	9

<b>Ônibus</b>	<b>Rota utilizada para evacuação</b>	<b>Tempo (s)</b>	<b>PR Evacuado</b>
	→ PR9		
<b>10</b>	Est1 → U0 → U2 → N8 → O8 → Z4 → P8 → Z5 → O6 → C7 → PR9	239,633	9
<b>11</b>	Est2 → C3 → P3 → R4 → O3 → Z3 → N4 → O4 → P4 → J5 → K5 → T5 → U5 → L6 → V6 → W6 → Z6 → A7 → B7 → D7 → PR9	280,4	9
<b>15</b>	Est2 → T2 → L8 → A4 → Z3 → N4 → O4 → P4 → J5 → K5 → T5 → U5 → L6 → V6 → W6 → Z6 → A7 → B7 → D7 → PR9	333,083	9
<b>26</b>	Est2 → C3 → Q4 → B3 → O3 → Z3 → N4 → O4 → P4 → J5 → K5 → T5 → U5 → L6 → V6 → W6 → Z6 → A7 → B7 → D7 → PR9	261,817	9
<b>28</b>	Est2 → T2 → L8 → A4 → Z3 → N4 → O4 → P4 → J5 → K5 → T5 → U5 → L6 → V6 → W6 → Z6 → A7 → B7 → D7 → PR9	333,083	9
<b>30</b>	Est2 → T2 → U2 → N8 → O8 → Z4 → P8 → Z5 → O6 → C7 → PR9	160,758	9
<b>33</b>	Est2 → T2 → U2 → N8 → O8 → Z4 → P8 → Z5 → O6 → C7 → PR9	160,758	9
<b>39</b>	Est2 → T2 → U2 → N8 → O8 → Z4 → P8 → Z5 → O6 → C7 → PR9	160,758	9
<b>17</b>	Est3 → W0 → Z0 → M1 → O1 → H2 → P2 → W2 → H3 → M3 → V3 → K8 → J4 → K4 → U4 → F5 → E5 → N5 → C6 → D6 → G6 → S6 → K7 → L7 → M7 → W7 → PR11	260,25	11
<b>32</b>	Est3 → W0 → Z0 → M1 → O1 → H2 → P2 → W2 → H3 → M3 → V3 → K8 → J4 → K4 → U4 → F5 → E5 → N5 → C6 → D6 → G6 → S6 → K7 → L7 → M7 → W7 → PR11	260,25	11
<b>36</b>	Est3 → W0 → Z0 → M1 → O1 → H2 → P2 → W2 → H3 → M3 → V3 → K8 → J4 → K4 → U4 → F5 → E5 → N5 → C6 → D6 → G6 → S6 → K7 → L7 → M7 → W7 → PR11	260,25	11
<b>41</b>	Est3 → W0 → Z0 → M1 → O1 → H2 → P2 → W2 → H3 → M3 → V3 → K8 → J4 → K4 → U4 → F5 → E5 → N5 → C6 → D6 → G6 → S6 → K7 → L7 → M7 → W7 → PR11	260,25	11
<b>44</b>	Est3 → W0 → Z0 → M1 → O1 → H2 → P2 → W2 → H3 → M3 → V3 → K8 → J4 → K4 → U4 → F5 → E5 → N5 → C6 → D6 → G6 → S6 → K7 → L7 → M7 → W7 → PR11	260,25	11

Os PR cujos tempos para evacuação são iguais a 0 são adjacentes aos estacionamentos dos veículos e, por isso, o único vértice intermediário entre o estacionamento e o PR é o vértice de acesso do PR e o tempo de transito entre ambos é virtualmente nulo.

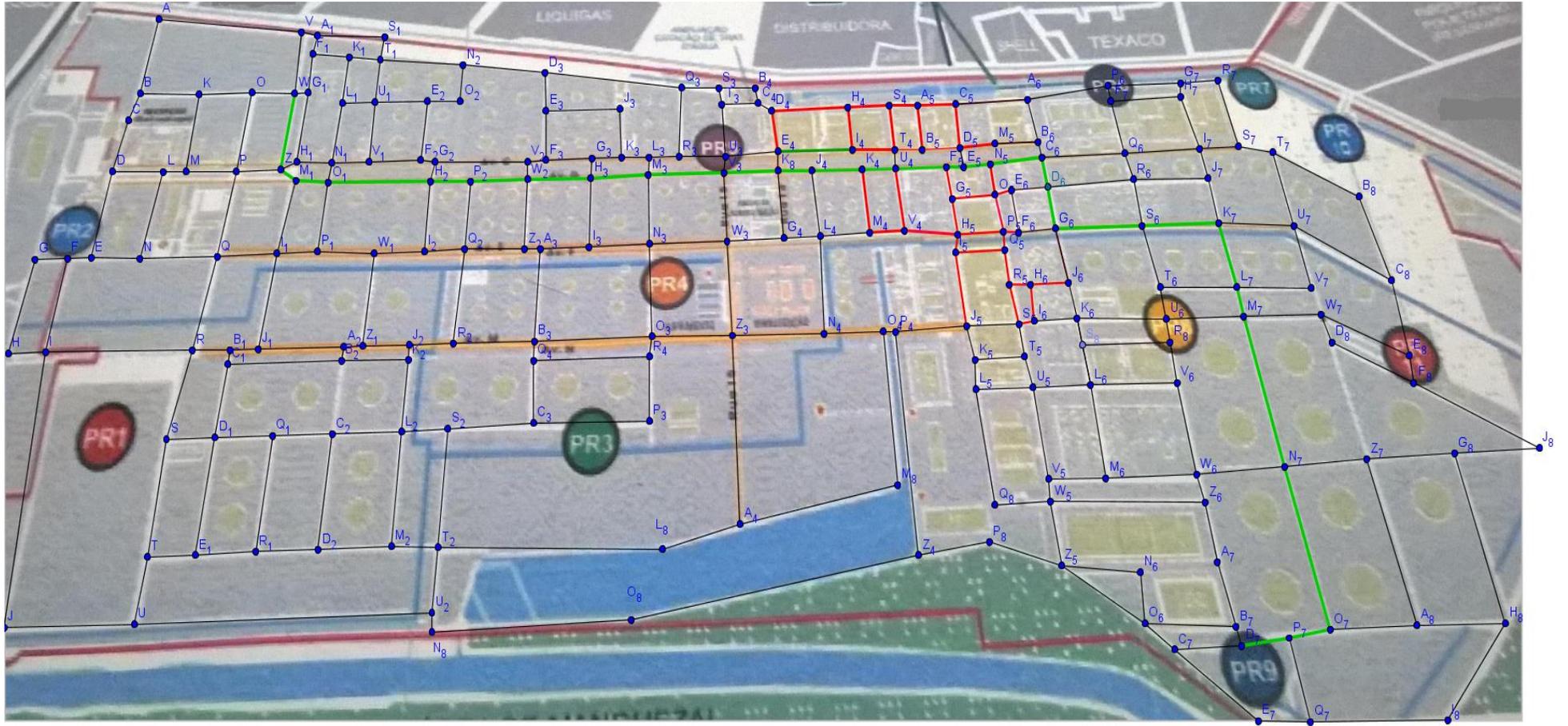


Figura 12: Rota para que o ônibus 2 chegue ao PR 9 para extração dos evacuados (em verde claro)

### 5.2.2. Aplicação da segunda parte do segundo estágio do modelo

Através da aplicação da segunda parte do segundo estágio do modelo foram encontradas as rotas ótimas para os veículos evacuarem a refinaria, após recolherem os evacuados nos respectivos PR e o tempo necessário para evacuação. A Tabela 16 apresenta as rotas que cada veículo deve seguir a fim de evacuar a refinaria.

