

Amanda de Souza Rodrigues

**MÉTODO PARA ELABORAÇÃO DE UM PLANO DE  
EVACUAÇÃO EMERGENCIAL EM UMA USINA NUCLEAR  
UTILIZANDO MICROSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO**

Dissertação submetida ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade  
Federal de Santa Catarina para a  
obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil.  
Orientador: Prof. Dr. Marcos  
Aurélio Marques Noronha  
Coorientador: Prof. Dr. Alexandre  
Hering Coelho

Florianópolis  
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Rodrigues, Amanda de Souza

Método para elaboração de um plano de evacuação emergencial em uma usina nuclear utilizando microssimulação de tráfego / Amanda de Souza Rodrigues ; orientador, Marcos Aurélio Marques Noronha ; coorientador, Alexandre Hering Coelho. - Florianópolis, SC, 2014.  
161 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Plano de evacuação para emergência nuclear. 3. Microssimulação de tráfego . 4. Engenharia de tráfego. I. Noronha, Marcos Aurélio Marques . II. Coelho, Alexandre Hering . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Amanda de Souza Rodrigues

**MÉTODO PARA ELABORAÇÃO DE UM PLANO DE  
EVACUAÇÃO EMERGENCIAL EM UMA USINA NUCLEAR  
UTILIZANDO MICROSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO**

Dissertação julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Florianópolis/SC, 14 de novembro de 2014.

---

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, PhD.  
Coordenador do PPGEC/UFSC

---

Prof. Marcos Aurélio Marques Noronha, Dr.  
Orientador (UFSC/ECV)

---

Prof. Alexandre Hering Coelho, Dr.  
Coorientador (UFSC/ECV)

Banca Examinadora:

---

Prof. Sérgio Ronaldo Granemann, Dr. (UNB)

---

Prof. Valter Zanela Tani, Dr. (FAPEU)

---

Prof. Amir Mattar Valente, Dr. (UFSC/ECV)



Este trabalho é dedicado ao meu  
namorado Arthur pelo amor, apoio e  
cuidados.



## AGRADECIMENTOS

Agradecer representa o ato de refletir a cada objetivo alcançado, esforço compensado, dádiva recebida ou, mesmo, simplicidade do bom humor diário; o agradecimento representa o momento em que o indivíduo se dá conta de como determinada conquista é fundamental em sua vida, e que é resultado não apenas de seu esforço. Portanto, agradeço a todos que de alguma forma me ajudaram a concluir este trabalho, superando as dificuldades e me incentivando a seguir em frente.

Ao professor Noronha, meu orientador, agradeço pela confiança e por acreditar em meu projeto. Agradeço ao professor Amir e ao LabTrans pela oportunidade de pesquisa e pela possibilidade de ampliar meu conhecimento acadêmico, oferecendo-me total incentivo. Em especial, agradeço ao colega e coorientador Alexandre pelas orientações, lições e oportunidades de aprendizado. Aos demais colegas do laboratório, agradeço pela disponibilidade e pelo ótimo convívio.

Agradeço à Eletronuclear pela disponibilidade de informações e por importantes contribuições, alcançadas por meio de um projeto realizado pelas instituições Eletronuclear, LabTrans e FEESC, que teve como resultado a elaboração de um Estudo para Melhoria da Trafegabilidade, Segurança e Monitoramento Rodoviário da BR 101. O qual atuou como fonte de inspiração para o desenvolvimento desta dissertação.

Por fim, agradeço àqueles que melhor me compreendem: minhas amigas Carolina, Ana Carolina e Letícia, pela verdadeira amizade e respeito. À minha família: irmãs, cunhados, sobrinhos, meu pai e principalmente minha mãe, Magda, por acreditarem em meus projetos e por me apoiarem sempre.





## RESUMO

Uma situação emergencial, em que seja necessária a evacuação de determinada área, necessita de planejamento para ser executada de forma efetiva. Tendo em vista que o planejamento considera ações – as quais, se tomadas de forma ordenada, podem trazer melhores resultados –, esta pesquisa propõe um método que dê suporte ao planejamento de evacuação emergencial no entorno de uma usina nuclear. O referido método se baseia em modelagem de microssimulação de tráfego. Os principais dados de entrada do modelo são os números de viagens geradas e a infraestrutura da malha, considerando a área de estudo. Os principais dados de saída são: o tempo de evacuação dos cenários simulados, o tempo de chegada aos destinos e as representações visuais dos tempos de atraso, velocidade, entre outras características de tráfego. Para o alcance desse método, foram considerados planos de evacuação existentes e que consideram emergência nuclear, entre outros métodos já estudados que se embasam em modelagem de microssimulação de tráfego.

**Palavras-chave:** Evacuação emergencial. Microssimulação de tráfego. Plano de emergência nuclear. Plano de evacuação. Geração de viagens.



## ABSTRACT

In emergency situation, when evacuation of a given area is necessary, planning is necessary for effective execution. As planning considers actions, that, if taken in orderly manner, can bring better results, this research proposes a method that supports the planning of an emergency evacuation, in the vicinity of a nuclear power plant. This method relies vastly on traffic modeling through microsimulation. The main data inputs are: the number of trips generated and the infrastructure of the traffic mesh, considering the study area. The main outputs are: the evacuation time of simulated scenarios, the time of arrival to destinations and maps that show variables such as delay times. To the extent of this method existing evacuation plans that consider nuclear emergencies were used, among other methods that rely on traffic modeling through microsimulation.

**Keywords:** Emergency evacuation. Traffic microsimulation. Nuclear emergency plan. Evacuation plan. Trip generation.



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CET	Companhia de Engenharia de Tráfego
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
CNAAA	Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FEMA	<i>Federal Emergency Management Agency</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
HCM	<i>Highway Capacity Manual</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IAEA	<i>International Agency Energy Atomic</i>
ITE	<i>Institute Transportation Engineers</i>
ITS	<i>Intelligent Transport System</i>
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>
PAE	Plano de Apoio Externo
PEE	Plano de Emergência Externo
PEL	Plano de Emergência Local
PGT	Polo Gerador de Tráfego
PGV	Polo Gerador de Viagens
PIB	Produto Interno Bruto
PLANCON	Plano de Contingência de Proteção e Defesa Civil
PTV	<i>Planung Transport Verkehr</i>
SEDEC	Secretaria Nacional de Defesa Civil
SINDEC	Sistema Nacional de Defesa Civil
SIPRON	Sistema de Proteção ao Programa Nuclear Brasileiro
SUMO	<i>Simulation of Urban Mobility</i>
TSS	<i>Transport Simulation Systems</i>
USNRC	<i>United State Nuclear Regulatory Commission</i>
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>
ZPE	Zona de Planejamento de Evacuação
ZT	Zona de Tráfego



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Cronologia dos estudos de microssimulação de tráfego .....	51
Figura 2 – Gráfico com a capacidade elétrica dos países com reatores nucleares.....	73
Figura 3 – Comportamento do vento e direção da evacuação.....	76
Figura 4 – Representação Gráfica das ZPE recomendadas para a CNAAA.....	80
Figura 5 – Zonas do plano de evacuação .....	82
Figura 6 – Zonas do plano de evacuação .....	86
Figura 7 – Etapas de um plano de evacuação.....	90
Figura 8 – Estrutura para a elaboração de um plano de evacuação.....	92
Figura 9 – Fluxograma das etapas do método proposto.....	96
Figura 10 – Pontos de encontro, abrigos e vilas residenciais: ZPE 3..	108
Figura 11 – Pontos de encontro, abrigos e vilas residenciais: ZPE 5..	110
Figura 12 – Frota observada e estimada para o cenário futuro.....	117
Figura 13 – Exemplo de edição de uma interseção no Aimsun.....	122
Figura 14 – Exemplo de modelagem de interseções .....	123
Figura 15 – Caixa de atributos da seção em destaque .....	124
Figura 16 – Modo de visualização da velocidade, por seção .....	125
Figura 17 – Definição do centroide ao final de uma seção, ao lado a caixa de edição com os atributos relacionados ao centroide .....	126
Figura 18 – Exemplo de diversas seções conectadas a um centroide..	127
Figura 19 – Exemplo da matriz OD cenário 1.....	128
Figura 20 – Exemplo demanda de tráfego para o Cenário 1 .....	130
Figura 21 – Pasta principal da caixa de edição do Cenário 1 .....	131
Figura 22 – Exemplo de ajuste.....	132
Figura 23 – Gráfico do tempo de evacuação ZPE 3 em 2014.....	134
Figura 24 – Gráfico do tempo de chegada aos abrigos na ZPE 3 em 2014 .....	135
Figura 25 – Representação na malha dos tempos de atraso na ZPE3 em 2014.....	136
Figura 26 – Gráfico do tempo de evacuação na ZPE 3 em 2024 .....	137
Figura 27– Gráfico do tempo de chegada aos abrigos na ZPE 3 em 2024 .....	138
Figura 28 – Representação na malha dos tempos de atraso na ZPE 3 em 2024.....	139
Figura 29 – Gráfico do tempo de evacuação na ZPE 5 em 2014 .....	140
Figura 30 – Gráfico do tempo de chegada aos abrigos na ZPE 5 em 2014 .....	141

Figura 31 – Representação na malha dos tempos de atraso na ZPE 5 em 2014 .....	142
Figura 32 – Gráfico do tempo de evacuação na ZPE 5 em 2014.....	143
Figura 33 – Gráfico do tempo de chegada aos abrigos na ZPE 5 em 2024 .....	144
Figura 34 – Representação na malha dos tempos de atraso na ZPE 5 em 2024 .....	145



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número de vagas para estacionamentos em PGV industriais .....	34
Tabela 2 – Resumo de definição do modelo quatro etapas .....	36
Tabela 3 – Classificação do evento .....	39
Tabela 4 – Comparação entre as abordagens de simulação de tráfego..	44
Tabela 5 – Países que possuem reatores nucleares.....	71
Tabela 6 – Comparação dos tempos de evacuação dos simuladores.....	85
Tabela 7 – Tempo médio de evacuação .....	87
Tabela 8 – Pares O/D ZPE 3 .....	109
Tabela 9 – Pares O/D ZPE 5 .....	111
Tabela 10 – Resultados da análise de regressão pelo Excel – estatística de regressão.....	115
Tabela 11 – Resultados da análise de regressão pelo Excel: coeficientes e erro padrão.....	115
Tabela 12 – Fatores de crescimento da frota municipal .....	118
Tabela 13 – Número de automóveis por zona de tráfego .....	118
Tabela 14 – Número de ônibus zona de tráfego .....	120



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
1.1 OBJETIVOS.....	25
1.1.1 Objetivo geral.....	25
1.1.2 Objetivos específicos.....	25
1.2 JUSTIFICATIVA.....	25
1.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	26
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>29</b>
2.1 POLOS GERADORES DE VIAGENS.....	28
2.1.1 Classificação dos polos geradores de viagens .....	31
2.1.2 Geração de viagem.....	35
2.1.3 Megaevento .....	38
2.2 SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO.....	41
2.2.1 Microsimulação de tráfego.....	45
2.2.2 Modelos de microsimulação de tráfego.....	49
2.3 PLANOS DE CONTINGÊNCIA E DE EMERGÊNCIA .....	59
2.3.1 Plano de contingência.....	60
2.3.2 Plano de emergência.....	62
<b>3 ESTUDOS E MÉTODOS EXISTENTES .....</b>	<b>69</b>
3.1 ABORDAGENS DE EVACUAÇÃO: FOCO EM EMERGÊNCIA NUCLEAR.....	69
3.1.1 Plano de evacuação para usinas nucleares .....	70
3.1.2 Evacuação utilizando a microsimulação de tráfego .....	81
3.1.3 Métodos para planejamento de evacuação com microsimulação de tráfego.....	88
<b>4 MÉTODO PROPOSTO PARA A ELABORAÇÃO DE UM PLANO DE EVACUAÇÃO .....</b>	<b>95</b>
4.1 DETERMINAR A ÁREA DE ESTUDO .....	97
4.2 DEFINIR OS CENÁRIOS .....	97
4.3 DEFINIR AS ZONAS DE TRÁFEGO .....	98

4.4	COLETAR OS DADOS.....	98
<b>4.4.1</b>	<b>Modelar a demanda de tráfego .....</b>	<b>99</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Modelar a infraestrutura.....</b>	<b>101</b>
4.5	MONTAR AS MATRIZES O/D.....	102
4.6	ATRIBUIR UMA DEMANDA DE TRÁFEGO.....	103
4.7	EXECUTAR A SIMULAÇÃO .....	103
<b>4.7.1</b>	<b>Ajustes .....</b>	<b>104</b>
4.8	ANALISAR RESULTADOS.....	104
<b>5</b>	<b>APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO .....</b>	<b>107</b>
5.1	ÁREA DE ESTUDO.....	107
5.2	CENÁRIOS.....	111
5.3	ZONAS DE TRÁFEGO.....	112
5.4	COLETA DE DADOS DE ENTRADA.....	112
<b>5.4.1</b>	<b>Cálculo do número de viagens.....</b>	<b>113</b>
<b>5.4.2</b>	<b>Modelagem da malha no Aimsun.....</b>	<b>121</b>
5.5	MATRIZ OD.....	127
5.6	ATRIBUIR DEMANDA DE TRÁFEGO AOS CENÁRIOS	128
5.7	SIMULAR OS CENÁRIOS.....	130
<b>5.7.1</b>	<b>Ajustes e correção da malha .....</b>	<b>131</b>
5.8	RESULTADOS.....	133
<b>5.8.1</b>	<b>Cenário 1: ZPE 3 em 2014.....</b>	<b>134</b>
<b>5.8.2</b>	<b>Cenário 2: ZPE 3 em 2024.....</b>	<b>137</b>
<b>5.8.3</b>	<b>Cenário 3: ZPE 5 em 2014.....</b>	<b>140</b>
<b>5.8.4</b>	<b>Cenário 4: ZPE 5 em 2024.....</b>	<b>143</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>147</b>
6.1	CONCLUSÃO .....	147
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	149
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>151</b>





## 1 INTRODUÇÃO

Grandes desastres, sejam eles naturais, como terremotos, enchentes, furacões, ou artificiais, ou provocados de alguma forma por ações humanas, como ataques terroristas, vazamentos químicos, acidentes nucleares, causam enormes prejuízos: humano, ambiental e financeiro. A fim de minimizá-los, as tecnologias e os estudos na área evoluíram. No entanto, por conta do aumento populacional, dos aglomerados urbanos e mesmo devido ao desenvolvimento industrial, os desastres se apresentam cada vez mais catastróficos.