O maior tempo necessário para um veículo evacuar a refinaria, partindo de um dos PR é de 107,817 segundos, necessário para o ônibus 23 sair do PR 4 e se dirigir a saída 7, mostrada na Figura 13. A soma dos tempos necessários para evacuação de todos os veículos (Função Objetivo) é de 1650,92 segundos.

Desta forma, as Tabela 14 e Tabela 16 permitem observar que o maior tempo necessário para que um veículo parta de um estacionamento e evacue a refinaria, passando por um dos PR para buscar os evacuados é de 359,25 segundos (além do tempo necessário para o embarque dos evacuados no ônibus), necessários para que o ônibus 2 parta do estacionamento 3, evacue o PR 9 e se dirija a saída 8 adjacente ao PR. Uma vez que a saída 8 é adjacente ao PR 9, com tempo percorrido sendo virtualmente nulo, esta rota pode ser observada na Figura 14 apresentada anteriormente

Além disso, a segunda parte do modelo permitiu identificar o número de veículos que utiliza cada uma das saídas da refinaria, como mostrado na Tabela 15.

Tabela 15: Número de veículos utilizando as saídas da refinaria

Saídas	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nº Veículos	0	0	1	4	0	18	8	13	5

A Tabela 16 a seguir apresenta as rotas detalhadas de cada um dos veículos e o tempo necessário para chegar a uma das saídas da refinaria a partir dos PR ao qual estão alocados.

Tabela 16: Rotas utilizadas pelos veículos para transitar entre os PR e as saídas da refinaria

Ônibus	Rota	Tempo (s)	PR Evacuado
8	PR1 → I0 → H0 → Saída4	12,250	1
21	PR1 → I0 → H0 → Saída4	12,250	1
34	PR1 → I0 → H0 → Saída4	12,250	1

<b>Ônibus</b>	<b>Rota</b>	<b>Tempo (s)</b>	<b>PR Evacuado</b>
37	PR1 → I0 → H0 → Saída4	12,250	1
45	PR2 → G0 → Saída3	0	2
18	PR3 → P3 → R4 → O3 → Z3 → W3 → V3 → U3 → E4 → D4 → C4 → B4 → Saída6	98,967	3
7	PR4 → O3 → Z3 → W3 → V3 → U3 → E4 → D4 → C4 → B4 → Saída6	74,467	4
9	PR4 → O3 → Z3 → W3 → G4 → L4 → M4 → K4 → U4 → T4 → B5 → D5 → C5 → Saída7	107,817	4
12	PR4 → N3 → W3 → V3 → U3 → E4 → D4 → C4 → B4 → Saída6	59,400	4
13	PR4 → N3 → W3 → V3 → U3 → E4 → D4 → C4 → B4 → Saída6	59,400	4
14	PR4 → N3 → M3 → L3 → R3 → Q3 → S3 → Saída6	62,583	4
16	PR4 → N3 → M3 → L3 → R3 → Q3 → S3 → Saída6	62,583	4
19	PR4 → N3 → M3 → L3 → R3 → Q3 → S3 → Saída6	62,583	4
22	PR4 → N3 → W3 → V3 → U3 → E4 → D4 → C4 → B4 → Saída6	59,400	4
23	PR4 → O3 → Z3 → W3 → G4 → L4 → M4 → K4 → U4 → T4 → B5 → D5 → C5 → Saída7	107,817	4
31	PR4 → N3 → W3 → G4 → L4 → M4 → K4 → U4 → T4 → B5 → D5 → C5 → Saída7	92,750	4
38	PR4 → N3 → M3 → L3 → R3 → Q3 → S3 → Saída6	62,583	4
40	PR4 → N3 → M3 → L3 → R3 → Q3 → S3 → Saída6	62,583	4
46	PR4 → N3 → W3 → V3 → U3 → E4 → D4 → C4 → B4 → Saída6	59,400	4
48	PR4 → N3 → W3 → G4 → L4 → M4 → K4 → U4 → T4 → B5 → D5 → C5 → Saída7	92,750	4
49	PR4 → N3 → M3 → L3 → R3 → Q3 → S3 → Saída6	62,583	4
3	PR5 → T3 → S3 → Saída6	4,875	5
25	PR5 → T3 → S3 → Saída6	4,875	5
27	PR5 → T3 → S3 → Saída6	4,875	5
35	PR5 → T3 → S3 → Saída6	4,875	5
42	PR5 → T3 → S3 → Saída6	4,875	5
43	PR5 → T3 → S3 → Saída6	4,875	5
20	PR6 → A6 → C5 → Saída7	23,750	6
29	PR6 → A6 → C5 → Saída7	23,750	6
47	PR6 → A6 → C5 → Saída7	23,750	6

<b>Ônibus</b>	<b>Rota</b>	<b>Tempo (s)</b>	<b>PR Evacuado</b>
<b>24</b>	PR8 → T6 → S6 → G6 → D6 → C6 → B6 → M5 → D5 → C5 → Saída7	86,250	8
<b>1</b>	PR9 → E7 → Saída8	0	9
<b>2</b>	PR9 → E7 → Saída8	0	9
<b>4</b>	PR9 → E7 → Saída8	0	9
<b>5</b>	PR9 → E7 → Saída8	0	9
<b>6</b>	PR9 → E7 → Saída8	0	9
<b>10</b>	PR9 → E7 → Saída8	0	9
<b>11</b>	PR9 → E7 → Saída8	0	9
<b>15</b>	PR9 → E7 → Saída8	0	9
<b>26</b>	PR9 → E7 → Saída8	0	9
<b>28</b>	PR9 → E7 → Saída8	0	9
<b>30</b>	PR9 → E7 → Saída8	0	9
<b>33</b>	PR9 → E7 → Saída8	0	9
<b>39</b>	PR9 → E7 → Saída8	0	9
<b>17</b>	PR11 → F8 → J8 → Saída9	45,000	11
<b>32</b>	PR11 → F8 → J8 → Saída9	45,500	11
<b>36</b>	PR11 → F8 → J8 → Saída9	45,500	11
<b>41</b>	PR11 → F8 → J8 → Saída9	45,500	11
<b>44</b>	PR11 → F8 → J8 → Saída9	45,500	11

É importante observar que as rotas com duração 0 segundos são rotas de PR adjacentes às saídas das refinarias, por isso o tempo de transito entre os PR e as saídas é virtualmente nulo.