Como resposta, a sociedade busca se organizar e desenvolver estudos, visando estar mais bem preparada para as situações de risco que já aconteceram e que podem voltar a ocorrer. As ações de preparação e planejamento para os acidentes dependerão da natureza do desastre. Por exemplo, há casos em que as pessoas precisam sair previamente de suas casas, enquanto que em outros, abrigam-se nelas.

Existem desastres com diferentes características, alguns afetam uma grande área, mas podem ter baixa densidade demográfica, como, por exemplo, acidentes em que ocorre o rompimento de barragens de hidrelétricas. Outros afetam áreas menores, mas com possibilidade de atingir alta densidade populacional, como ocorre em indústrias químicas ou até mesmo em usinas nucleares.

Esse tipo de desastre tem origem em locais considerados Polos Geradores de Viagens (PGV), como indústrias e usinas, os quais influenciam na concentração de pessoas e do tráfego em seu entorno. Logo, acidentes como esses exigem uma preparação que leve em conta a necessidade de evacuação dos funcionários do local e da população, dentro de uma área de risco.

Assim, precisam ser realizados, juntamente aos planos de emergência, os planos de evacuação, definindo quando, como e para onde a população deverá ser movida. Evidencia Apte (2009) apud Campos et al. (2012) que uma lição aprendida com o fracasso da evacuação após o furacão Katrina, nos Estados Unidos, é a necessidade de planejamento de evacuação, em que devem ser consideradas as atividades que precedem a emergência, além das que ocorrem durante e após esse tipo de situação.

Conforme afirmam Stepanov e Smith (2009), a ocorrência de grandes desastres demanda respostas imediatas, de modo que as autoridades competentes e os potenciais envolvidos precisam estar

preparados da melhor forma possível. Para isso, estudos e previsões avaliando os riscos são essenciais. A existência de métodos que auxiliem no planejamento de resposta a emergências é crucial para o sucesso da execução do projeto.

Durante uma situação crítica, de modo geral, as principais fontes de suprimento, como água, alimentos e remédios, são afetadas ou encontram-se até mesmo indisponíveis. Além disso, fatores de difícil previsibilidade, como rodovias interditadas por queda de barreiras, pontes caídas, entre outros, agravam ainda mais a exposição das pessoas ao risco destacam a necessidade de estudo de rotas alternativas.

Ocorre que a complexidade dos sistemas de transportes nesses momentos de crise acentua-se, pois é preciso considerar desde a locomoção das pessoas até a necessidade de fornecimento mínimo de alimentos, água e remédios. A boa execução do planejamento de transportes no caso de uma emergência nesse caso é decisiva, e o sistema de transporte é primordial à realização dos deslocamentos.

No sentido de manter a mobilidade mínima, mesmo diante de uma crise, existe o planejamento dos sistemas de transportes, que conta com uma série de instrumentos capazes de dar suporte ao processo de tomada de decisão, relativa às políticas públicas e ações de mitigação. Ferramentas como a simulação de tráfego auxiliam, então, na preparação e verificação de um plano de evacuação.

Os modelos de simulação de tráfego podem considerar abordagens micro, meso ou macroscópicas que atuam na modelagem dos fluxos de veículos na infraestrutura. A definição da abordagem escolhida dependerá primordialmente do tamanho da área de estudo e do nível de detalhamento da malha.

Mediante a necessidade de deslocamentos emergenciais, em que muitas pessoas precisam se afastar de determinado local, em um curto intervalo de tempo, há grande possibilidade de ocorrer problemas no fluxo de tráfego. Portanto, o planejamento da evacuação deve considerar mudanças repentinas nos fluxos e no sentido do tráfego, além do aumento incomum de trânsito, como afirma Onelein et al. (2013).

A aplicação da simulação de transportes, no desenvolvimento de um método que facilite a elaboração de um plano de evacuação, permite averiguar a eficácia deste – no sentido de agregar, por meio de proposições de melhorias para a eficiência dos deslocamentos emergenciais, como os necessários em caso de um acidente nuclear.



## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um método para a elaboração de um plano de evacuação de área, com foco em uma situação de emergência nuclear, fazendo uso de microsimulação de tráfego.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Descrever como as ferramentas de transporte podem ser utilizadas para viabilizar maior eficácia de um plano de evacuação.
- Apresentar diferentes planos de evacuação existentes, com ênfase em evacuação de acidente nuclear.
- Listar as ações que precisam ser tomadas durante a realização de um plano de evacuação.
- Descrever o método proposto e implementá-lo, considerando uma área de estudo com usina nuclear hipotética.
- Modelar a área de estudo utilizando microsimulação de tráfego, de modo que, permita a aplicação do método proposto.
- Avaliar as particularidades da análise de um plano de evacuação utilizando microsimulação de tráfego.
- Identificar as vantagens de utilizar a microsimulação de tráfego, na modelagem de uma evacuação de emergência.
- Identificar as principais dificuldades relacionadas ao desenvolvimento de um plano de evacuação, com o uso de um modelo de microsimulação de tráfego.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Desastres naturais, acidentes nucleares, acidentes químicos e industriais são exemplos de situações drásticas, em que há risco eminente e a população localizada nas proximidades precisa ser deslocada para um lugar seguro. Como exemplos de grandes desastres que provocaram contaminação em determinadas áreas, tem-se Three Mile Island (em 1974), Chernobyl (em 1986), Goiânia Césio 137 (em 1987) e o mais recente, em Fukushima Daiichi (em 2011).

A eficiência das ferramentas de análise de tráfego pode atuar na melhoria do planejamento em respostas a situações emergenciais como as mencionadas, em que é necessária a evacuação de todas as pessoas da região afetada, em um curto intervalo de tempo.

Existem diversas ferramentas de análise de tráfego. Segundo FHWA (2004a), elas podem ser pacotes de *softwares*, metodologias e procedimentos utilizados geralmente para realizar tarefas, como:

- Simular ou otimizar operações dos sistemas de transporte.
- Modelar operações existentes e prever possíveis resultados, analisando propostas futuras.
- Avaliar vários contextos analíticos, inclusive planejamento, desenho geométrico, operação e implantação de projetos.

Algumas funções das ferramentas de análise de tráfego são: melhorar o processo de tomada de decisão; avaliar e priorizar alternativas de planejamento e operação; melhorar projetos avaliando tempos e custos; reduzir distúrbios no tráfego; operar e gerenciar as capacidades das vias existentes (FHWA, 2004a).

A previsão de demanda de tráfego e o cálculo do número de viagens são variáveis utilizadas na microsimulação, que consiste em uma aplicação das ferramentas de análise de tráfego. Ela pode ser empregada e estudada na proposição de um método que facilite o planejamento da evacuação de uma área, em situação de emergência.

A questão principal abordada neste trabalho é como sistematizar as atividades envolvidas na elaboração de um plano de evacuação, através de um conjunto de abordagens técnicas e processos, buscando resolver os problemas existentes e agregar conhecimento ao processo de desenvolvimento dos planos de evacuação.

### 1.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

De acordo com Gil (2005), o conceito de pesquisa consiste no processo formal e sistemático de desenvolvimento do método científico, que tem como objetivo descobrir respostas para problemas. Para Silva e Menezes (2001), uma pesquisa é realizada quando se tem um problema e não se têm informações para solucioná-lo.

A presente pesquisa, do ponto de vista de sua natureza, é classificada como aplicada, pois tem como fim gerar conhecimentos para aplicação prática dirigida à solução de problemas específicos. No que tange à forma, classifica-se como quantitativa, haja vista que considera variáveis capazes de ser quantificáveis e faz uso de recursos e

técnicas estatísticas como média, coeficiente de correlação, análise de regressão, entre outras (SILVA; MENEZES, 2001).

Com caráter exploratório-descritivo, esta pesquisa é considerada exploratória por ser realizada em uma área com pouco conhecimento científico acumulado ou sistematizado, sendo também descritiva, por se tratar de uma pesquisa que expõe características de determinado fenômeno, estabelecendo relações entre variáveis (SILVA; MENEZES, 2001).

A pesquisa bibliográfica foi realizada em livros, artigos científicos, dissertações e teses, disponíveis em bibliotecas de instituições públicas e na internet. Os conceitos considerados relevantes na pesquisa, capazes de auxiliar no desenvolvimento do método proposto, compõem o segundo capítulo, denominado Revisão Bibliográfica.

Procurou-se confrontar as informações levantadas nesta pesquisa, através da aplicação das mesmas, a fim de identificar qual a melhor maneira de realizar um plano de evacuação. O método proposto foi desenvolvido a partir de dados de um determinado município onde, segundo suas características geográficas e de ocupação de solo, a implantação de uma usina nuclear seria possível.

Adotando-se uma lógica embasada nas referências bibliográficas e fazendo uso de dados para uma usina hipotética, foi possível averiguar quais as etapas necessárias para o planejamento de uma evacuação de emergência. A determinação sequencial e as características das etapas que compõem o método sugerido ocorrem também com a utilização de ferramentas de microssimulação. O software utilizado neste estudo é o Aimsun versão 8.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Evacuação é uma estratégia comum na gestão de emergência. Em muitos eventos de risco, a melhor opção é realocar a população ameaçada para áreas mais seguras. A execução de um plano de evacuação é complexa, envolve gestão de risco e necessita de um robusto planejamento de ações, haja vista que diversos problemas de transporte podem surgir durante uma evacuação, como, por exemplo, interdição de vias, atrasos e congestionamentos.

Durante uma situação de emergência, a evacuação bem sucedida de determinada área conta decisivamente com um planejamento para a utilização dos meios de infraestrutura de transportes. Destaca-se que garantir a mobilidade das pessoas através do bom funcionamento do trânsito é fundamental para a segurança e tranquilidade dos envolvidos.

Assim, a formulação de um método que colabore para a elaboração de um plano de evacuação necessita explorar conceitos relacionados ao planejamento de transportes, tais como simulação de tráfego. Bem como abordar conceitos pertinentes aos planos de evacuação de caráter emergencial.

As emergências seguidas de evacuação podem advir de desastres naturais, acidentes industriais, químicos, entre outros. O fato é que quando relacionadas aos Polos Geradores de Viagens (PGVs), têm seus impactos ampliados. Por conta disso, também precisam ser observadas as características dos PGVs na formulação do método.

### 2.1 POLOS GERADORES DE VIAGENS

Com os avanços da urbanização, nota-se o aumento da necessidade de deslocamentos, seja por motivo de trabalho, educação, saúde, lazer ou outros. Os espaços urbanos estão em constante transformação e as diferentes formas de ocupação do solo impactam no trânsito, sendo este a utilização das vias por pessoas, veículos e animais (CTB, Art. 1º, § 2º, 1998).

No sentido de melhorar a circulação em torno de grandes empreendimentos, trazendo maior fluidez ao trânsito, foram realizados diversos estudos, que se iniciaram nos Estados Unidos e na Europa. Mais tarde, no Brasil, eles ganharam ênfase a partir da década de 1980 e denominaram os empreendimentos, que influenciavam na circulação local, como Polos Geradores de Tráfego (GONÇALVES *et al.*, 2012).

De acordo com o Denatran (2001), PGT é um empreendimento de grande porte que atrai ou gera considerável número de viagens e provoca reflexos negativos na circulação viária de seu entorno, prejudicando a acessibilidade de toda a região, onde o edifício está localizado. Por conta disso, surgiu a necessidade de realizar estudos e adotar medidas estratégicas prévias à instalação desses empreendimentos.

Os PGTs, segundo Portugal e Goldner (2003), consistem em estruturas capazes de produzir e atrair uma maior circulação de pessoas e veículos, afetando o sistema viário de uma região. Primeiramente, o foco nos impactos provocados pela circulação veicular e influência dos estacionamento e os estudos dos PGT eram voltados basicamente à movimentação de automóveis.

As avaliações e conceitos evoluíram, de modo que as viagens e o impacto delas no sistema de transporte passaram a ser considerados de maneira determinante. Não obstante, as diferentes modalidades, como o transporte coletivo e os não motorizados também começam a fazer parte das análises. Isso estendeu o foco de estudo e os empreendimentos passam a ser chamados de Polos Geradores de Viagens.

Portanto, o conceito de PGV engloba o de PGT, de acordo com Kneib (2004). Enquanto este se atém ao planejamento operacional do sistema de transportes, àquele busca contemplar os impactos na estrutura urbana causados pelo empreendimento, no médio e no longo prazo.

Ainda segundo Kneib (2004), o conceito de PGV, além dos aspectos mencionados, leva em conta os impactos sobre o uso e ocupação do solo de sua área de influência, o que é capaz de alterar as características da centralidade de uma área. O PGV gera o deslocamento de pessoas de diferentes origens até ele ou a partir dele, com distintos destinos. Essa movimentação em torno do empreendimento afeta a acessibilidade e, no longo prazo, outros aspectos como a valorização do entorno.

Conforme Gonçalves *et al.* (2012), os estudos dos PGVs possuem basicamente três momentos. A princípio, considerava-se a interferência do tráfego no sistema de circulação viário. No segundo momento, a geração e a atração de viagens passaram a fazer parte dos estudos e, no terceiro, foram averiguados também os demais modos, inclusive os de transporte coletivo e os não motorizados.

Torna-se cada vez mais comum a existência de empreendimentos que contemplam uma combinação mista de estabelecimentos. Eles resultam do adensamento de novos centros comerciais e outras áreas

concentradoras de serviços. Considerando os impactos que os PGVs são capazes de provocar nas formas de utilização do solo, é fundamental identificar as características do polo como finalidade e tamanho.

Salienta-se que, dependendo da natureza do empreendimento, a localização deste precisa estar de acordo com especificações do plano diretor do município, que considera áreas comercial, industrial, residencial, entre outras. Por conta disso, é essencial a caracterização do PGV.

### **2.1.1 Classificação dos polos geradores de viagens**

A caracterização dos PGVs pode ocorrer segundo o tipo, o porte, o número de viagens e os impactos provocados por ele. No que tange ao tipo, consideram-se as atividades desenvolvidas no PGV, enquanto que, o porte representa o tamanho, estando diretamente ligado à magnitude da demanda de viagens que o polo irá gerar. (PORTUGAL e GOLDNER, 2003).