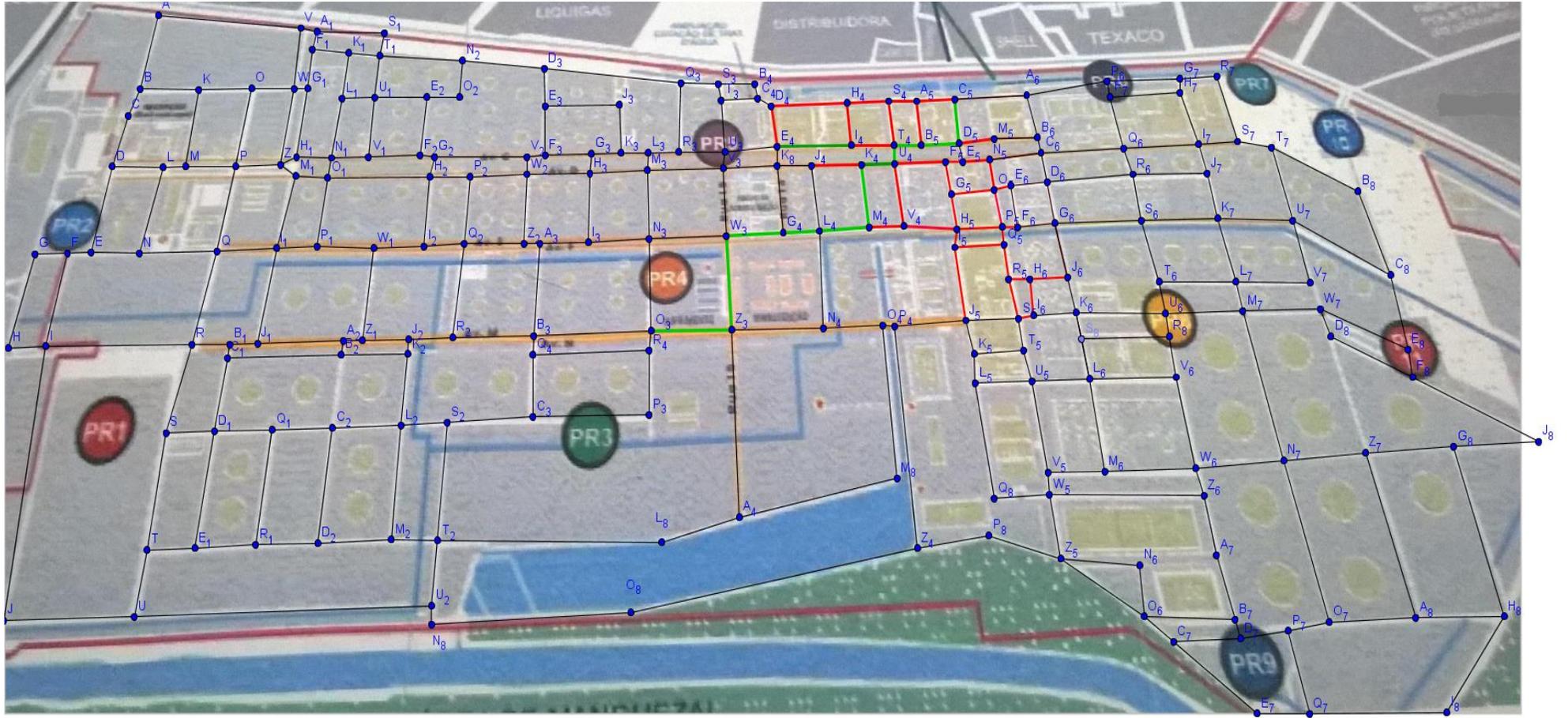


Figura 13: Rota para que o ônibus 23 saia do PR 4 em direção a saída 7

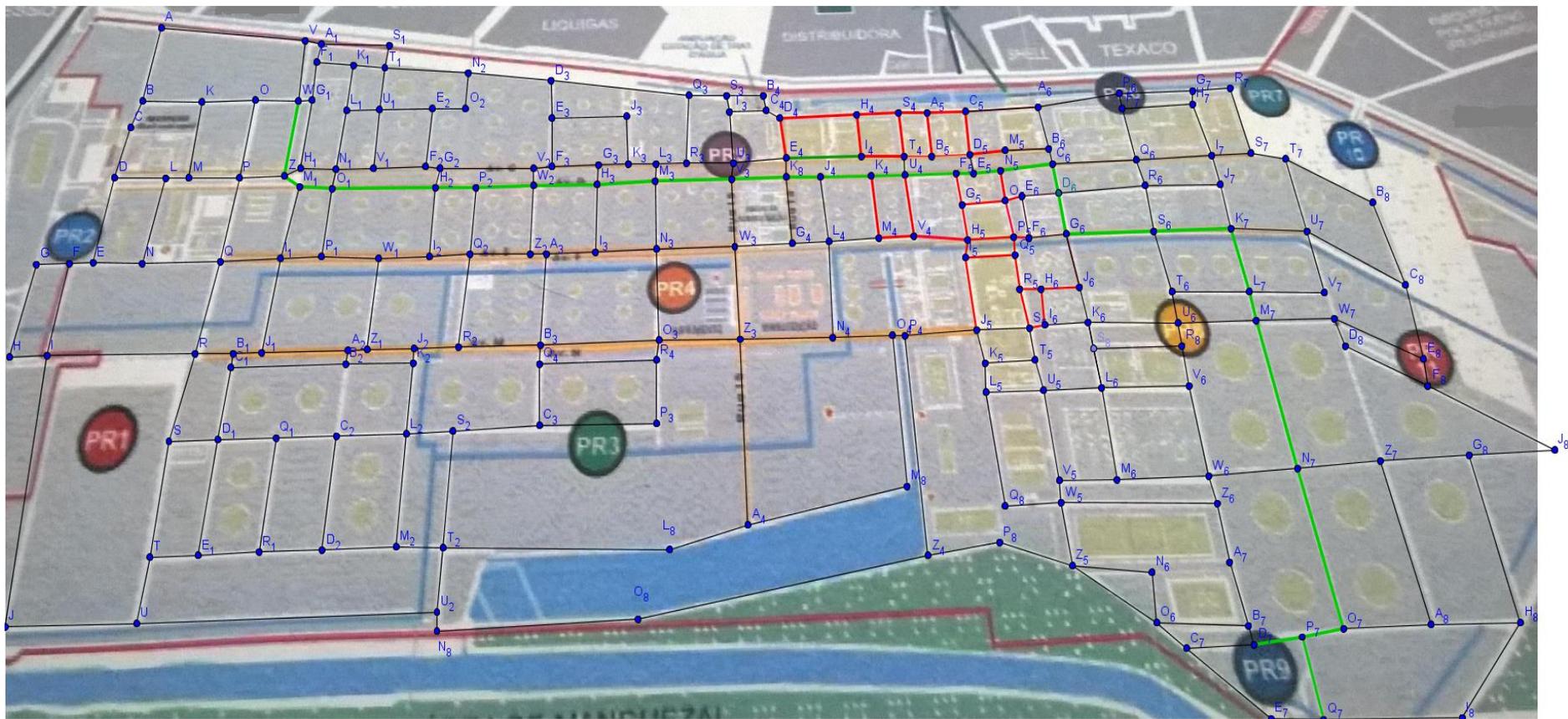


Figura 14: Rota para que o ônibus 2 saia do estacionamento 3, passando PR 9 e evacuando pela saída 8

### 5.3. RESULTADOS DO SEGUNDO CENÁRIO

Com o intuito de analisar a resposta do modelo em diferentes situações, criou-se um segundo cenário: evacuação da refinaria durante o turno da noite, quando as condições ambientais são diferentes, especialmente a direção do vento.

O acidente simulado foi mantido como vazamento de  $H_2S$ , do mesmo tanque de armazenamento. As condições do acidente são as mesmas, inclusive o tempo máximo de exposição permitido (90 segundos), assim como as condições ambientais, exceto pela direção do vento sobre a refinaria que agora incide a 11,2 km/h na direção Norte – Noroeste. A área afetada pelo vazamento é apresentada na Figura 15.



Figura 15: Área afetada pelo vazamento de  $H_2S$  no turno da noite

A Figura 15 permite observar que PR 9 fica sob uma das áreas afetadas pelo vazamento, de modo que não poderá ser utilizado para evacuação dos colaboradores.

Desta forma, os funcionários que foram alocados ao PR 9 durante a evacuação no turno da manhã precisam ser alocados para outros PR. A Tabela 17 a seguir apresenta a quais PR os colaboradores de cada unidade são alocados e o número de colaboradores em cada PR.