A intensidade das atividades está diretamente relacionada ao impacto que o empreendimento será capaz de provocar em seu entorno. Neste sentido, a CET (1983) os classifica os polos em duas categorias:

- Micropolos, cujos impactos isolados são pequenos, mas, quando agrupados, podem gerar impactos significativos, como farmácias, escolas, restaurantes.
- Macropolos, abrangem construções de grande porte que, mesmo isoladas, podem causar impactos expressivos, necessitando de atenção especial. Exemplos: hospitais, universidades, *shoppings*, hotéis, fábricas etc.

O Denatran (2001) considera as seguintes categorias de atividades para um empreendimento:

- Habitacional: pode ser permanente ou transitória.
- Comunitário: considera instalações destinadas à educação, lazer, cultura, saúde, assistência social e religiosa.
- Comercial e de serviços: voltada às atividades de troca que visam ao lucro, portanto, há circulação de mercadorias. Pode ser caracterizada ainda pela prestação de mão de obra e assistência.
- Industrial: consiste na transformação de insumos pela produção de bens.

Para Portugal e Goldner (2003), os polos podem ser classificados quanto à natureza, como *shoppings centers* e lojas; hipermercados e supermercados; estabelecimentos de ensino em geral; hospitais, prontos-socorros, maternidades e clínicas médicas; estádios, ginásios esportivos, autódromos, hipódromos e academias; hotéis e motéis; restaurantes, cinemas, teatros, templos, igrejas e auditórios; indústrias e oficinas; conjuntos residenciais; prédios de escritórios; pavilhões para feiras e exposições; parques e zoológicos; entreposto e terminais atacadistas; aeroportos, portos, rodoviárias e garagens.

O *Institute Transportation Engineers* (ITE) estabelece 162 atividades organizadas em dez categorias de empreendimentos, a constar: portuário/terminal, industrial, residencial, hotéis/motéis, recreacional, institucional, saúde, escritório, comércio e serviços. A subdivisão dessas categorias considera a natureza das atividades do empreendimento.

Observa-se que a classificação do porte de um PGV pode seguir diversos critérios, sendo os mais comuns e mencionados na literatura: área de construção, tipo de uso, número de vagas exigido para seu estacionamento, localização do empreendimento, número de unidades, danos provocados ao meio ambiente, entre outros. A caracterização de um PGV está relacionada às determinações do município a respeito das formas de utilização do solo.

Mesmo dentro de um mesmo país, existem cidades que adotam metodologias diferentes para a caracterização dos PGVs. Em Curitiba, segundo Denatran (2001), todo empreendimento que apresenta uma área de construção igual ou superior a 5.000 m<sup>2</sup> é considerado como polo gerador de viagem.

Em Belo Horizonte, a classificação considera: a) empreendimento de uso não residencial, no qual a área edificada seja superior a 6.000 m<sup>2</sup>; b) empreendimento de uso residencial que tenha mais de 150 unidades; c) empreendimento de uso misto, em que o somatório da razão entre o número de unidades residenciais é 150, e da razão entre a área da parte da edificação destinada ao uso não residencial de 6.000 m<sup>2</sup> seja igual ou superior a um (DENATRAN, 2001).

O município de São Paulo, desde 1987, utiliza como parâmetro de classificação o número de vagas exigido para o estacionamento dos empreendimentos. Os parâmetros evoluíram, tornando-se normalmente mais flexíveis, mas de modo geral continuam a levar em consideração o tipo de atividade e o tamanho do empreendimento (PORTUGAL; GOLDNER, 2003).



Atualmente, cidades como São Paulo, Rio de Janeiro e Juiz de Fora atribuem várias categorias como lojas de departamento, supermercados, hotéis, hospitais, escritórios, entre outras. Cada uma dessas cidades leva em consideração a área em  $m^2$  ocupada pelo empreendimento, ou a quantidade de unidades no caso das residências.

Em países como Portugal, Uruguai, Chile e Argentina os critérios para a caracterização dos PGVs são semelhantes, apesar de possuírem algumas particularidades. Tais como, no Uruguai existe uma indicação quanto ao tipo de estudo de impacto que deve ser realizado. Em Portugal, a caracterização ocorre com base na área construída. Já o Chile se fundamenta no número de vagas de estacionamento. Na Argentina, a caracterização se concentra nos empreendimentos comerciais, os demais tipos não são considerados no estudo (GONÇALVES *et al.*, 2012).

O entendimento das características de um polo gerador de tráfego industrial permite compreender aspectos como seu tamanho, influências e impactos no tráfego. Essas informações podem incrementar os estudos prévios à montagem de um plano de evacuação para PGVs identificados como industriais, como é o caso das usinas nucleares.

#### 2.1.1.1 PGV industrial

De modo geral, mesmo com a adoção de diferentes parâmetros, os PGVs são categorizados em residencial, comercial, empresarial e industrial. O Estado da Califórnia, nos Estados Unidos, considera o número de viagens geradas pelo empreendimento no horário de pico. Para isso, utiliza essencialmente a área total do empreendimento, conforme os itens a seguir (CUNHA, 2009):

- residencial – superior a 100 unidades de habitações;
- comercial – área superior a  $140 m^2$ ;
- empresarial – área superior a  $1.400 m^2$ ;
- industrial – área superior a  $1.860 m^2$ .

Uma vez que existem diferentes formas para a classificação dos PGVs no Brasil, destaca-se a classificação adotada por algumas das grandes cidades do país. No artigo 1º do Decreto nº 36.613, de 06 de dezembro de 1996, do município de São Paulo (SP), constam como empreendimentos de significativo impacto ambiental ou de infraestrutura urbana, de origem pública ou privada, aqueles cujo uso e área de construção computável se enquadrem nas seguintes categorias:

- residencial – igual ou superior a  $80.000 m^2$ .

- comercial – igual ou superior a 60.000 m<sup>2</sup>;
- empresarial – igual ou superior a 40.000 m<sup>2</sup>;
- industrial – igual ou superior a 20.000 m<sup>2</sup>.

A indicação aparente do potencial de impactos dos PGVs é realizada com base nas dimensões do empreendimento. O tipo de categoria do PGV, considerando a área construída, segundo o Denatran (2001), é classificado em:

- pequeno porte – até 100 m<sup>2</sup>;
- médio porte – entre 100 m<sup>2</sup> e 400 m<sup>2</sup>;
- grande porte – superior a 400 m<sup>2</sup>.

Ainda de acordo com o Denatran (2001), o polo gerador industrial é identificado como tendo uma área computável maior que 2.500 m<sup>2</sup>, sendo necessária uma vaga de estacionamento para cada 200 m<sup>2</sup> da área de construção. Cabe salientar que se entende por área computável, a área construída total menos as áreas construídas de garagens e de ático. A classificação de PGVs industriais, considerando o número de vagas para estacionamento, nas cidades de Curitiba e São Paulo, constam na Tabela 1.

Tabela 1 – Número de vagas para estacionamentos em PGV industriais

<b>Cidade</b>	<b>Tipo</b>	<b>Número de vagas estacionamento</b>
Curitiba	Indústrias em geral	01 vaga para cada 80 m <sup>2</sup> de área destinada à administração e 01 vaga para cada 25 m <sup>2</sup> do restante da área construída.
São Paulo	Indústria	2.000 m <sup>2</sup> < área computável. < 4.000 m <sup>2</sup> e 01 vaga/25 m <sup>2</sup> . Área computável > 4.000 m <sup>2</sup> - 1 vaga/30 m <sup>2</sup> e 01 vaga/100 m <sup>2</sup> de área computável.

Fonte: Denatran (2001).

Como exemplos brasileiros de usina nuclear, tem-se Angra 1 com aproximadamente 38 mil m<sup>2</sup> e Angra 2 com quase 94 mil m<sup>2</sup> (ELETRONUCLEAR, 2014). A área construída das usinas permite que as mesmas sejam classificadas como PGVs industriais.

A capacidade do estacionamento em um PGV industrial pode auxiliar a estimar o número de viagens geradas por este PGV. Como

consta em Portugal e Goldner (2003), nos Estados Unidos fatores como a localização da indústria, o transporte coletivo, o turno de trabalho, o tipo de indústria, entre outros, são determinantes no número de vagas do estacionamento e no número de viagens geradas.

### 2.1.2 Geração de viagem

O estudo de geração de viagens é imprescindível aos estudos de tráfego, pois é através dele que se estima o número de viagens. Esse número considera a quantidade de veículos que realizam, ou irão realizar, viagens na área de estudo, considerando os pares de Origem e Destino (O/D) existentes.

De acordo com DNIT (2006), o conceito de viagem pode ser definido como cada percurso realizado por um veículo, uma pessoa ou uma mercadoria, desde que haja possibilidade de esta ser caracterizada segundo o seu meio de transporte. A viagem parte de um ponto de origem para um ponto de destino.

Ortúzar e Willumsen (2001) descrevem que as viagens podem ser baseadas nas residências ou não. Denominam de *Home-based* (HB) *trip* são aquelas viagens baseadas nas residências, nestes casos a residência é tida como ponto de origem ou de destino da viagem. Enquanto que *Non-home-based* (NHB) *trip* são as viagens que não possuem como base as residências, tendo origem ou destino em outros locais como trabalho, comércio, escolas etc.

As viagens podem ser classificadas ainda de acordo com o propósito que possuem, como hora do dia ou tipo de usuário. Basicamente, o objetivo da geração de viagem é identificar o número de viagens produzidas e atraídas para cada zona de tráfego, em que se entende produção como origem, e atração, como destino dos deslocamentos.

Uma abordagem bastante tradicional no planejamento de transporte e que faz uso da geração de viagens é o modelo de quatro etapas, o qual compreende as seguintes etapas: geração de viagens, distribuição de viagens, escolha do modal e alocação das viagens.

Primeiramente, identificam-se as características dos viajantes e de usos do solo. Estas características são calibradas e validadas para produzir uma estimativa de demanda, que normalmente se apresenta através de uma Matriz Origem e Destino (O/D). As etapas seguintes realizam o carregamento da demanda gerada na rede de transporte, através de um processo que considera a divisão modal e a escolha de rotas (alocação) (MACNALLY, 2007).

A Tabela 2 apresenta de forma resumida a definição de cada etapa do modelo quatro etapas.

Tabela 2 – Resumo de definição do modelo quatro etapas

<b>Etapas</b>	<b>Descrição</b>
1. Geração de Viagens	A área de estudo é subdividida em zonas de tráfego, conforme suas características socioeconômicas e de uso de solo, buscando a maior homogeneidade de cada zona. As viagens produzidas terão origem em cada uma dessas zonas e as atraídas por determinada zona, terão esta como destino.
2. Distribuição de Viagens	As viagens geradas por uma determinada zona de tráfego devem ser distribuídas de modo a identificar os volumes para as demais zonas. Significa o momento de determinar o destino e a origem das viagens. Para isso, desenvolve-se uma matriz OD.
3. Escolha Modal	É estimada a porcentagem das viagens que serão feitas por tipo de modal. É permitida a simplificação, através do agrupamento das viagens realizadas por modos similares, como transporte público, veículos particulares e modos não motorizados.
4. Alocação de Viagens	É considerada a rede de transportes em questão, pois trata-se da alocação das viagens estimadas na referida rede, através da definição das rotas.

Fonte: Andrade e Portugal (2012) e Mello (1975).

Mello (1975) descreve que a geração de viagens abrange a determinação do número do tráfego gerado. Este é constituído por viagens que se originam em uma determinada zona de tráfego, por unidade de tempo. O tráfego gerado é composto por uma quantidade de viagens produzidas e também pela quantidade de viagens atraídas por uma dada zona de tráfego, em uma unidade de tempo.

A modelagem para a previsão de geração de viagens depende essencialmente da quantidade e da qualidade dos dados, além da forma estrutural dos modelos. Os dados são obtidos considerando as relações entre as características das viagens e as informações sobre a situação socioeconômica da população (MELLO, 1975).

Conforme Ortúzar e Willumsen (2001), o método que aplica análise de regressão para o cálculo da geração de viagens tem sido o mais utilizado, pois se apresenta como superior ao método do fator de crescimento – este, apesar de já ter sido muito empregado, proporciona resultados menos precisos.

Com relação ao estudo dos PGVs, de acordo com Andrade e Portugal (2012), o conceito de geração de viagens ganha um novo significado. Ao invés da zona de tráfego, o empreendimento ou a atividade é que passam a ser considerados como origem ou destino. A quantidade de viagens cuja origem é o polo são as viagens produzidas, e a elas são somadas as viagens atraídas pelo mesmo. O resultado será a quantidade de viagens geradas pelo PGV.

A Companhia de Engenharia de Tráfego (CET) da cidade de São Paulo definiu equações matemáticas que permitem determinar a geração de PGV industriais em função do número de funcionários, ou da área construída, ou da área total do terreno.

Em função do número de funcionários, chegou-se à Equação 1:

$$v = 0,545 * NF - 12,178 \quad (1)$$

Sendo que  $v$  é o número de viagens atraídas na hora de pico e  $NF$  o número de funcionários.

Em função da área construída, chegou-se à Equação 2:

$$v = 0,031 * AC - 23,653 \quad (2)$$

Em que  $v$  é o número de viagens atraídas na hora de pico e  $AC$  a área construída em  $m^2$ .

Outra forma de estimar o número de viagens atraídas pelo PGV industrial é em função da área total do terreno, conforme a Equação 3:

$$v = 0,021 * AT - 4,135 \quad (3)$$

Sendo  $v$  o número de viagens atraídas na hora de pico e  $AT$  a área total do terreno em  $m^2$  (GOLDNER, 2014).

Uma situação de emergência em uma usina nuclear tem as características de um evento especial, em que um grande número de viagens são produzidas e não atraídas, visto que as pessoas precisam se afastar da área de risco. Senso assim, o cálculo do número de viagens no caso de uma emergência nuclear não é bem representado pelas equações anteriores, visto que elas se referem às situações normais de tráfego.

No que se refere aos eventos especiais, Pinto *et al.* (2012) salientam que a compreensão de origens, destinos e percursos das viagens, bem como o tempo de deslocamento dos agentes envolvidos, tornam-se elementos imperativos para a prospecção de público, no dia do evento. Para melhor compreender esses eventos tidos como especiais também chamados de megaeventos, a seção 2.1.3 descreve suas principais características.

### **2.1.3 Megaevento**

A realização de um megaevento se dá em um determinado espaço físico, identificado como um PGV. Este detém características específicas e precisa ter seus impactos estudados, no sentido de adotar ações mitigatórias, principalmente no que diz respeito ao setor de transportes, mantendo a mobilidade do tráfego.

Na realização de um evento de grandes proporções, as diversas redes urbanas precisam ser consideradas de forma integrada. Sendo assim, é fundamental um planejamento que contenha a adoção de estratégias para o setor de transportes. Além disso, os impactos de um megaevento são muitos, sendo que os ambientais e econômicos possuem forte vínculo com os transportes (PINTO *et al.*, 2012).

Os megaeventos estão relacionados a acontecimentos em nível mundial, como os Jogos Olímpicos e a Copa do Mundo. Eventos assim envolvem uma quantidade acima de 100.000 de pessoas, como consta em Britto e Fontes (2002) e Gomes (2008). Conforme o tamanho do evento, ele poderá ser classificado como: pequeno, médio, grande, superevento ou megaevento.

Existem outras diversas classificações adotadas por diferentes autores, que consideram a finalidade, a localização, a frequência, entre outros fatores. A classificação de um evento diferencia-se basicamente pela dimensão, possibilidade de estimativa de pessoas, duração, disponibilidade de transportes, além dos impactos provocados no trânsito e na circulação de pedestres (PINTO *et al.*, 2012).

Para este estudo o mais importante é o tamanho do evento, isto leva em conta a quantidade de pessoas envolvidas e a abrangência geográfica. Essas variáveis, juntamente com a infraestrutura existente afetam de forma decisiva na mobilidade do transporte. A Tabela 3 relaciona características como o tamanho e abrangência do evento.

Tabela 3 – Classificação do evento

<b>Porte do evento</b>	<b>Número de pessoas</b>	<b>Abrangência</b>
Pequeno	até 200	local ou regional
Médio	entre 201 e 500	estadual ou nacional
Grande	entre 501 e 10.000	estadual ou nacional
Super evento	entre 10.001 e 100.000	nacional ou internacional
Megaevento	mais de 100.000	internacional

Fonte: Gomes (2009).

No caso de evacuação da população, devido a um acidente em uma usina nuclear, a magnitude do evento dependerá da quantidade de pessoas que moram no entorno da usina. Destaca-se que no momento de implantar uma usina nuclear, aspectos como o nível de urbanização e a quantidade de pessoas em suas proximidades são averiguados, objetivando atingir o menor número de pessoas possível caso ocorra uma emergência.

Assim, num evento como um acidente nuclear, a localização da usina em área não urbanizada deve ser observada, de modo que o evento pode ser classificado como de grande porte, em que o número de pessoas não ultrapassa os 10.000. No entanto, caso a situação se agrave e seja necessária a evacuação de um raio maior que o previsto, atingindo maior área e número de pessoas, o acidente pode passar a se tornar um superevento.

Com relação à abrangência, a evacuação ocorre de modo local. No entanto, o nível de severidade do evento culmina na mobilização de órgãos estaduais e federais, o que o torna um evento nacional. Outras classificações, como frequência e duração, não cabem nessa situação, pois a evacuação de uma usina nuclear não segue um padrão definido, e apesar de toda a preparação para ela, os esforços maiores são para evitá-la.

De acordo com Pinto *et al.* (2012), para uma melhor execução de um evento de grandes proporções, estudos devem ser realizados considerando aspectos como: a infraestrutura e as instalações necessárias; a localização das acomodações; os recursos disponíveis (humanos ou materiais); a definição de datas; a segurança e tecnologia.

A análise desses aspectos, bem como dos demais necessários ao apoio da evacuação dos funcionários de uma usina nuclear e de seu entorno, deve ser feita por meio de um plano de emergência, o qual

considera o plano de evacuação. A necessidade de realização de um evento como esse traz diversos impactos, tais como ambientais, socioculturais, turísticos, no trânsito e nos transportes.

O impacto social em uma evacuação ocorre com a retirada das pessoas de suas casas, mudando a rotina dessas pessoas, afetando também o cotidiano do local, por um período desconhecido. O impacto ambiental, nesse caso, pode ser ainda mais negativo que o de um megaevento, pois dependerá da gravidade do acidente. Essa situação afetaria também o turismo e a economia local.

Os impactos de um evento de grande porte relacionado ao sistema viário e de transportes, podem ser observados em locais de acesso de veículos, locais para embarque e desembarque, na interferência da sinalização existente, conversões, conflitos com pedestres e em relação ao transporte coletivo (TOLFO; PORTUGAL, 2007).

Há, além disso, o incremento de tráfego trazido pela evacuação. Todos os veículos seguirão um mesmo fluxo, no sentido de se afastarem do local, o que pode gerar congestionamentos, tal como ocorre ao final de grandes eventos como jogos em grandes estádios. Por conta disso, Tolfo e Portugal (2007) destacam que estudos prévios da situação viária precisam ser realizados para a melhoria das condições de trânsito.

Os mesmos autores consideram que para manter a trafegabilidade, esses estudos precisam estar relacionados à alteração no padrão de viagens e ao uso do solo, tanto no entorno quanto na sua área de influência do PGV, evidenciando a importância de esses aspectos serem atendidos no desenvolvimento do plano de evacuação.

#### 2.1.3.1 Planejamento do evento

No planejamento de um megaevento, identificam-se os agentes envolvidos. Isso inclui a determinação dos órgãos responsáveis por determinadas atividades e a vinculação entre eles, suas equipes e seus grupos operacionais. Nesse processo, há a hierarquização das responsabilidades, o estabelecimento de regras, a regulamentação de rotinas de trabalho, além da definição da infraestrutura necessária (LATOSKI *et. al.*, 2003).

Para a avaliação dos impactos no trânsito e nos transportes, são desenvolvidos prognósticos das viagens geradas pelo evento. A partir disso, são definidas responsabilidades entre os envolvidos no processo de planejamento a fim de mitigar os conflitos gerados pelo evento no trânsito, como consta em Pinto *et al.* (2012).



Aspectos como a expectativa de público, a preparação, a localização das instalações, a necessidade de fechamento de rua e controle de tráfego, a quantidade de pessoas envolvidas, a notificação do evento e a capacidade de liberar as vias após o encerramento do evento constituem fatores que precisam ser calculados e averiguados através da realização de cenários de simulação (LATOSKI *et. al.*, 2003).

Além disso, Latoski *et al.* (2003) consideram que para o planejamento de um evento especial, precisam ser abordados aspectos como a coordenação regional e local, o planejamento das operações do evento, o gerenciamento e controle de tráfego, a gestão de demanda por viagem, além das atividades anteriores, durante e após o evento.

## 2.2 SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

Os simuladores de tráfego, conforme descreve Gonçalves (2012), tratam, de modo geral, dos componentes ligados aos sistemas de tráfego, como os tipos de veículos, o número de vias, sinalização semafórica, entre outros. A simulação de tráfego visa verificar o comportamento da rede viária à medida que esta é afetada pelos componentes citados, entre outros que podem ser modelados conforme os objetivos pretendidos.

Conforme Vasconcelos (2004), a simulação de tráfego é largamente utilizada no âmbito dos processos de planejamento e gestão de sistemas de transportes. Para a utilização da simulação de tráfego como instrumento de gestão de transportes, são necessários recursos como dados de entrada e instrumentos computacionais, que permitam a simulação de cenários.

Vasconcelos (2004) também destaca como dados de entrada a matriz O/D das viagens futuras e a rede codificada sobre a qual serão distribuídas as viagens. Além desses dados, faz-se necessária a existência de um conjunto de elementos que representem o processo de interação dos condutores com a rede (parâmetros), bem como os trajetos entre os vários pares O/D, que devem ser carregados conforme as respectivas viagens.

De acordo com o DNIT (2006), a simulação do tráfego só é possível mediante uma completa descrição das vias que irão compor a referida rede. Assim, é imprescindível o acesso às características da malha, tais como distância, velocidades, custos operacionais, custos de tempo de viagem, entre outros. Esses fatores são obtidos em função do cadastro rodoviário do trecho e dos custos unitários de transporte, estabelecidos para cada tipo de veículo considerado.

Portanto, para cada via da rede básica, deve-se obter uma descrição completa de dados como as seguintes (DNIT, 2006).

Local: situação na área de estudo, ressaltando sua importância, categoria e principais interseções.

Dimensões Físicas: caracterização de cada via (comprimento, largura, número de faixas de tráfego, tipo de via, controles de acesso etc).

Características do Tráfego: velocidade média de viagem nas horas de pico e fora delas, volumes de tráfego existentes, composição modal do tráfego etc.

Regulamentação do Tráfego: sinalização das vias, mãos de direção, possibilidades de estacionamento, conversões proibidas, entre outros.

A rede de transportes coletivos também deve ser considerada, sendo necessário, além dos dados levantados para a rede viária, o inventário geral do sistema de transportes coletivos, contendo (DNIT, 2006):

- mapa das rotas;
- intervalos médios entre veículos consecutivos de cada rota (*headway*);
- comprimento e tempo médio de percurso de cada rota;
- períodos de operação;
- frotas de veículos;
- custos de operação.

O grande benefício da simulação de tráfego, segundo Portugal (2005), está relacionado ao fato de evitar dispendiosos testes em campo, que além de apresentarem riscos muitas vezes são impossíveis de serem realizados. A simulação oportuniza testar novas alternativas, com diferentes cenários, capazes de representar diferentes ambientes de tráfego.

Esses cenários permitem que sejam considerados diferentes horários do dia, mudanças no tempo (presente/futuro), mudanças no volume de tráfego e possíveis incidentes, avaliando de várias formas a situação da área estudada antes de uma real intervenção no tráfego. Busca-se através da técnica de simulação replicar sinteticamente uma sequência de eventos hipotéticos no sistema em estudo (PORTUGAL, 2005).

Normalmente, os simuladores são limitados pelo tamanho da rede, pela quantidade de interseções, quarteirões e pelo tipo de abordagem adotada. Assim, a simulação de tráfego pode ser classificada

como macrossimulação, mesossimulação ou microssimulação, isso dependerá do tamanho da rede e do nível de detalhamento buscado. Quanto menor a área a ser analisada, maior o nível de complexidade e detalhamento da simulação (GONÇALVES, 2012).

A princípio, a utilização de modelos de simulação em planos de evacuação se deu com macrossimuladores, que buscavam simular o fluxo de tráfego com base na velocidade e no volume de tráfego. Nesses sistemas não eram observadas as interações entre os veículos individuais, nem os detalhamentos da rede viária, como consta em Chen, Maker e Zhan (2006).

De acordo com Setti (2005), a macrossimulação pressupõe que a corrente de tráfego é formada por veículos e condutores com características semelhantes, sendo mais adequada aos estudos em que as condições de fluxo são constantes. Já a microssimulação avalia os veículos e os condutores de forma individual, sendo que, neste caso, os condutores e os processos interativos que ocorrem são detalhados tanto quanto necessário ao propósito do estudo. Por meio do fornecimento de informações como o cálculo do tempo de viagem e ds análise das melhores rotas, os simuladores de tráfego podem aperfeiçoar a elaboração de planos de emergência.

A mesossimulação é considerada uma abordagem intermediária. Trata-se de um tipo de modelo que embora não chegue ao detalhamento dos veículos individuais, permite a simulação de fenômenos de tráfego causados por comportamentos individuais. O modelo de mesossimulação é visto como o mais apropriado para a representação de redes um pouco mais extensas que as representadas na microssimulação – contudo, de forma relativamente mais detalhada que a apresentada na macrossimulação (SETTI, 2005).

Os modelos de mesossimulação também são capazes de descrever os dados de trânsito com certo nível de detalhamento, considerando uma área um maior e com menos particularidades que os de microssimulação. Nesse sentido, a mesossimulação é recomendada para aplicações de escolha de rota, em áreas com tamanho e nível de detalhamento intermediários (BURGHOUT, 2005).

A Tabela 4 compara as abordagens de simulação de tráfego, o que permite observar a diferença entre estas, indicando suas funções, vantagens e limitações.

Tabela 4 – Comparação entre as abordagens de simulação de tráfego

	<b>Microsimulação</b>	<b>Mesossimulação</b>	<b>Macrossimulação</b>
<b>Funções</b>	<p>Descrever o comportamento do elemento veículo/motorista como resposta a um estímulo recebido baseados nas teorias de <i>car-following</i>, <i>lane change</i> e <i>gap acceptance</i>.</p>	<p>Simular os veículos individuais descrevendo suas interações sobre as relações de agregados. Mescla aspectos da macro e da microsimulação, realizando uma simulação híbrida para uma melhor adequação do modelo.</p>	<p>Descrever o comportamento das correntes de tráfego, baseados nas suas relações determinísticas do fluxo, da velocidade e da densidade do tráfego.</p>
<b>Vantagens</b>	<p>Possui elevado nível de detalhamento de uma área. Permite o estudo de fluxos não homogêneos.</p>	<p>Combina as propriedades dos modelos macroscópicos e microscópicos. Permite análise de uma área de estudo intermediária.</p>	<p>Permite uma melhor compreensão das limitações de capacidade dos sistemas viários como um todo. Permite a avaliação de consequências e de ocorrências que provoquem pontos de estrangulamento nos sistemas viários. Baixa demanda computacional.</p>

	<b>Microsimulação</b>	<b>Mesosimulação</b>	<b>Macrossimulação</b>
<b>Limitações</b>	Tempos de simulação elevados. Tem como resultados arquivos de tamanho grande. Limitação no tamanho da rede. Alta demanda computacional.	Ocorre em nível agregado e não considera as relações dinâmicas de volume/velocidade. Possui menor fidelidade do que as ferramentas de microsimulação.	Acontece em nível ainda mais agregado, não sendo capaz de analisar as melhorias de transporte tão detalhadamente quanto em outros modelos de simulação.

Fonte: Adaptado de Tavares (2011).

Devido aos objetivos deste trabalho, a microsimulação é vista de maneira particularizada. Isso ocorre porque a área de evacuação no caso de um acidente nuclear considera um raio de até cinco quilômetros, sendo que a simulação de tráfego, nesse caso, precisa ser feita em nível detalhado.