Tabela 17: Funcionários de unidades alocados por PR no turno da noite

PR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Funcionários alocados	Un2	Un1	Un16	Un3, Un9, Un10	Un5, Un8	Un6	--	Un4, Un7, Un12, Un13, Un14	--	Un11	Un15
Nº de Col.	47	282	510	1306	504	213	0	901	0	14	168

O PR9 é um dos PR mais utilizados para evacuação durante o turno da manhã, recebendo 1144 colaboradores durante o processo de evacuação. Porém, situa-se em uma região de risco caso o vazamento aconteça à noite, o que faz com que 1144 colaboradores precisem percorrer maiores distâncias para evacuar suas unidades de produção, impactando diretamente o tempo necessário para evacuação da refinaria, uma vez que os funcionários das unidades 4, 14 e 16, que eram anteriormente direcionados ao PR 9 precisarão percorrer 1651m, 1145m e 1595m, respectivamente, para atingir seus novos PR. Isto demonstra a necessidade da criação de um novo PR para receber os colaboradores destas unidade caso um acidente aconteça no turno da noite, uma vez que os PR mais próximos além do PR9 situam-se muito longe das respectivas unidades, especialmente considerando que as unidades 14 e 16 possuem muitos colaboradores alocados.

Deve-se considerar ainda que os colaboradores destas unidades ficam próximos às zonas de risco e por isso não podem transitar a pé por grande parte das vias próximas, precisando contornar as áreas afetadas pelo vazamento, o que torna seu tempo e distâncias percorridas para evacuação ainda maiores.

A maior distância  $R$  percorrida por um colaborador é de 1651m, necessários para os colaboradores da unidade 4 chegarem até o PR 8, contornando as zonas de risco afetadas pelo vazamento. Um aumento significativo na distância máxima quando comparado ao cenário anterior, que é de 681 m.

Com isto, é possível determinar as rotas necessárias para os veículos partirem de seus estacionamentos e realizarem a evacuação dos colaboradores nos PR, através da aplicação do segundo estágio do modelo.

O número de veículos necessários para evacuação se mantêm o mesmo, 49 veículos. O tempo total necessário para que os veículos evacuem os PR sofre um leve acréscimo, passando de aproximadamente 9310 segundos no primeiro cenário para aproximadamente 9380 segundos no segundo cenário. De modo que a substituição dos PR utilizados não afeta de forma considerável o tempo necessário para evacuação dos veículos.

Isto acontece, pois todos os veículos precisam evacuar a refinaria após buscar os colaboradores nos PR, por isso embora a mudança dos PR acarrete uma diminuição no tempo total necessário para todos os veículos atingirem os PR (de aproximadamente 7570 s para aproximadamente 6022 s), eles estarão proporcionalmente mais distantes das saídas aumentando o tempo de viagem de aproximadamente 1740s para 3360 s.

O maior tempo necessário para um veículo partir de um estacionamento e chegar a um dos PR é de 292.533 segundos, necessários para o veículo 8 partir do estacionamento 1 e se dirigir ao PR 8. O maior tempo necessário para um veículo partir de um PR e chegar a uma das saídas é de 138.15 s, tempo necessário para o veículo 6 partir do PR3 e se dirigir a saída 7.

Por fim, a Tabela 18 apresenta o número de veículos necessários para evacuar cada um dos PR.

Tabela 18: Número de veículos necessários para evacuar cada PR no turno da noite

<b>PR</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>
Nº Veículos	1	4	6	15	6	3	0	11	0	1	2

## 6. CONCLUSÃO

Um modelo de roteamento de pessoas e veículos em dois estágios utilizando ferramentas de análise e modelagem de risco e Sistemas de Informações Geográficas (GIS) é proposto para seleção de rotas de fuga para evacuação de uma refinaria de petróleo, onde o objetivo é minimizar a distância percorrida e tempo necessários para evacuação de pessoas e veículos da indústria.

O modelo apresenta uma melhoria em relação aos modelos baseados em fluxo de grafos apresentados por Ozdamar e Yi (2007) e Brachman e Dragicevic (2014) uma vez que permite roteamento de pessoas (pertencentes a unidades) e veículos de forma individual dentro das vias sem a necessidade da aplicação de uma heurística pós processamento.

Além disso, observa-se que o modelo proposto é capaz não apenas de encontrar as melhores rotas a serem percorridas, mas é capaz de identificar quais os PR, estacionamentos e saídas da refinaria devem ser utilizados para cada tipo de acidente, e a quantidade de pessoas / veículos utiliza cada uma destas facilidades, podendo ser considerado um modelo de localização-roteamento de veículos e pessoas.

O modelo ainda apresenta uma melhoria em relação ao modelo de localização-roteamento proposto por Alcada-Almeida *et al.*, (2009), uma vez que permite uma identificação mais precisa das áreas afetadas pelo desastre.

Os modelos propostos no segundo estágio podem ser considerados eficientes, pois se baseiam na modelagem clássica de fluxo em grafos direcionados, permitindo sua aplicação em problemas em maior escala com relativa facilidade de implantação. Porém, nota-se que para solução de problemas em grande escala, como o apresentado neste trabalho, é necessária utilização de máquinas (computadores) com alto desempenho, uma vez que para grafos com um grande número de vértices, como a representação de mapas de grandes áreas, o modelo exige grande quantidade de memória.

Observa-se que embora minimizar a maior distância ou tempo percorrido por determinado grupo pareça uma escolha adequada para a função objetivo de um problema de seleção de rotas para evacuação de uma indústria ou região, como adotado no primeiro estágio do modelo, em modelos baseados na formulação de fluxo em grafos esta abordagem se mostra computacionalmente ineficiente, para solução de problemas

de grande porte. Isto devido ao grande número de soluções ótimas distintas possíveis para a relaxação linear do modelo, fazendo com que seu limitante dual se mova muito lentamente.

Porém, mesmo com uma função objetivo que torna a execução do primeiro estágio do modelo ineficiente, foi possível implementá-lo sem dificuldades, uma vez que o caso apresentado no estudo apresenta apenas 16 unidades produtivas a serem evacuadas. Esta função objetivo foi mantida uma vez que permite uma evacuação homogênea dos colaboradores, fazendo com que nenhum deles precise percorrer uma distância muito superior aos demais para ser evacuado. Para implementação do modelo com um número grande de unidades (20 ou mais), recomenda-se a substituição da função objetivo para a minimização do somatório das distâncias percorridas.

Através da utilização do GIS MARPLOT foi possível determinar a extensão da área afetada pelo vazamento e o tempo máximo de exposição permitido aos colaboradores dentro desta área, permitindo identificar as áreas de risco na indústria e as vias da refinaria que devem ser evitadas durante a evacuação da área, aumentando a segurança para trabalhadores e equipes de resgate durante a evacuação.

Aliada ao MARPLOT, a ferramenta ALOHA permite mapeamento e análise de vazamentos de mais de 1000 produtos químicos distintos, permitindo a aplicação do modelo apresentado neste trabalho em indústrias químicas (não apenas refinarias de petróleo) de diferentes tipos e em diferentes condições geográficas e climáticas ao redor do globo. De modo que o estudo demonstra a aplicabilidade de Sistemas de Modelagem de Riscos e GIS para preparação e resposta a diferentes situações de emergência em diferentes instalações industriais de grande porte.

Recomenda-se como estudo futuro a generalização do modelo proposto neste trabalho para que possa ser utilizado para evacuação em regiões urbanas, considerando suas características e particularidades, em situações em que vazamentos químicos atinjam uma área superior aos limites da planta industrial, como ocorrido em Bophal (1984) e no Porto de Santos (2016).

Recomenda-se, ainda, um estudo sobre as incertezas envolvidas no processo de evacuação de uma indústria, como o número de pessoas presentes em cada região da

indústria no momento do acidente e possíveis variações climáticas, como direção e força do vento, no momento da evacuação.

## 7. REFERÊNCIAS

- ABIDI, H.; LEEUW, S. DE; KLUMPP, M. Measuring Success in Humanitarian Supply Chains. **International Journal of Business and Management Invention**, v. 2, n. 8, p. 31–39, 2013.
- ALÇADA-ALMEIDA, L.; TRALHÃO, L.; SANTOS, L.; COUTINHO-RODRIGUEZ, J. A multiobjective approach to locate emergency shelters and identify evacuation routes in urban areas. **Geographical Analysis**, v. 41, n. 1, p. 9–29, 2009.
- ANÔNIMO. Public health. **The Journal of The Society of Community Medicine**, v. 77, n. 9, p. 466, 1985.
- BALCIK, B.; BEAMON, B. Distribution network design for humanitarian relief chains. **INFORMS Annual Meeting**, 2005.
- BRACHMAN, M. L.; DRAGICEVIC, S. A spatially explicit network science model for emergency evacuations in an urban context. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 44, p. 15–26, 2014.
- CAMPOS, V.; BANDEIRA, R.; BANDEIRA, A. A Method for Evacuation Route Planning in Disaster Situations. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 54, p. 503–512, 2012.
- CARDOSO, M. R. B.; HOFFMANN, W. A. M. A LOGÍSTICA NO APOIO A SITUAÇÕES DE DESASTRES NATURAIS NA AREA URBANA Martha Regina Bortolato Cardoso Wanda Aparecida Machado Hoffmann. p. 600–611, 2012.
- CARTER, W. N. **Disaster Management handbook**. [s.l: s.n.].
- CASTRO, A. L. C. DE. Glossário de defesa civil estudos de riscos e medicina de desastres. p. 191, 2002.
- COLLINS, M. L.; KAPUCU, N. Early warning systems and disaster preparedness and response in local government. **Disaster Prevention and Management**, v. 17, n. 5, p. 587–600, 2008.
- COVA, T. J.; CHURCH, R. L. Modelling community evacuation vulnerability using GIS. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 11, n. 8, p. 763–784, 1997.
- COVA, T. J.; JOHNSON, J. P. A network flow model for lane-based evacuation routing. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 37, n. 7, p. 579–604, 2003.
- COZZOLINO, A. **Humanitarian Logistics**. 2012. ed. Roma: Springer, 2012.
- DAVID B KAATRUD; RAMINA SAMII; LUK N. VAN WASSENHOVE. UN Joint Logistics Centre: A Coordinated Response to Common Humanitarian Logistics Concerns. **Delivering the Goods**, p. 11–18, 2003.

DE SILVA, F. N.; PIDD, M.; EGGLESE, R. W. A simulation model for emergency evacuation. v. 2217, n. 95, 1996.

Duhigg, C. (2012). “O Poder do Habito: Por que fazemos o que fazemos na vida e nos negócios”. Editora Objetiva

EPA - United States Environmental Protection Agency. CAMEO (Computer-Aided Management of Emergency Operations). Disponível em <http://www.epa.gov/cameo>, acesso em 04/02/2016

ERNST, R. The academic side of commercial logistics and the importance of this special issue. **Forced Migration Review**, n. 18, p. 5, 2003.

ERTEM, M. A.; BUYURGAN, N.; ROSSETTI, M. D. Multiple-buyer procurement auctions framework for humanitarian supply chain management. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 40, n. 3, p. 202–227, 2010.

G. DE GIROLAMO; WHO; ORLEY, J. **Psychosocial consequences of Disasters. Prevention and Management**, 1992. Disponível em: <[http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/58986/1/WHO\\_MNH\\_PSF\\_91.3\\_REV.1.pdf](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/58986/1/WHO_MNH_PSF_91.3_REV.1.pdf)>

GRANOT, H. The dark side of growth and industrial disasters since the Second World War. **Disaster Prevention and Management**, v. 7, n. 3, p. 195–204, 1998a.

GRANOT, H. The human factor in accidents. **Arhiv za higijenu rada i toksikologiju**, v. 45, n. 3, p. 249–273, 1998b.

GUSTAVSSON, L. Humanitarian logistics: context and challenges. **Forced Migration Review**, p. 6–8, 2003.

HOFFMAN, W. Avoiding Logistics Disasters. **Traffic World**, p. 2005, 2005.

HOLGUÍN-VERAS, J.; JALLER, M. VAN WASSENHOVE, L. N.; PÉREZ, N.; WACHTENDORF, T.; Material Convergence: Important and Understudied Disaster Phenomenon. **Natural Hazards Review**, v. 15, n. 1, p. 1–12, 2014.

JOHNSON, J. H.; ZEIGLER, D. J. Evacuation planning for technological hazards. **Cities**, v. 3, n. 2, p. 148–156, 1986.

JOHNSTON, D. BECKER, J.; GREGG, C.; HOUGHTON, B.; PATON, D.; LEONARD, G.; GARSIDE, R. Developing warning and disaster response capacity in the tourism sector in coastal Washington, USA. **Disaster Prevention and Management**, v. 16, n. 2, p. 210–216, 2007.

KALAFATAS, G.; PEETA, S. Planning for Evacuation: Insights from an Efficient Network Design Model. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 15, n. 1, p. 21–30, 2009.

KHAN, F. I.; ABBASI, S. . Reply to comments on “Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences”. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 14, n. 1, p. 85, 1999.

KHARBANDA, O. P.; STALLWORTHY, E. A. Planning for emergencies—lessons from the chemical industry. **Long Range Planning**, v. 22, n. 1, p. 83–89, 1989.

KHARBANDA, O. P.; STALLWORTHY, E. A. Industrial Disasters - Will Self-Regulation Work ? v. 24, n. 3, p. 84–89, 1991.

KIPPENBERGUER, T. About Emerald [www.emeraldinsight.com](http://www.emeraldinsight.com). **The antidote**, v. 4, n. 3, 1999.

KORPELA, J.; TUOMINEN, M. Benchmarking logistics performance with an application of the analytic hierarchy process. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 43, n. 3, p. 323–333, 1996.

KOVÁCS, G.; SPENS, K. M. Humanitarian logistics in disaster relief operations. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 37, n. 2, p. 99–114, 2007.

LEIRAS, A. BERTAZZO, T. R.; DE BRITO, I. J.; YOSHIZAKI, H. T. Y.; **Literature review of humanitarian logistics research: trends and challenges**. [s.l: s.n.]. v. 4

LIU, Y.; LAI, X.; CHANG, G.-L. Two-Level Integrated Optimization System for Planning of Emergency Evacuation. **Journal of Transportation Engineering**, v. 132, n. 10, p. 800–807, 2006.

LONG, D. **Logistics for Disaster Relief**, 1997.

LU, D. J.; PETTIT, S. J.; BERESFORD, A. K. C. Critical Success Factors for Emergency Relief Logistics. v. 51, p. 177–184, 2006.

MCCLINTOCK, A. The logistics of humanitarian emergencies: Notes from the field. **Journal of Contingencies and Crisis Management**, v. 17, n. 4, p. 295–302, 2009.

MURRAY, S. How to deliver on the promises. **Financial Times**, 2005.

NEWPORT, J. K.; JAWAHAR, G. G. P. Community participation and public awareness in disaster mitigation. **Disaster Prevention and Management**, v. 12, n. 1, p. 33–36, 2003.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO TRABALHO (1988). **Major hazard Control - A practical manual**. [s.l: s.n.].

OSHA - OCUPATION SAFETY & HEALTH ADMINISTRATION (2016). Safety & Health Topics - Hydrogen Sulfide. Disponível em <https://www.osha.gov/SLTC/hydrogensulfide/hazards.html>. Acesso em 08/03/2016

PERRY, M. Natural disaster management planning: A study of logistics managers responding to the tsunamis. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 37, n. 5, p. 409–433, 2007.