### **2.2.1 Microsimulação de tráfego**

No modelo de microsimulação, os veículos são estudados de forma individual, tendo seus movimentos caracterizados conforme cada veículo rastreado. Para tanto, são considerados os atributos do condutor, da geometria da rede viária em questão e das interações com a via e com os outros veículos. São essas características que formam os fatores determinantes dos movimentos da microsimulação de tráfego, como afirma McLean (1989).

Ainda segundo este autor, as principais vantagens da microsimulação estão relacionadas a possibilidades como: simular uma gama de condições operacionais, considerando diferentes períodos; simular condições difíceis de serem observadas no espaço real; e obter dados praticamente impossíveis de serem averiguados na prática. Em contrapartida, assim como nos modelos matemáticos, as desvantagens da microsimulação estão relacionadas ao fato de o modelo ou o experimento não poder representar bem a realidade que se deseja simular.

Para que esses problemas sejam combatidos ou diminuídos, existem os processos de validação e calibração, entre as correntes de

tráfego real e simulada, a fim de aproximar ao máximo a situação simulada a real. Para tanto é necessário utilizar técnicas de redução de variância, que objetivam aumentar a confiabilidade dos resultados da simulação. Assim, para cada tipo de modelo é necessário o desenvolvimento dos processos de validação e calibração, conforme McLean (1989).

A calibração é o processo pelo qual os parâmetros do modelo são ajustados, a fim de reproduzir com maior precisão as condições de tráfego local e o comportamento dos condutores. A calibração do modelo é fundamental, pois aumenta a credibilidade do processo, com relação ao desempenho do tráfego para cenários futuros (RAJASAKRAN, 2008).

Contudo, antes da realização destes processos, é essencial a obtenção de dados de entrada. Neste contexto a FHWA (2004b) ressalta que, para os modelos de microssimulação são considerados como dados de entrada:

- Geometria da via (comprimento, número de faixas, curvatura).
- Mecanismos de controle existentes (localização dos sinais, tempo dos sinais).
- Estimativa de demanda (volume de tráfego, matriz O/D).
- Dados de calibração (capacidade, tempo de viagem, filas).
- Trânsito, bicicletas e pedestres (influência do tráfego local).

Na microssimulação, o processo de geração de veículos na corrente de tráfego inicia-se a partir de um sistema vazio, em que os veículos são gerados nos nós de entradas da rede analítica, com base no volume de tráfego de entrada e nas distribuições dos *headways*. Entende-se por *headway* o comprimento do veículo somado ao intervalo até o veículo anterior (FHWA, 2004b).

Quando um veículo é gerado na malha, a ele e aos condutores são conferidos atributos como os mencionados a seguir.

- Atributos do veículo: tipo de veículo (automóvel, ônibus, caminhão etc.), comprimento, largura, aceleração e desaceleração máximas, velocidade máxima, máximo raio de giro, entre outros.
- Atributos do condutor: agressividade, tempo de reação, velocidade desejada, aceitação de brechas (para mudança de faixa, entrelaçamentos, cruzamento), destino (rota) e outros.

Cada atributo pode ser representado no modelo por meio de uma constante, por uma relação funcional, ou por uma distribuição de

probabilidade. A maioria dos modelos microscópicos utiliza distribuições estatísticas para representar os atributos do veículo/condutor, devendo sua variabilidade e seus parâmetros ser calibrados para as condições locais de análise (FHWA, 2004b).

É comum que a atribuição desses parâmetros para cada veículo seja realizada através de processos estocásticos, sendo que as especificações das características do veículo/condutor obedecem a distribuições estatísticas, que utilizam números aleatórios. A sequência de geração dos números aleatórios depende de método particular e do valor inicial do número aleatório, denominado semente. As alterações nesse número inicial provocam uma sequência diferente de números aleatórios que, por sua vez, determinam diferentes características dos elementos veículo/condutor.

Nos modelos estocásticos, é preciso que elementos adicionais sejam informados, tais como a forma e parâmetros das distribuições estatísticas, que representam as características particulares de um veículo. Na análise dos resultados da simulação deve ser considerado que, para dados idênticos de entrada, os resultados de cada rodada do modelo variam segundo o número de semente aleatório estipulado (FHWA, 2004b).

No processo de simulação, a maneira como o veículo percorre a rede é impactado pelo meio físico, ou seja, pela rede de transporte em estudo, tipicamente representada por arcos e nós, sendo que os arcos são vias que ligam um nó ao outro e possuem características fixas de desenho – os nós representam as interseções ou pontos onde há algum tipo mudança com relação às características do arco.

Os veículos, quando não há ação de alguma impedância em relação aos demais veículos, viajam pelos arcos da rede em sua velocidade desejada. Entretanto, essa velocidade pode variar por conta das especificidades da geometria do arco, pelas condições do pavimento, ou por outros fatores. No modelo de microssimulação, os veículos percorrem a rede até saírem do sistema, e isso acontece no momento em que atingem seu destino (FHWA, 2004b).

Com relação ao perfil dos condutores, conforme Turley (2007), para que seja possível a representação destes, bem como das características do veículo e da via, o modelo de microssimulação obedece a uma lógica, que é formada por uma série de regras e algoritmos. De acordo com o FHWA (2004c), as regras e os algoritmos que formam esta lógica descrevem o modo como os veículos se comportam.

O comportamento dos veículos em um modelo de microsimulação compreende acelerações, desacelerações, mudança de faixa e manobras de ultrapassagem. Os algoritmos trabalham também na definição do perfil de motoristas, que são representados no modelo, como mais ou menos agressivos (FHWA, 2004c).

Turley (2007) reforça a ideia de que as características do condutor e do veículo, bem como as interações entre os veículos e a geometria da rede compõem os fatores que determinam os movimentos. Esses modelos são orientados por espécies de submodelos. Um deles é o modelo de perseguição (*car-following*), outro é o de mudança de faixa (*lane-change*) e há também o modelo de aceitação de brechas (*gap-acceptance*).

O modelo de perseguição (*car-following*) toma como parâmetro um veículo líder, parte do pressuposto de que o veículo seguidor deste tem uma aceleração proporcional à velocidade do primeiro, e inversamente proporcional à sua distância. Objetiva-se com isso alcançar a resposta de um condutor com relação ao veículo que segue à sua frente. Nos modelos mais recentes, os condutores aceleram ou desaceleram apenas para atingir a velocidade pretendida ou para evitar a colisão com o líder, conforme Benekolal e Treiterer (1998), Hossain e McDonald (1998) *apud* Vasconcelos (2004).

Para Kaman (1996) *apud* Vasconcelos (2004), o modelo de mudança de faixa determina a motivação e a possibilidade do condutor mudar de uma faixa para outra, tomando como base o próximo objetivo do condutor, sendo que este pode ser motivado por uma obrigatoriedade de mudança de faixa ou por uma necessidade do condutor de mudar de direção. É considerada como opcional a mudança de faixa justificada pelo desejo de aumento de velocidade. A oportunidade de mudar de faixa é vista como o resultado da relação entre o benefício e o risco associado à manobra.

De acordo com Vasconcelos (2004), o modelo de aceitação de brechas baseia-se em determinar se um veículo pode avançar em uma interseção. Essa decisão depende do intervalo de tempo disponível pelo veículo de seguir em segurança na corrente de tráfego concorrente. Motoristas agressivos arriscam mais, aceitando intervalos de tempo mais curtos, ao contrário de motoristas menos agressivos.

Tanto o modelo de mudança de faixa como o de aceitação de brechas fazem considerações relacionadas às medidas de risco. Essas medidas serão influenciadas pelo comportamento dos condutores, sendo que os mais agressivos irão aceitar riscos maiores para mudar de faixa,



e, desse modo, irão aceitar também brechas menores e taxas de aceleração ou desaceleração maiores que os menos agressivos.

## 2.2.2 Modelos de microssimulação de tráfego

As ferramentas de planejamento de transportes têm seu progresso relacionado ao desenvolvimento econômico e tecnológico da sociedade. Portanto, além das demandas de transporte, a evolução dos *softwares* de microssimulação está atrelada ao incremento computacional. De acordo com MacNally (2007), os primeiros estudos de modelagem de transportes ocorreram no período pós Segunda Guerra Mundial, em detrimento do aumento da mobilidade dos indivíduos.

Nesse contexto, surgiu o modelo quatro etapas, como resposta à necessidade de modelar a demanda de tráfego, considerando a escala de tempo, o efeito das políticas de usos do solo e da oferta de transportes. Esse modelo representou um grande avanço no planejamento de transportes, contudo, sua abordagem é pouco detalhada, o que exigiu o desenvolvimento de ferramentas que levassem em conta os dados de maneira mais desagregada.

Assim, na década de 1970 foram criadas algumas alternativa, que observavam o funcionamento das redes viárias urbanas, considerando características específicas, como a individualidade de cada viajante. Entretanto, por conta de erros referentes à estimação dos fluxos e à dificuldade em transpor a sua aplicação em diferentes cenários, essas abordagens precisaram ser aperfeiçoadas e passaram a ser consideradas como intermediárias (BASTOS SILVA *et al.*, 2013).

Posteriormente, elas foram aprimoradas deram origem aos modelos de simulação de tráfego, os quais observam a variabilidade da procura do tráfego, no tempo, e sua redistribuição na rede, em função dos níveis de congestionamento, como afirma Bastos Silva *et al.* (2013).

Um importante fato na evolução dos modelos de microssimulação foi o desenvolvimento dos submodelos *car-following*, *lane-change* e *gap acceptance*, segundo Druitt (1998) *apud* Fox (1998). Com isso, os modelos de microssimulação foram cada vez mais utilizados para auxiliar estudos de planejamento de sistemas de transportes.

Resumidamente, durante as décadas de 1960 e 1970, estiveram presentes os modelos de simulação para análise de operações de tráfego em vias expressas. São exemplos desses *softwares*: *FREQ*, *CORQ*, *INTRAS*. Nos anos de 1980 e 1990, as abordagens anteriores evoluíram para um nível mais semelhante aos *softwares* da atualidade, como

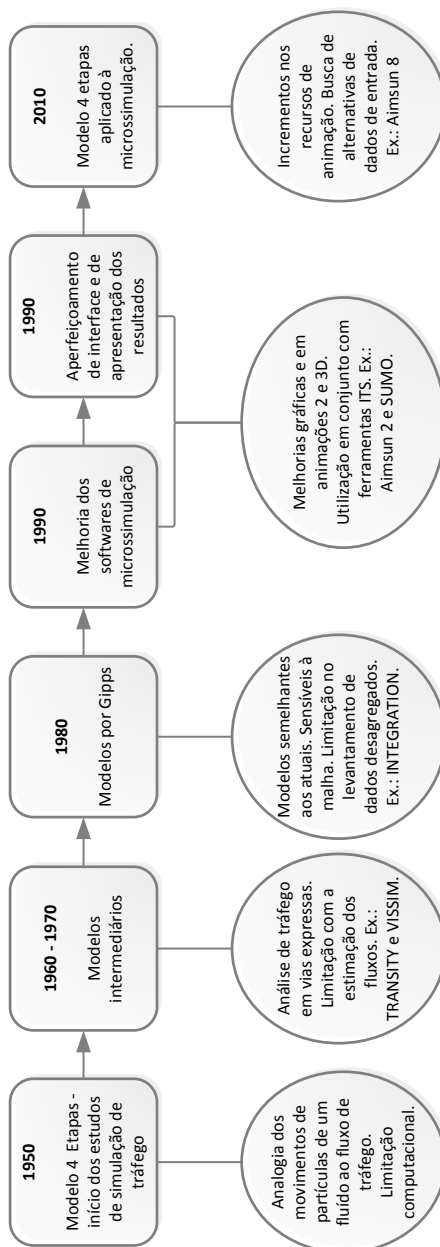
exemplo, tem-se: FRESIM, KRONOS, INTEGRATION, PARAMICS e AIMSUN-2 (BOXILL; YU, 2000).

Nos anos 2000, houve considerável número de estudos voltados à comparação entre os *softwares* de microsimulação. Desde então, novas versões de *softwares* já existentes foram lançadas com importantes incrementos gráficos e de visualização 2D e 3D. Ainda hoje, as versões dos *softwares* de microsimulação buscam melhorias nos recursos de animação, calibração e validação, entre outros.

Desde o início da década de 1950 até os dias atuais, o desenvolvimento dos *softwares* de microsimulação vem sendo contemplado com importantes incrementos tecnológicos e se apresenta como decisivo nas políticas de planejamento de transporte.

A Figura 1 descreve de forma simplificada a evolução das características dos estudos de microsimulação, juntamente com alguns exemplos de microsimuladores, lançados nas décadas passadas.

Figura 1 – Cronologia dos estudos de microsimulação de tráfego



Fonte: Dados do autor (2014).

Lighthill e Whitham (1955) foram os criadores de um dos primeiros simuladores, que faziam uma analogia entre o movimento de partículas de um fluido e o fluxo de veículos. Na atualidade, de acordo com Lacalle (2003), os simuladores, além de incorporarem os avanços tecnológicos, observam também conceitos da psicologia, a fim de melhor retratar o comportamento dos veículos e de seus condutores.

Durante o desenvolvimento de *softwares* de simulação diferentes dificuldades, foram encontrados e relacionados à calibração, os ajustes e a tecnologia adequada. Hoje em dia, as maiores dificuldades para a realização de microssimulação estão relacionadas à obtenção dos dados ao nível detalhado pela zona de tráfego.

Existe uma série de *softwares* que realizam microssimulação de tráfego, os quais possuem diferentes abordagens. Há *softwares* comerciais, que precisam ter suas licenças de uso compradas, e os não comerciais, abertos à utilização dos usuários sem a necessidade de pagamento pela licença de uso. A seguir, estão descritos alguns exemplos destes *softwares*.

### 2.2.2.1 *Softwares* comerciais de microssimulação

Os *softwares* comerciais são desenvolvidos buscando satisfazer uma demanda ou oferecer uma nova ferramenta que auxilie na resolução de problemas existentes no mercado. Trata-se de programas comercializados através de licenças e que fornecem atualização e suporte aos seus clientes. A seguir, são descritos alguns exemplos de *softwares* comerciais de microssimulação.

#### **AIMSUN**

O Aimsun (*Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks*), conforme sua própria sigla indica, é um simulador interativo microscópico de redes urbanas e não urbanas. Trata-se de um programa de simulação que permite a avaliação das estratégias de controle de tráfego, alterações externas durante a simulação, conseguindo sinalizar parâmetros de temporização de rampa e taxas de distância, entre outros parâmetros.

O Aimsun é um *software* comercial e fornece modelagem altamente detalhada do tráfego de rede, sendo capaz de fazer distinção entre os diferentes tipos de veículos e condutores, permitindo uma gama de traçados e geometria da rede, além de considerar possíveis incidentes, manobras conflitantes, entre outros. Portanto, a maior parte dos equipamentos presentes em uma rede de tráfego real pode ser modelada por esse *microsimulator* (TSS, 2013a).

A abordagem de simulação microscópica do Aimsun atende ao comportamento de cada veículo na rede, de forma contínua. Assim como a maior parte dos microssimuladores, o Aimsun realiza suas simulações considerando a modelagem de comportamento do veículo, como o de perseguição (*car-following*), o de mudança de faixa (*change-lane*) e o de aceitação de brechas (*gap-acceptance*) (TSS, 2013b).

A microssimulação no Aimsun é um processo discreto/contínuo combinado, ou seja, existem alguns elementos, como veículos e detectores, cujos estados podem mudar continuamente ao longo do intervalo de tempo da simulação. Esse período simulado pode ser dividido em intervalos de tempo curtos e fixos, denominados ciclos de simulação ou etapas. Outros elementos, como sinais de trânsito e pontos de entrada, podem ser modificados de forma discreta, em pontos específicos na unidade de tempo da simulação (TSS, 2013b).

Além de permitir a atribuição de tráfego estático e dinâmico, o *software* se destaca por realizar tanto a abordagem mesoscópica, como a microscópica, podendo inclusive fazer a simulação híbrida, com as duas abordagens. O simulador híbrido combina um modelo mesoscópico e um microssimulador, considerando uma unidade de tempo, de modo a representar a dinâmica do trânsito em áreas em que a malha é menos densa (meso) e em outras em que é mais densa (micro) (TSS, 2013a).

O Aimsun é um simulador dinâmico, capaz de criar e modificar cenários, partindo de um conjunto de parâmetros de simulação que definem o experimento, o qual será realizado através de cenários. Um cenário é composto por quatro tipos de dados: descrição de rede, planos de controle de tráfego, dados de demanda de tráfego e planos de transportes públicos. Todos esses dados podem ser editados, através do sistema, conforme os objetivos pretendidos.

De acordo com TSS (2013a), os parâmetros de simulação são valores fixos que descrevem uma experiência. Destaca-se que existem alguns parâmetros variáveis utilizados para calibrar os modelos, sendo exemplos desses parâmetros o tempo de reação e as mudanças de faixa – a definição destes deve ocorrer conforme as necessidades do estudo realizado.

Por ser um *software* com uma ampla possibilidade de simulações e que aceita diversas formas de dados de entrada, o Aimsun versão 8 foi escolhido para ser usado como *software* de simulação de tráfego neste estudo. Outro fator importante que contribuiu para esta escolha é que a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), através do Laboratório de Transportes e Logística (LabTrans), possui a sua licença de operação.

## INTEGRATION

O Integration começou a ser desenvolvido na década de 1980 por Michael Van Aerde em seu trabalho de PhD na Universidade de Waterloo, no Canadá. O nome *Integration* deriva do fato de que o modelo integra certo número de capacidades únicas. A partir dos estudos de Michel Van Aerde, muito se avançou na área de modelagem de transporte, como exposto no Manual do Usuário Integration (2010).

O programa primeiramente integra alocação de tráfego e simulação microscópica e então associa a modelagem arterial dentro de uma lógica. Segundo o Manual do Usuário Integration (2010), o desenvolvimento do programa se pautou na busca por um modelo novo e integrado voltado aos problemas de controle de tráfego – em parte inspirado por teorias já desenvolvidas, como a de Robertson, entre outros autores.

Isso significa afirmar que o programa sofreu influência de diversos autores e modelos já desenvolvidos anteriormente, como: TRANSYT, SSTOP, PASSER, MAXBAND, TRAFFICQ, NETSIM, FREQ, FRECON, INTRAS, CORQ, TRAFLO, DYNEV, SATURN, TRANSIGN e CONTRAM. Sendo assim, após alguns anos de trabalho e pesquisa, o INTEGRATION se consolidou como um *software* capaz de representar eventos, tais como manobras de ultrapassagem, mudanças de faixa, aceleração e desaceleração, reação a elementos de controle, entre outros. (INTEGRATION, 2010)

No programa, é possível definir as rotas para transporte coletivo e a localização dos pontos de parada, assim como realizar simulações de incidentes, por um determinado período de tempo, com bloqueio parcial ou total da via. O controle do fluxo de saída dos arcos no Integration pode ser codificado com sinais de *Pare* e *Dê a preferência*, bem como através de semáforos, simulando também arcos sem controle do fluxo (INTEGRATION, 2010).

Em suma, trata-se de um modelo que permite determinar diferentes classes de motoristas associadas a diferentes demandas, integrando alocação de tráfego com microsimulação. Ele também fornece indicadores de tempo de viagem, atraso, consumo de combustível e emissão de poluentes para cada veículo, de forma individual, assim como para os arcos isolados ou agregados (SOUSA, 2003).

Esta seção mencionou apenas alguns *softwares* que fazem parte da história e do desenvolvimento da microsimulação de tráfego. No entanto, existe uma gama de outros *softwares* que também possuem

funções semelhantes às dos citados anteriormente, e não foram mencionados.

### VISSIM

O Vissim é um microssimulador multimodal, que teve seu estudo iniciado em meados da década de 1970 com a tese de PhD de Wiedemann, a qual descrevia o movimento de cada veículo de forma longitudinal, seguindo os preceitos do modelo *car-following*. Mas foi somente em 1992, após diversas pesquisas, que ocorreu o lançamento da primeira versão comercial do Vissim. Isso ocorreu na Alemanha, com a finalidade de analisar as possibilidades de controle das interseções sinalizadas (PTV, 2013).

Para a realização das microssimulações, esse *software* faz uso de três modelos matemáticos que interagem entre si: um representa os aspectos técnicos e físicos dos transportes; outro representa a geração de demanda, considerando pessoas e veículos no sistema; e o último consiste em um modelo que controla o trânsito com semáforos e regras de preferências (VISSIM, 2010).

O modelo de movimentação dos veículos do Vissim, assim como os outros simuladores mencionados, também utiliza a abordagem *car-following* para a orientação dos demais veículos. Nele, o motorista reconhece alterações no aparente tamanho de um veículo líder à medida que se aproxima dele. As diferenças de velocidade são percebidas através de alterações, observado o ângulo de visão (VISSIM, 2010).

Os movimentos laterais do veículo são compostos por três tipos de comportamentos: a seleção da faixa, a troca de faixa e o movimento lateral contínuo. Para a seleção da faixa, o motorista escolhe a faixa com a melhor interação disponível, desde que ele esteja distante da próxima intersecção relevante. Cada intersecção mantém um controle de distância, que deve ser obedecido para ser efetuada a conversão (BARCELÓ, 2010).

A conversão de faixa será efetuada apenas se o veículo conseguir entrar no espaço desejado. Caso isso não ocorra, o motorista toma decisões que envolvem fazer o veículo ao lado desacelerar, podendo até mesmo, desacelerar seu próprio veículo. Quanto mais próximo da conversão, mais agressivo é o comportamento do condutor do veículo, que pode inclusive parar (VISSIM, 2010).

Assim como a maior parte dos *softwares* de microssimulação, a malha viária no Vissim é representada com grafos, sendo que os nós representam as interseções e os arcos os segmentos de vias. Este *software* não exige uma definição explícita dos nós, pois seu modelo

considera rotas aleatórias, de modo que esse nível de detalhamento não é necessário. As interseções no programa conectam as vias e constituem um conjunto de pequenas vias sobrepostas. Tal método foi utilizado pelo *software* com a finalidade de reduzir o tempo demandado pela computação (VISSIM, 2010).

A utilização dos nós é necessária para as áreas da topologia onde os caminhos podem divergir. Através destes nós, é possível definir a direção que o condutor pode seguir até chegar ao próximo nó. A partir desta etapa, devem ser inseridos os chamados estacionamentos, elementos muito importantes na simulação, visto que determinam a origem e o destino dos veículos quando as rotas são definidas dinamicamente (VISSIM, 2010).

Além da modelagem multimodal, observado o transporte público e o controle semaforico, o Vissim também oferece uma modelagem da movimentação dos pedestres. É importante destacar que esse foi considerado um grande avanço frente aos demais simuladores (PTV GROUP, 2013).

O programa oferece diversos formatos para visualizar os resultados da simulação, inclusive em tempo real. Há uma variedade de opções de visualização dos resultados em 2D e 3D, além de animações e da possibilidade de pós-edição em 3dsMax. Ele permite analisar relatórios através de arquivos, bem como armazenar informações em banco de dados, entre outras aplicações. (PTV GROUP, 2013).

#### 2.2.2.2 *Softwares* não comerciais de microssimulação

Com os *softwares* não comercializados, não há necessidade de pagamento pela licença, inclusive, esse tipo de programa permite ao usuário estudar as instruções e a forma de funcionamento. Objetiva-se com isso incrementar a área de pesquisa de tráfego através da avaliação dos próprios algoritmos. Como exemplo de microssimulador não comercial, podem ser citados o *Multi-Agent Transport Simulation Toolkit* (MATSim) e o *Simulation of Urban Mobility* (SUMO).

##### **MATSim**

Criado no final da década de 1990, o MATSim é um software de simulação resultante de um conjunto de esforços realizados por diferentes instituições e grupos de estudos de diversos países, como consta em MATSim (2014a):

- O *Institute for Land and Sea Transport Systems*, da *Technische Universität* em Berlim, na Alemanha.



- O *Institute for Transport Planning and Systems (IVT)* e *Swiss Federal Institute of Technology Zurich*, na Suíça.
- A companhia *Senozon*, também na Suíça.
- Além de grupos de pesquisa situados em diversos países, como em Toronto (Canadá), Pretória (África do Sul), Karlsruhe e Jülich (Alemanha) e Singapura.

Desenvolvido em linguagem Java o MATSim é uma ferramenta de simulação dinâmica, desenvolvida e disponibilizada na forma *open-source*. Trata-se de um software que segue a arquitetura das linguagens orientadas por objetos, baseada na simulação por agentes e atividades. (MATSIM, 2014a).

Nele é possível a modelação de cenários com elevado nível de detalhamento, ou seja, cenários de microssimulação. Além disso, permite modelar várias condições, bem como a criação de diferentes cenários. O MATSim também consegue realizar a captura de fenômenos emergentes, como por exemplo, a implementação de mudanças na rede ou das características dos agentes intervenientes na simulação. (MATSIM, 2014b).

O sistema é estruturado em dois blocos, um para estimar a produção de viagens, outro para estimar a geração de viagens. Cada agente da simulação possui um plano de atividades detalhado por: ordem de execução, tipo, local, duração, modo, rota, horário de saída e tempo de deslocamento. A rota pode ser calculada pelo algoritmo de caminhos mínimos, que tem como base o tempo de deslocamento de cada trecho.

Os agentes são considerados individualmente, com suas características próprias, sendo capazes agir e perceber a rede, respondendo de forma diferente a esse ambiente, além de eventualmente, comunicarem-se com outros agentes. Para escolha do melhor plano de viagem, o sistema usa como base o modelo *RUM*. Este modelo é empregado para escolher o plano de atividade que possui melhor performance, de acordo com as características de cada agente. (MATSIM, 2014b)

Por ser uma ferramenta gratuita há disponibilidade, de forma bastante acessível, de diversos tutoriais que explicam o funcionamento do programa. Importante destacar que o MATSim continua em construção, evoluindo à medida que várias aplicações requerem simulações de tráfego em redes com cada vez mais nível de detalhe.

## SUMO

O desenvolvimento de SUMO começou no ano de 2000, através do *Institute of Transportation Research do German Aerospace Center*, Centro Aeroespacial Alemão. A principal razão para o desenvolvimento de uma fonte aberta de simulação microscópica de trânsito foi a de apoiar a comunidade de pesquisa de tráfego, com um programa capaz de implementar e avaliar os próprios algoritmos (SUMO, 2013).

A concepção do SUMO foi direcionada para a simulação de redes de tráfego, considerando o tráfego urbano. Voltado especificamente para a microssimulação de tráfego, nesse microssimulador, cada veículo é modelado individualmente e tem o próprio trajeto, através da rede. No projeto de criação, foram tomados como base três objetivos: o baixo consumo de memória, a facilidade em estender a aplicação e a existência de velocidade nas simulações (BEHRISCH *et al.*, 2011).

Além disso, o equipamento consegue interagir com outros simuladores através de um aplicativo importador de redes, o *netconvert*, que permite ler as redes de outros simuladores de trânsito como o Visum, o Vissim ou o MATsim. Ele também lê outros formatos comuns como *shapefiles* ou *Open Street Map* (BEHRISCH *et al.*, 2011).

O *software* faz uso de uma versão modificada de tempo discreto e espaço contínuo do modelo *car-following*. Trata-se de um modelo proposto por Kraub, em que primeiramente se executa o movimento longitudinal, baseado na distância que o carro perseguidor precisa parar atrás do veículo líder, sem colidir com este. As máximas desacelerações e o tempo de reação do veículo perseguidor também são considerados, o que garante um comportamento livre de colisões (BARCELÓ, 2010).

O SUMO segue a tendência da maioria das simulações microscópicas em executar movimento longitudinal de modo segregado ao movimento lateral, sendo que esses movimentos pouco interagem entre si. A inovação do SUMO está em assumir que um motorista não é perfeito em realizar a velocidade desejada, pelo contrário, a velocidade de cada veículo varia e geralmente é menor. Essa pequena diferença e variação na velocidade causam os congestionamentos espontâneos e o chamado *slow to start* (início lento) (SUMO, 2013).

Seu modelo *lane-changing* vem evoluindo. Originalmente, foi abordada apenas a decisão tática, baseada na concepção de que o motorista deseja dirigir o mais rápido possível, sem considerar a questão de troca entre faixas para continuar na rota. Atualmente, o *lane-changing* baseia-se no modelo de Krajzewicz (2008), que computa um caminho válido através da malha viária.