PERRY, R. W.; QUARANTELLI, E. L. **From Crisis To Disaster: Towards An Integrative Perspective**. [s.l.: s.n.].

PETTIT, S. J.; BERESFORD, A. K. C. Critical success factors in the context of humanitarian aid supply chains. 2009.

POWER, D. J.; SOHAL, A. S.; RAHMAN, S.-U. Critical success factors in agile supply chain management - An empirical study. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 31, n. 4, p. 247–265, 2001.

ROCKART, J. F. Chief executive define their own data needs. **Harvard Business Review**, n. March, p. 81–92, 1979.

SAADATSERESHT, M.; MANSOURIAN, A.; TALEAI, M. Evacuation planning using multiobjective evolutionary optimization approach. **European Journal of Operational Research**, v. 198, n. 1, p. 305–314, 2009.

SHADECK, R. SANTOS, M. S.; SCHNORR, T. M. PEIXOTO FILHO, G. E. C. PEIXOTO. Gestão de risco e Resposta a Desastres Naturais: A Atuação do Ministério das Cidades. **VI Congresso CONSAD de Gestão Pública**, p. 24, 2013.

SHALUF, I. M. An overview on the technological disasters. **Disaster Prevention and Management**, v. 16, n. 3, p. 380–390, 2007.

SHALUF, I. M.; AHMADUN, F.; SAID, A. M. A review of disaster and crisis. **Disaster Prevention and Management**, v. 12, n. 1, p. 24–32, 2003.

SHEN, Y. WANG, Q.; YAN, W.; WANG, J. (2014). A transportation-location problem model for pedestrian evacuation in chemical industrial parks disasters. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 33, p. 29–38, 2015.

SILVA, F. N. DE. Providing spatial decision support for evacuation planning: a challenge in integrating technologies. **Disaster Prevention and Management**, v. 10, n. 1, p. 11–20, 2001.

SLOVIC, P.; FISCHHOFF, B.; LICHTENSTEIN, S. **Rating the riskEnvironment**, 1979.

SPHERE PROJECT. **The Sphere Project: Humanitarian Charter and Minimum Standards in Humanitarian Response\_J**. [s.l.: s.n.].

SPINDLER, H.; ELKLIT, A.; CHRISTIANSEN, D. Risk factors for posttraumatic stress disorder following an industrial disaster in a residential area: A note on the origin of observed gender differences. **Gender Medicine**, v. 7, n. 2, p. 156–165, 2010.

TABBARA, L. Emergency Relief Logistics : Evaluation of Disaster Response Models. **Architecture.Brookes.Ac.Uk**, 2008.

THOMAS, A. Why logistics? **Forced Migration Review**, v. 18, n. 1, p. 4, 2003.

THOMAS, A. S.; KOPCZAK, L. R. From logistics to supply chain management: the path forward in the humanitarian sector. **Fritz Institute**, v. 15, n. 16th February 2010, p. 1–15, 2005.

TINGUARO RODRÍGUEZ, J.; VITORIANO, B.; MONTERO, J. A general methodology for data-based rule building and its application to natural disaster management. **Computers and Operations Research**, v. 39, n. 4, p. 863–873, 2012.

VAN WASSENHOVE, L. N. Humanitarian aid logistics: supply chain management in high gear†. **Journal of the Operational Research Society**, v. 57, n. 5, p. 475–489, 2006.

WEICHSELGARTNER, J. Disaster mitigation: the concept of vulnerability revisited. **Disaster Prevention and Management**, v. 10, n. 2, p. 85–95, 2001.

Yamada, T., 1996. A network flow approach to a city emergency evacuation planning. **International Journal of Systems Science** 27, 931–936

YI, W.; ÖZDAMAR, L. A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities. **European Journal of Operational Research**, v. 179, n. 3, p. 1177–1193, 2007.

ZIO, E.; AVEN, T. Industrial disasters: Extreme events, extremely rare. Some reflections on the treatment of uncertainties in the assessment of the associated risks. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 91, n. 1-2, p. 31–45, 2013.

## APÊNDICE I

Distâncias entre vértices do grafo (comprimento das vias da refinaria).

<b>Vértice</b>	<b>Adjacentes (Distância)</b>
<b>A0:</b>	B0 (179 m), V0 (377 m)
<b>B0:</b>	A0 (179 m), C0 (70 m), K0 (154 m)
<b>C0:</b>	B0 (70 m), D0 (125 m)
<b>D0:</b>	C0 (125 m), E0 (209 m), L0 (134 m)
<b>E0:</b>	D0 (209 m), F0 (62 m), N0 (128 m)
<b>F0:</b>	E0 (62 m), G0 (86 m), I0 (224 m)
<b>G0:</b>	F0 (86 m), H0 (229 m)
<b>H0:</b>	G0 (229 m), I0 (98 m)
<b>I0:</b>	F0 (224 m), H0 (98 m), J0 (647 m), R0 (386 m)
<b>J0:</b>	I0 (647 m), U0 (344 m)
<b>K0:</b>	B0 (154 m), M0 (181 m), O0 (140 m)
<b>L0:</b>	D0 (134 m), M0 (60 m), N0 (209 m)
<b>M0:</b>	K0 (181 m), L0 (60 m), P0 (132 m)
<b>N0:</b>	E0 (128 m), L0 (209 m), Q0 (204 m)
<b>O0:</b>	K0 (140 m), P0 (187 m), W0 (112 m)
<b>P0:</b>	M0 (132 m), O0 (187 m), Q0 (204 m), Z0 (118 m)
<b>Q0:</b>	N0 (204 m), P0 (204 m), R0 (226 m), I1 (158 m)
<b>R0:</b>	I0 (386 m), Q0 (226 m), S0 (217 m), B1 (100 m)
<b>S0:</b>	R0 (217 m), T0 (277 m), D1 (128 m)
<b>T0:</b>	S0 (277 m), U0 (160 m), E1 (126 m)
<b>U0:</b>	J0 (344 m), T0 (160 m), U2 (784 m)
<b>V0:</b>	A0 (377 m), W0 (143 m), A1 (43 m)
<b>W0:</b>	O0 (112 m), V0 (143 m), Z0 (180 m), G1 (36 m)
<b>Z0:</b>	P0 (118 m), W0 (180 m), H1 (46 m), M1 (48 m)
<b>A1:</b>	V0 (43 m), F1 (44 m), S1 (178 m)
<b>B1:</b>	R0 (100 m), C1 (33 m), J1 (74 m)
<b>C1:</b>	B1 (33 m), D1 (173 m), B2 (300 m)

<b>D1:</b>	S0 (128 m), C1 (173 m), E1 (277 m), Q1 (152 m)
<b>E1:</b>	T0 (126 m), D1 (277 m), R1 (160 m)
<b>F1:</b>	A1 (44 m), G1 (91 m), K1 (96 m)
<b>G1:</b>	W0 (36 m), F1 (91 m), H1 (163 m)
<b>H1:</b>	Z0 (46 m), G1 (163 m), N1 (92 m)
<b>I1:</b>	Q0 (158 m), J1 (228 m), M1 (175 m), P1 (106 m)
<b>J1:</b>	B1 (74 m), I1 (228 m), A2 (226 m)
<b>K1:</b>	F1 (96 m), L1 (108 m), T1 (82 m)
<b>L1:</b>	K1 (108 m), N1 (141 m), U1 (86 m)
<b>M1:</b>	Z0 (48 m), I1 (175 m), O1 (84 m)
<b>N1:</b>	H1 (92 m), L1 (141 m), O1 (47 m), V1 (98 m)
<b>O1:</b>	M1 (84 m), N1 (47 m), P1 (162 m), H2 (270 m)
<b>P1:</b>	I1 (106 m), O1 (162 m), W1 (150 m)
<b>Q1:</b>	D1 (152 m), R1 (272 m), C2 (158 m)
<b>R1:</b>	E1 (160 m), Q1 (272 m), D2 (164 m)
<b>S1:</b>	A1 (178 m), T1 (53 m)
<b>T1:</b>	K1 (82 m), S1 (53 m), U1 (99 m), N2 (218 m)
<b>U1:</b>	L1 (86 m), T1 (99 m), V1 (139 m), E2 (138 m)
<b>V1:</b>	N1 (98 m), U1 (139 m), F2 (136 m)
<b>W1:</b>	P1 (150 m), Z1 (216 m), I2 (132 m)
<b>Z1:</b>	W1 (216 m), A2 (50 m), J2 (122 m)
<b>A2:</b>	J1 (226 m), Z1 (50 m), B2 (33 m)
<b>B2:</b>	C1 (300 m), A2 (33 m), K2 (176 m)
<b>C2:</b>	Q1 (158 m), D2 (271 m), L2 (182 m)
<b>D2:</b>	R1 (164 m), C2 (271 m), M2 (194 m)
<b>E2:</b>	U1 (138 m), F2 (137 m), O2 (86 m)
<b>F2:</b>	V1 (136 m), E2 (137 m), G2 (38 m)
<b>G2:</b>	F2 (38 m), H2 (48 m), V2 (244 m)
<b>H2:</b>	O1 (270 m), G2 (48 m), I2 (163 m), P2 (106 m)
<b>I2:</b>	W1 (132 m), H2 (163 m), Q2 (106 m)
<b>J2:</b>	Z1 (122 m), K2 (34 m), R2 (116 m)
<b>K2:</b>	B2 (176 m), J2 (32 m), L2 (167 m)

<b>L2:</b>	C2 (182 m), K2 (167 m), M2 (267 m), S2 (122 m)
<b>M2:</b>	D2 (194 m), L2 (267 m), T2 (122 m)
<b>N2:</b>	T1 (218 m), O2 (84 m), D3 (217 m)
<b>O2:</b>	E2 (86 m), N2 (84 m)
<b>P2:</b>	H2 (106 m), Q2 (157 m), W2 (150 m)
<b>Q2:</b>	I2 (106 m), P2 (157 m), R2 (220 m), Z2 (158 m)
<b>R2:</b>	J2 (116 m), Q2 (220 m), B3 (214 m)
<b>S2:</b>	L2 (122 m), T2 (275 m), C3 (226 m)
<b>T2:</b>	M2 (122 m), S2 (275 m), U2 (153 m), L8 (592 m)
<b>U2:</b>	U0 (784 m), T2 (153 m), N8 (44 m)
<b>V2:</b>	G2 (244 m), W2 (40 m), F3 (48 m)
<b>W2:</b>	P2 (150 m), V2 (40 m), Z2 (162 m), H3 (166 m)
<b>Z2:</b>	Q2 (158 m), W2 (162 m), A3 (42 m)
<b>A3:</b>	Z2 (42 m), B3 (215 m), I3 (128 m)
<b>B3:</b>	R2 (214 m), A3 (215 m), O3 (310 m), Q4 (44 m)
<b>C3:</b>	S2 (226 m), P3 (306 m), Q4 (144 m)
<b>D3:</b>	N2 (217 m), E3 (88 m), Q3 (362 m)
<b>E3:</b>	D3 (88 m), F3 (114 m), J3 (196 m)
<b>F3:</b>	V2 (48 m), E3 (114 m), G3 (122 m)
<b>G3:</b>	F3 (122 m), H3 (46 m), K3 (78 m)
<b>H3:</b>	W2 (166 m), G3 (46 m), I3 (160 m), M3 (152 m)
<b>I3:</b>	A3 (128 m), H3 (160 m), N3 (160 m)
<b>J3:</b>	E3 (196 m), K3 (112 m)
<b>K3:</b>	G3 (78 m), J3 (112 m), L3 (72 m)
<b>L3:</b>	K3 (72 m), M3 (40 m), R3 (80 m)
<b>M3:</b>	H3 (152 m), L3 (40 m), N3 (160 m), V3 (200 m)
<b>N3:</b>	I3 (160 m), M3 (160 m), O3 (214 m), W3 (204 m)
<b>O3:</b>	B3 (310 m), N3 (214 m), Z3 (212 m), R4 (46 m)
<b>P3:</b>	C3 (306 m), R4 (150 m)
<b>Q3:</b>	D3 (362 m), R3 (160 m), S3 (98 m)
<b>R3:</b>	L3 (80 m), Q3 (160 m), U3 (122 m)
<b>S3:</b>	Q3 (98 m), T3 (39 m), B4 (96 m)

<b>T3:</b>	S3 (39 m), U3 (120 m), C4 (96 m)
<b>U3:</b>	R3 (122 m), T3 (120 m), V3 (38 m), E4 (139 m)
<b>V3:</b>	M3 (200 m), U3 (38 m), W3 (158 m), K8 (142 m)
<b>W3:</b>	N3 (204 m), V3 (158 m), Z3 (218 m), G4 (150 m)
<b>Z3:</b>	O3 (212 m), W3 (218 m), A4 (436 m), N4 (242 m)
<b>A4:</b>	Z3 (436 m), L8 (212 m), M8 (426 m)
<b>B4:</b>	S3 (96 m), C4 (35 m)
<b>C4:</b>	T3 (96 m), B4 (35 m), D4 (40 m)
<b>D4:</b>	C4 (40 m), E4 (95 m), H4 (200 m)
<b>E4:</b>	U3 (139 m), D4 (95 m), I4 (196 m), K8 (44 m)
<b>G4:</b>	W3 (150 m), L4 (96 m), K8 (157 m)
<b>H4:</b>	D4 (200 m), I4 (99 m), S4 (110 m)
<b>I4:</b>	E4 (196 m), H4 (99 m), T4 (112 m)
<b>J4:</b>	K4 (132 m), L4 (154 m), K8 (90 m)
<b>K4:</b>	J4 (132 m), M4 (147 m), U4 (88 m)
<b>L4:</b>	G4 (96 m), J4 (154 m), M4 (130 m), N4 (226 m)
<b>M4:</b>	K4 (147 m), L4 (130 m), V4 (92 m)
<b>N4:</b>	Z3 (242 m), L4 (226 m), O4 (156 m)
<b>O4:</b>	N4 (156 m), P4 (32 m), M8 (358 m)
<b>P4:</b>	O4 (32 m), Z4 (519 m), J5 (189 m)
<b>Q4:</b>	B3 (44 m), C3 (144 m), R4 (306 m)
<b>R4:</b>	O3 (46 m), P3 (150 m), Q4 (306 m)
<b>S4:</b>	H4 (110 m), T4 (103 m), A5 (74 m)
<b>T4:</b>	I4 (112 m), S4 (103 m), U4 (44 m), B5 (72 m)
<b>U4:</b>	K4 (88 m), T4 (44 m), V4 (146 m), F5 (134 m)
<b>V4:</b>	M4 (92 m), U4 (146 m), H5 (140 m)
<b>Z4:</b>	P4 (519 m), O8 (771 m), P8 (190 m)
<b>A5:</b>	S4 (74 m), B5 (103 m), C5 (100 m)
<b>B5:</b>	T4 (72 m), A5 (103 m), D5 (100 m)
<b>C5:</b>	A5 (100 m), D5 (103 m), A6 (190 m)
<b>D5:</b>	B5 (100 m), C5 (103 m), E5 (45 m), M5 (93 m)
<b>E5:</b>	D5 (45 m), F5 (46 m), N5 (70 m)