O modelo do *software* se comporta bem em cenários urbanos e rodovias rápidas, assumindo que os veículos escolhem antecipadamente

as faixas, ocupando todas as disponíveis, porém, não considera o comportamento dos demais veículos, o que em algumas situações pode causar problemas (BARCELÓ, 2010).

Na atualidade, a atribuição de usuário é dinâmica e realizada dentro da própria simulação, e não através de uma aplicação externa. Isso permite o uso de estruturas de dados mais rápidas, sendo cada um adaptado para uma finalidade. No ano de 2012, foram lançadas as versões 0.15.0 e 0.16.0, visto que a última versão 0.19.0 foi lançada em novembro de 2013, mas sem inovações no *design* da abordagem integrada (SUMO, 2013).

### 2.3 PLANOS DE CONTINGÊNCIA E DE EMERGÊNCIA

Os planos de emergência e contingência fazem parte dos processos de segurança e instalação de qualquer organização. De acordo com a OSHA (2013), a ocorrência de eventos imprevisíveis aponta a necessidade de preparar as ações mais adequadas em resposta à variedade de riscos. Essas ações consistem em procedimentos para a segurança de empregados, empregadores e sociedade em torno de um empreendimento.

A formulação de planos como os de emergência e contingência está diretamente relacionada à possível ocorrência de eventos imprevisíveis, que tragam riscos para a organização de um modo geral. Eles podem estar relacionados a problemas financeiros ou físicos e buscam preparar uma empresa para enfrentar qualquer situação adversa, como exposto em OSHA (2013).

Para McConnel e Drennan (2006), o planejamento e a preparação para uma situação de crise são ferramentas políticas e institucionais. Esses autores consideram que o conceito de cada plano está vinculado aos riscos de difícil previsão e que são capazes de afetar um grande contingente de pessoas.

Uma definição de risco é entendê-lo como o produto da probabilidade de ocorrer um evento por sua consequência. Na Política Nacional de Defesa Civil, o conceito de risco é visto como sendo a relação entre a probabilidade de que uma ameaça de evento adverso ou de acidente aconteça e o grau de vulnerabilidade do sistema que irá receber seus efeitos (BRASIL, 2007).

Ainda no que tange à Defesa Civil nacional, os planos de contingência ligados à população têm como objetivos essenciais salvar vidas, reduzir o sofrimento das pessoas e minimizar os prejuízos

econômicos. Para isso, deve haver a união e harmonia entre os esforços da administração municipal, estadual e federal.

Segundo a organização que corresponde à marinha dos Estados Unidos, *United States Marine Corps* (USMC) (2001), o planejamento em situações críticas é a determinação de ações que buscam visualizar determinada situação final esperada, especificando meios efetivos para concretizar tal situação. Isso deve ocorrer de maneira a auxiliar o tomador de decisão em ambientes incertos e em um intervalo de tempo limitado.

No âmbito empresarial, existem organizações especialistas em segurança, as quais analisam os planos de emergência e contingência com foco institucional. O plano de emergência é destinado a estabelecer recursos humanos e materiais para responder a determinadas situações eventuais, como incêndios, explosões e vazamento de produtos perigosos. Consiste em um plano de prevenção, que conta com toda a organização atuando de maneira cotidiana para prevenir qualquer emergência (CERTITECNA, 2013).

O plano de contingência objetiva estabelecer medidas e procedimentos de recuperação das operações vitais para a empresa, buscando restabelecer as atividades para a manutenção do seu funcionamento, através de ações imediatas diante dos cenários de acidentes que coloquem em risco as instalações e/ou negócio da empresa de modo geral (CERTITECNA, 2013).

Portanto, o plano de contingência é abrangente e o plano de emergência mais específico. Um plano contingencial relaciona diversos aspectos de uma empresa, ou até mesmo de uma instituição governamental. Ele leva em conta todos os riscos capazes de afetar a sobrevivência dos negócios de uma instituição. Já o plano de emergência trabalha na gestão operacional do desastre.

### **2.3.1 Plano de contingência**

O termo contingência tem um caráter de reserva e preparo, em alguns casos, ele é utilizado de forma genérica e inclui gerenciamento de crise, continuidade de negócios, recuperação de desastres e também plano de emergência. Um plano de contingência envolve todas as áreas sujeitas a catástrofes. Consiste em um plano amplo, capaz de fazer referência a várias áreas de uma empresa ou unidade administrativa. (UNHCR, 2007)

Os setores de informática e sistemas de informação tem no plano de contingência uma ferramenta fundamental para segurança e

funcionamento das instituições. Dessa forma, comumente fazem uso de sistemas de redundância como *backups* e *sites* de contingência, entre outras ferramentas seguras para acesso aos dados remotamente. (UNHCR, 2007)

O plano de contingência faz parte de estudos de possíveis cenários de risco, determinando ações de preparação e resposta a eventos adversos, caso eles venham acontecer. Estas ações abrangem socorro e auxílio às pessoas, reabilitação dos cenários e redução dos danos e prejuízos. (BRASIL, 2013)

A Secretaria Nacional de Defesa Civil (SEDEC) determina como deve ser a elaboração do Plano de Contingência de Proteção e Defesa Civil (PLANCON), que é o planejamento de contingências válido para todos os estados do Brasil. Ele deve contemplar os objetivos como:

- Identificar a responsabilidade de organizações e indivíduos que desenvolvam ações específicas em emergências.
- Descrever as linhas de autoridade e relacionamento entre os órgãos envolvidos, mostrando como as ações serão coordenadas.
- Descrever como as pessoas, o meio ambiente e as propriedades serão protegidas durante a resposta ao desastre.
- Identificar as pessoas, os equipamentos, as instalações, os suprimentos e os outros recursos disponíveis para a resposta ao desastre, além de determinar o modo como serão mobilizados.
- Identificar as ações que devem ser implementadas antes, durante e depois da resposta ao desastre.

Além das ações descritas, a SEDEC destaca os requisitos do PLANCON, que são:

- Organização – as informações precisam ser encontradas com facilidade pelos usuários.
- Progressão – o plano deve ser composto por elementos que possuam uma sequência racional, que permita ao seu usuário identificar a lógica das ações, desempenhando suas atribuições com facilidade.
- Adaptabilidade – as informações do plano precisam estar organizadas de forma a permitir a sua utilização em contingências inesperadas.

- **Compatibilidade** – a estrutura do plano deve facilitar a coordenação com outros planos, como os adotados por agências governamentais e outras agências privadas.

Um plano de contingência necessita descrever suas informações de modo coerente, mencionando os envolvidos na construção e na execução do plano. Além disso, no documento do plano de contingência deve conter a finalidade porque foi elaborado, bem como a descrição e caracterização dos riscos para os quais está preparado e as operações de resposta a esses riscos (BRASIL, 2013).

Outros elementos estruturais do plano de contingência é a definição das atribuições e responsabilidades, descritas conforme as fases do desastre. Existem também os procedimentos de administração e logística, que consideram os convênios e termos de cooperação para a obtenção de serviços e suprimentos, realocação de pessoal das agências envolvidas, procedimentos gerais para compra, locação ou contratação de recursos e orientações para o registro da obtenção, uso e prestação de contas dos recursos financeiros (BRASIL, 2013).

Por fim, consta no PLANCON que devem ser incluídos os anexos pertinentes, haja vista que um plano de contingência pode envolver diversas instituições. É importante ressaltar a necessidade de testes periódicos, os quais devem ocorrer através da execução de exercícios com os principais agentes responsáveis pela implementação do plano.

Para o sucesso de um plano de contingência, é fundamental que todos os envolvidos estejam familiarizados com ele, visando evitar perda de tempo, o que pode causar maiores problemas. Os tomadores de decisão também são elementares para o sucesso do plano, e a eles cabe deliberar ações perante situações imprevistas ou inesperadas. No entanto, o limite desta possibilidade de decisão estará previamente estabelecido (BRASIL, 2013).

O viés organizacional utiliza o termo contingência no sentido de gestão de crises e continuidade de negócios. Para a Defesa Civil, este plano é um documento que precisa conter os elementos descritos anteriormente, levando em conta as características de cada estado e município. Quanto mais local e operacional, mais se aproxima do plano de emergência, o qual é capaz de definir atividades operacionais mais detalhadas.

### **2.3.2 Plano de emergência**

Um plano de emergência visa coibir os sinistros, limitar os seus danos por meios próprios, estruturando um conjunto de processos que

envolvam os vários elementos da comunidade e de instituições. Além disso, trata de um plano de ações específicas, que descreve detalhadamente as atividades que devem ser tomadas para uma dada situação de risco, dando enfoque à necessidade de cada emergência (UNHCR, 2007).

Enquanto o plano de contingência é um tipo de planejamento estratégico, o plano de emergência se enquadra como um planejamento operacional. Ambos atuam na prevenção de catástrofes, visando minimizar o efeito de situações de risco. A diferença é que o plano de emergência tem foco nas atividades que devem ocorrer durante a emergência (UNHCR, 2007).

Consta em Almeida *et al.* (2003) que o plano de emergência faz parte da gestão de crises, sendo constituído por um conjunto de metodologias e ações coordenadas para minimizar a magnitude dos danos devidos a incidentes e acidentes, bem como as perdas potenciais para o município ou para a instituição envolvida.

Assim, para Almeida (2001), um plano de emergência pode ser segregado em dois tipos, um interno, voltado à resolução das emergências próprias da instituição, e outro externo, que considera a área externa à empresa, indústria, usina ou organização. Consiste em um plano voltado à mitigação do risco a que as pessoas situadas no entorno do empreendimento estão expostas.

O plano de emergência interno é um documento de resposta contendo um conjunto de situações desencadeadas por potenciais eventos anômalos perigosos para um determinado local, como uma usina em risco. Ele contém ações para evitar ou minimizar os efeitos de um acidente. Objetiva notificar todos os envolvidos no processo e orientar na execução das medidas imediatas que devem ser tomadas após o evento.

Por outro lado, o plano de emergência externo se concentra na gestão da emergência relacionada ao ambiente fora do empreendimento, sendo que seu desenvolvimento deve ser responsabilidade das autoridades de Defesa Civil. Trata-se de um documento em que se identifica o que precisa ser feito, em busca da segurança daqueles que vivem em uma área de risco (ALMEIDA, 2001).

Conforme a Escola de Alcoutim Portugal (2012), para a elaboração de um plano de emergência, são considerados os seguintes objetivos:

- Identificar os riscos e estabelecer cenários de acidades para eles.

- Definir princípios, normas e regras de atuação geral, face aos cenários possíveis.
- Organizar os meios de socorro e determinar as atividades que competem a cada um dos envolvidos no plano.
- Definir ações oportunas destinadas à minimizar as consequências do sinistro.
- Especificar como e quando deve ocorrer a evacuação das áreas de risco.
- Estabelecer quais procedimentos devem ser testados através de exercícios de simulação.

Sendo assim, segundo a mesma escola, um plano de emergência deve possuir características como: simplicidade, no sentido de ser facilmente compreendido; flexibilidade, de modo a se adaptar às necessidades situacionais; atualizado com frequência; adequado à instituição respectiva; e preciso no que diz respeito à atribuição das responsabilidades.

Para as ações envolvidas no atendimento emergencial, é importante também que o plano de emergência esteja integrado e se articule com os demais planos já construídos, relativos aos riscos de outra natureza. De acordo com Viseu (2006), dentre as diversas formatações existentes, um plano de ações emergenciais pode ser dividido em três seções basilares:

- a) I – caracterização da região e dos riscos e vulnerabilidades correspondentes a cenários plausíveis de acidente.
- b) II – plano de ação com a definição de ligações hierárquicas e funcionais dos principais intervenientes, fixando as respectivas missões para dar resposta a situações de emergência; indicando os meios e recursos disponíveis; definição dos planos de aviso e de evacuação da população.
- c) III – treinamentos, atualização, revisão e disseminação do plano. Consiste em procedimentos para melhoria, atualização e eficácia do plano de emergência, divulgação pública, treinamento dos agentes de defesa civil e da população para obtenção de respostas eficazes em caso de acidentes.

Então, observa-se que o plano de evacuação deve ser considerado no contexto do plano de emergência, que, por sua vez, precisa ser



contemplado pelo plano de contingência. Em consequência do grau de detalhamento e das análises de riscos que uma instituição ou uma comunidade podem estar suscetíveis, tanto a elaboração quanto a execução desses planos são bastante complexas. A seção seguinte pondera sobre mais alguns detalhes do plano de evacuação.

### 2.3.2.1 Plano de evacuação

Como consta na OSHA (2013), nos casos em que há risco eminente à saúde das pessoas, situadas em local suscetível a algum tipo de desastre, a melhor opção é a evacuação, sendo que ela deve acontecer de forma segura e planejada.

O plano de evacuação é o documento que possibilita a uma organização desenvolver ações de preparação e prevenção, tendo em conta eventual envolvimento em uma situação de emergência. Segundo a definição da OSHA (2013), a evacuação é considerada como o abandono do local de trabalho, seguindo os caminhos pré-determinados no planejamento.

Em conformidade com Apte (2009) *apud* Campos *et al.* (2012), um plano de evacuação tem por objetivo organizar as ações a serem tomadas para o deslocamento seguro das pessoas, deixando a comunidade mais preparada. Na formulação desse plano, avaliam-se aspectos como a densidade demográfica, o número de viagens e o tipo de utilização do solo onde o polo se encontra.

Conforme Kovács e Spens (2007), a preparação e o planejamento de evacuação de emergência, dependendo do tipo de desastre, permitem tempo suficiente para que toda a população seja deslocada, minimizando a sua exposição ao risco. Esses autores afirmam que, para tanto, na formulação do plano é preciso realizar o estudo e a análise de cada tipo de emergência.

Por conseguinte, não apenas a probabilidade de ocorrência de desastres, como também a intensidade dos danos possíveis deve ser considerada. Antever tais acontecimentos afetará na preparação da população para responder a uma emergência, ou seja, quanto mais preparada, menores serão os efeitos negativos (KOVÁCS; SPENS, 2007).