<b>F5:</b>	U4 (134 m), E5 (46 m), G5 (76 m)
<b>G5:</b>	F5 (76 m), H5 (83 m), O5 (112 m)
<b>H5:</b>	V4 (140 m), G5 (83 m), I5 (42 m), P5 (120 m)
<b>I5:</b>	H5 (42 m), J5 (173 m), Q5 (130 m)
<b>J5:</b>	P4 (189 m), I5 (173 m), K5 (81 m), S5 (138 m)
<b>K5:</b>	J5 (81 m), L5 (68 m), T5 (130 m)
<b>L5:</b>	K5 (68 m), U5 (150 m), Q8 (273 m)
<b>M5:</b>	D5 (93 m), B6 (114 m)
<b>N5:</b>	E5 (70 m), O5 (71 m), C6 (137 m)
<b>O5:</b>	G5 (112 m), N5 (71 m), P5 (89 m), E6 (45 m)
<b>P5:</b>	H5 (120 m), O5 (89 m), Q5 (42 m), F6 (40 m)
<b>Q5:</b>	I5 (130 m), P5 (42 m), R5 (81 m)
<b>R5:</b>	Q5 (81 m), S5 (96 m), H6 (56 m)
<b>S5:</b>	J5 (138 m), R5 (96 m), T5 (75 m), I6 (41 m)
<b>T5:</b>	K5 (130 m), S5 (75 m), U5 (75 m)
<b>U5:</b>	J5 (150 m), T5 (75 m), V5 (216 m), L6 (152 m)
<b>V5:</b>	U5 (216 m), W5 (52 m), M6 (150 m)
<b>W5:</b>	V5 (52 m), Z5 (151 m), Z6 (408 m), Q8 (146 m)
<b>Z5:</b>	W5 (151 m), N6 (209 m), O6 (258 m), P8 (198 m)
<b>A6:</b>	C5 (190 m), B6 (102 m), P6 (214 m)
<b>B6:</b>	M5 (114 m), A6 (102 m), C6 (37 m)
<b>C6:</b>	N5 (137 m), B6 (37 m), D6 (70 m), Q6 (218 m)
<b>D6:</b>	C6 (70 m), E6 (96 m), G6 (98 m), R6 (227 m)
<b>E6:</b>	O5 (45 m), D6 (96 m), F6 (100 m)
<b>F6:</b>	P5 (40 m), E6 (100 m)
<b>G6:</b>	D6 (98 m), J6 (131 m), S6 (228 m)
<b>H6:</b>	R5 (56 m), I6 (85 m), J6 (100 m)
<b>I6:</b>	S5 (41 m), H6 (85 m), K6 (112 m)
<b>J6:</b>	G6 (131 m), H6 (100 m), K6 (85 m)
<b>K6:</b>	I6 (112 m), J6 (85 m), U6 (236 m), S8 (63 m)
<b>L6:</b>	U5 (152 m), M6 (220 m), V6 (228 m), S8 (95 m)
<b>M6:</b>	V5 (150 m), L6 (220 m), W6 (240 m)

<b>N6:</b>	Z5 (209 m), O6 (119 m)
<b>O6:</b>	Z5 (258 m), N6 (119 m), B7 (240 m), C7 (98 m)
<b>P6:</b>	A6 (214 m), F7 (37 m), G7 (192 m)
<b>Q6:</b>	C6 (218 m), R6 (65 m), F7 (125 m), I7 (198 m)
<b>R6:</b>	D6 (227 m), Q6 (65 m), S6 (110 m), J7 (196 m)
<b>S6:</b>	G6 (228 m), R6 (110 m), T6 (150 m), K7 (202 m)
<b>T6:</b>	S6 (150 m), U6 (76 m), L7 (202 m)
<b>U6:</b>	K6 (236 m), T6 (76 m), M7 (204 m), R8 (55 m)
<b>V6:</b>	L6 (228 m), W6 (218 m), R8 (96 m)
<b>W6:</b>	M6 (240 m), V6 (218 m), Z6 (68 m), N7 (233 m)
<b>Z6:</b>	W5 (408 m), W6 (68 m), A7 (142 m)
<b>A7:</b>	Z6 (142 m), B7 (158 m)
<b>B7:</b>	O6 (240 m), A7 (158 m), D7 (46 m)
<b>C7:</b>	O6 (98 m), D7 (176 m), E7 (276 m)
<b>D7:</b>	B7 (46 m), C7 (176 m), P7 (127 m)
<b>E7:</b>	C7 (276 m), Q7 (138 m)
<b>F7:</b>	P6 (37 m), Q6 (125 m), H7 (184 m)
<b>G7:</b>	P6 (192 m), H7 (32 m), R7 (98 m)
<b>H7:</b>	F7 (184 m), G7 (32 m), I7 (130 m)
<b>I7:</b>	Q6 (198 m), H7 (130 m), J7 (71 m), S7 (102 m)
<b>J7:</b>	R6 (196 m), I7 (71 m), K7 (108 m)
<b>K7:</b>	S6 (202 m), J7 (108 m), L7 (156 m), U7 (198 m)
<b>L7:</b>	T6 (202 m), K7 (156 m), M7 (70 m), V7 (196 m)
<b>M7:</b>	U6 (204 m), L7 (70 m), N7 (364 m), W7 (204 m)
<b>N7:</b>	W6 (233 m), M7 (364 m), O7 (395 m), Z7 (217 m)
<b>O7:</b>	N7 (395 m), P7 (110 m), A8 (228 m)
<b>P7:</b>	D7 (127 m), O7 (110 m), Q7 (202 m)
<b>Q7:</b>	E7 (138 m), P7 (202 m), I8 (362 m)
<b>R7:</b>	G7 (98 m), S7 (161 m)
<b>S7:</b>	I7 (102 m), R7 (161 m), T7 (91 m)
<b>T7:</b>	S7 (91 m), U7 (179 m), B8 (250 m)
<b>U7:</b>	K7 (198 m), T7 (179 m), V7 (151 m), C8 (287 m)

<b>V7:</b>	L7 (196 m), U7 (151 m)
<b>W7:</b>	M7 (204 m), D8 (70 m), E8 (250 m)
<b>Z7:</b>	N7 (217 m), A8 (406 m), G8 (232 m)
<b>A8:</b>	O7 (228 m), Z7 (406 m), H8 (234 m)
<b>B8:</b>	T7 (250 m), C8 (212 m)
<b>C8:</b>	U7 (287 m), B8 (212 m), E8 (180 m)
<b>D8:</b>	W7 (70 m), F8 (236 m)
<b>E8:</b>	W7 (250 m), C8 (180 m), F8 (65 m)
<b>F8:</b>	D8 (236 m), E8 (65 m), J8 (364 m)
<b>G8:</b>	Z7 (232 m), H8 (416 m), J8 (224 m)
<b>H8:</b>	A8 (234 m), G8 (416 m), I8 (271 m)
<b>I8:</b>	Q7 (362 m), H8 (271 m)
<b>J8:</b>	F8 (364 m), G8 (224 m)
<b>K8:</b>	V3 (142 m), E4 (44 m), G4 (157 m), J4 (90 m)
<b>L8:</b>	T2 (592 m), A4 (212 m)
<b>M8:</b>	A4 (426 m), O4 (358 m)
<b>N8:</b>	U2 (44 m), O8 (527 m)
<b>O8:</b>	Z4 (771 m), N8 (527 m)
<b>P8:</b>	Z4 (190 m), Z5 (198 m)
<b>Q8:</b>	L5 (273 m), W5 (146 m)
<b>R8:</b>	U6 (55 m), V6 (96 m), S8 (232 m)
<b>S8:</b>	K6 (63 m), L6 (95 m), R8 (323 m)