O plano de evacuação possui área de atuação delimitada, em que se dá a hierarquização das zonas de risco. Trata-se de um plano em que, para sua formulação, precisam ser levantados dados como: o número de pessoas a serem evacuadas, os locais para onde deverão ir, como os abrigos e as rotas de saídas a serem utilizadas. Essas ações precisam

considerar a segurança do encaminhamento dos desalojados, que estarão sob influência do risco dinâmico e das condições anormais de tráfego (BALBI, 2008).

Definidas as áreas mais suscetíveis ao risco, os abrigos, as rotas e o tempo de evacuação, faz-se necessária a determinação do fluxo e tempo de duração das atividades de evacuação. Ela deve ser decidida pelo responsável descrito no plano e será consequência de um sinal de alerta, conhecido por todos aqueles que precisam sair da área de risco (BALBI, 2008).

Na elaboração do plano de evacuação, as características socioculturais da população que receberá o alarme necessitam ser levadas em consideração. Stallings (2002) sugere que, em se tratando de emergências de origem tecnológicas, a perda de credibilidade e de confiança aos olhos do público é sintomática das interferências na comunicação. Sendo assim, fatores como esses podem afetar o emocional dos envolvidos, trazendo morosidade à evacuação.

Em contraponto, para melhorar as relações de comunicação, aspectos como os seguintes tendem a contribuir para uma resposta adequada às mensagens de aviso e alerta (ALMEIDA, 2001):

- recursos econômicos;
- cultura;
- atributos psicológicos;
- atividade profissional;
- conhecimento (dos perigos, dos planos de ação etc.);
- cognição (otimismo, fatalismo, *stress* etc.);
- experiência;
- atributos fisiológicos;
- deficiências físicas ou mentais.

Essas variáveis são importantes para que a mensagem de notificação consiga ser passada e interpretada pelas pessoas que a ouvirem da forma mais fidedigna possível, e, então, sejam tomadas as providências corretas, conforme o orientado pelo plano, com a finalidade de diminuir as consequências do fator emocional, que pode atrapalhar aumentando o tempo de evacuação.

Consta em Balbi (2008) que o aviso de alerta é parte do sistema de comunicação do plano de evacuação e se relaciona diretamente com a população através de sirenes, rádio, televisão, alto-falantes, entre outros dispositivos. Será a partir de avisos e alertas que a população irá se preparar para aguardar abrigadas em suas casas, ou então sair delas o

mais rápido possível; quando isso for necessário, ocorre a evacuação propriamente dita.

O procedimento de evacuação envolve a remoção das pessoas que estão em áreas perigosas ou potencialmente atingidas para uma área segura. Uma vez que as autoridades tenham decidido pela evacuação, ativam-se os sistemas de alarme e os deslocamentos são iniciados, seguindo uma ordem de prioridades, conforme detalhado no plano (BALBI, 2008).

O plano de evacuação se baseia em mapas de risco, que informam os tempos disponíveis para atuação e as áreas potencialmente atingidas. Na elaboração do plano, as rotas, os pontos de encontro e os abrigos devem ser previamente definidos. Durante o processo de evacuação, é necessário que haja constante supervisão da polícia e das autoridades competentes (AN *et al*, 2013).

A escolha dos pontos de encontro prioriza locais com fácil acesso para chegada e saída de um contingente de pessoas. Eles precisam ser espaços abertos, como praças, igrejas, campos de futebol, entre outros. Assim como eles, os abrigos precisam também ter fácil acesso, estando localizados em vias apropriadas com espaço para o desembarque das pessoas, além de área para descarga de mantimentos. A divulgação de onde estão situados esses locais deve ser ampla e clara à população.

No plano de evacuação, precisam ser considerados também os modais de transporte existentes, a utilização de transporte público e a necessidade de algum tipo de transporte especial. O tempo para o deslocamento das pessoas entre as áreas de risco e um lugar seguro também deve ser ponderado durante a elaboração do plano (AN *et al.*, 2013).

Onelcin, Mutlu e Alver (2013) destacam que o número de pessoas a serem deslocadas varia dependendo do período do dia, devido ao aumento da população que se encaminha a locais como trabalho, escolas, instalações comerciais, entre outras, durante o dia. O trânsito de pessoas muda também durante os dias da semana, dependendo das características da região afetada, do tráfego local e de passagem. Essas variações podem ser verificadas através da simulação de diferentes cenários.

Para a elaboração dos cenários são considerados também aspectos como a infraestrutura existente, a capacidade das vias e a demanda de tráfego são determinantes no processo de evacuação (ONELCIN; MUTLU; ALVER, 2013).

Comumente em uma evacuação as pessoas deslocam-se através de seus carros particulares, isso quando possuem algum. Existe, no

entanto, um grupo de pessoas que não possui um carro a sua disposição, de modo que dependem do transporte coletivo para realizar seus deslocamentos. Esse grupo de pessoas tem acesso ao transporte coletivo através dos pontos de encontro.

Em estudo desenvolvido por Naghawi e Wolshon (2012), verificou-se que um maior número de ônibus faz com que haja um aumento significativo no número de pessoas evacuadas. Em contrapartida, o mesmo estudo apresentou que, quando fortemente utilizados em vias de trânsito rápido, os ônibus têm influência negativa, provocando congestionamentos e atrasos de viagens.

O referido estudo destacou ainda, que a melhor utilização dos ônibus ocorre nas vias arteriais, comportamento que é contrário ao dos veículos de passeio. Os carros próprios quando aumentados em uma unidade, nas vias arteriais, pouco efeito provocaram no número total de pessoas movidas, já nas de trânsito rápido proporcionam viagens mais rápidas.

No Brasil a Política de Defesa Nacional, no qual está inserido o Sistema Nacional de Defesa Civil (SINDEC) que atua na redução de desastres, prevê uma série de ações mitigatórias para diversos tipos de desastres. Estes são classificados e subdivididos em grupos conforme suas características e natureza, para que assim sejam definidos as ações e os responsáveis adequados àquele tipo de desastre (BRASIL, 2007).

A Política Nacional de Defesa Civil contempla desastres de natureza tecnológica relacionados com produtos perigosos, neste está incluído os desastres com substâncias e equipamentos radioativos de uso em pesquisas, indústrias e usinas atomoelétricas. Em resposta a esses eventos, existem diversos projetos, eles objetivam o planejamento e a preparação dos órgãos do SINDEC. O projeto de socorro às populações prevê dentre outras ações o isolamento e evacuação da área de risco e a definição das vias de evacuação e controle de trânsito nas mesmas (BRASIL, 2007).

### 3 ESTUDOS E MÉTODOS EXISTENTES

Neste capítulo são descritos alguns estudos relacionados à microssimulação de tráfego e que também consideram situações em que seja necessária a evacuação da população. São observados alguns métodos existentes e que fazem uso de microssimulação de tráfego em situações de emergência. O levantamento desses estudos e métodos auxiliaram no embasamento do método proposto por esta pesquisa e descrito no capítulo quatro.

#### 3.1 ABORDAGENS DE EVACUAÇÃO: FOCO EM EMERGÊNCIA NUCLEAR

Há diferentes abordagens de evacuação em casos de emergência, ela pode ser obrigatória, recomendada, ou voluntária. Existe também uma variação na escala relacionada à quantidade de pessoas e ao tamanho da área a ser evacuada. Outro fator variável é o nível de controle, que pode ser local, regional ou nacional (STEPANOV; SMITH, 2009).

As causas emergenciais capazes de provocar uma evacuação são diversas, tendo como possíveis origens fatores tecnológicos e humanos, como os acidentes químicos, industriais; ou catástrofes naturais, como furacões, terremotos, tsunamis, entre outros. Um acidente pode provocar agravamentos em outro, como é o caso de desastres naturais aliados a incidentes como os químicos ou nucleares.

Acidentes nucleares estão, de modo geral, relacionados a usinas que constituem centros concentradores de pessoas, podendo ser consideradas como polos geradores de viagens (PGV). Locais assim demandam planejamento interno e externo de evacuação das pessoas.

Nesses casos, o estudo do tráfego atua de maneira determinante, orientando na elaboração do referido plano, em busca de maior mobilidade. Conforme Lindell (2007), os meios de transportes disponíveis para o deslocamento seguro das pessoas são imprescindíveis para o desenvolvimento das estimativas de tempo de evacuação. Para o cálculo do mesmo são também necessários os dados de geometria da via, a escolha das rotas, a velocidade dos veículos, entre outros.

Segundo Campos *et al.* (2012), a eficácia da evacuação dependerá decisivamente da localização dos lugares onde há concentração de pessoas, como os polos geradores de viagens, além do fluxo de veículos no local, bem como da disposição da população em

seu entorno. Logo, o mapeamento desses locais e o levantamento dos dados são imprescindíveis à elaboração do plano de evacuação.

Em áreas urbanizadas as evacuações em massa são capazes de gerar uma demanda de tráfego significativamente superior àquelas que ocorrem em áreas menos urbanizadas. No caso das usinas nucleares, por haver um estudo prévio para a localização das mesmas, elas se encontram geralmente em áreas pouco ou nada urbanizadas, para que na ocorrência de um acidente os impactos sejam menores.

É determinante analisar também as características geográficas e do clima, pois elas podem trazer complicações para a evacuação. Assim, dependendo das condições da malha, da natureza do risco, da quantidade de pessoas e do clima o processo de evacuação pode durar dias e afetar muitos quilômetros de estradas (NAGHAWI; WOLSHON, 2012).

Conforme o manual de planejamento de evacuação do governo australiano há duas abordagens básicas de evacuação: a imediata, que ocorre diante de um incidente inesperado como incêndios, terremotos, entre outros que requerem ação imediatamente após o incidente; e a pré-incidente, neste caso há um período de tempo limitado para que a evacuação seja realizada antes da ocorrência de maiores impactos provocado pelo incidente, como acontece nas enchentes, por exemplo (EMA, 2005).

Em ambas as situações o desenvolvimento de um plano de evacuação é essencial. No caso de acidentes em usinas nucleares, a evacuação ocorre antes do impacto provocado pelo incidente, ou seja, quando ainda não há quantidade de radiação suficientemente prejudicial à população.

### **3.1.1 Plano de evacuação para usinas nucleares**

Conforme dados da Agência Internacional de Energia Nuclear a *International Agency Energy Atomic* (IAEA), existem atualmente 435 reatores nucleares em operação no mundo e mais 70 reatores em construção. Nestes números não consta o reator de Fukushima no Japão, que está definitivamente desativado.

A Tabela 5 relaciona os países que possuem reatores nucleares, a quantidade dos mesmos e a capacidade de produção de energia nuclear.

Tabela 5 – Países que possuem reatores nucleares

<b>Posição</b>	<b>País</b>	<b>Número de Reatores</b>	<b>Capacidade Elétrica (Mw)</b>
1	Estados Unidos	100	98560
2	França	58	63130
3	Japão	50	44215
4	Rússia	33	23643
5	Coréia	23	20739
6	Índia	21	5308
7	Canadá	19	13500
8	China	18	13860
9	Reino Unido	16	9231
10	Ucrânia	15	13107
11	Suécia	10	9474
12	Alemanha	9	12068
13	Espanha	8	7567
14	Bélgica	7	5927
15	República Checa	6	3804
16	Taiwan, China	6	5028
17	Suíça	5	3308
18	Finlândia	4	2752
19	Hungria	4	1889
20	Eslováquia	4	1816
21	Paquistão	3	725
22	Argentina	2	935
23	Brasil	2	1884
24	Bulgária	2	1906
25	México	2	1330
26	Romênia	2	1300
27	África Do Sul	2	1860
28	Armênia	1	375
29	Irã	1	915

<b>Posição</b>	<b>País</b>	<b>Número de Reatores</b>	<b>Capacidade Elétrica (Mw)</b>
30	Países Baixos	1	482
31	Eslovênia	1	688
	<b>Total</b>	<b>435</b>	<b>371326</b>

Fonte: IAEA (2012).

A partir dessa tabela, fez-se o gráfico apresentado na Figura 2, o qual evidencia a superior quantidade de reatores nucleares localizados nos Estados Unidos. Apesar de este país contar com o maior número de reatores nucleares do mundo, a França e o Japão são os que mais dependem da energia nuclear, haja vista a concentração de reatores, quando observado o tamanho de seus territórios.



Figura 2 – Gráfico com a capacidade elétrica dos países com reatores nucleares



Fonte: IAEA (2012).

A produção de eletricidade através de reatores nucleares se dá através do calor produzido por reações em cadeia de fissão nuclear. Segundo Araujo (2006), esse calor atua na produção de vapor, de modo que é empregado em um ciclo termodinâmico convencional, para mover uma turbina, que por sua vez move um gerador e assim produz energia elétrica.

Ainda conforme Araujo (2006), as usinas nucleares são instalações complexas, seja pela quantidade de tecnologias industriais combinadas, seja pelo elevado nível de segurança de que necessitam. Existem diversos fatores capazes de colocar a segurança de uma usina nuclear em risco, e eles podem ser organizacionais, falha de equipamento, deficiências de projeto, degradação do sistema, perda de integridade das barreiras de contenção, entre outros com capacidade de gerar um evento desencadeador.

### 3.1.1.1 Legislação internacional

Sendo assim, como consta no documento *EPR-METHOD 2003* (IAEA, 2003), diversos protocolos e procedimentos precisam ser seguidos para a instalação e operação das usinas nucleares. Um deles é a existência de um planejamento de emergência, que considere também um plano de evacuação, o qual deve ser testado e atualizado com frequência.

Seguindo as recomendações constantes no documento da Comissão Nuclear dos Estados Unidos, a *US Nuclear Regulatory Commission* (USNRC) NUREG-0654 (1980), um dos principais objetivos da resposta à situação de emergência nuclear consiste na rápida classificação do acidente, na contenção da contaminação, bem como na prevenção de efeitos à saúde.

Para fins de planejamento em resposta às emergências, a USNRC define duas zonas de planejamento de emergência (ZPEs) em torno de cada usina de energia nuclear. O tamanho exato e a configuração das zonas varia de acordo com as características de cada usina. Para isso, são levadas em consideração as necessidades locais de resposta à emergência, a população, as características do solo, as vias de acesso e os limites jurisdicionais.

Conforme a USNRC (2009), um dos tipos de ZPEs considera o raio de 10 milhas em torno da usina e tem como principal preocupação a exposição do público e a possível contaminação radioativa no ar. A outra ZPE considera que a nuvem radioativa pode se estender por um

raio de 50 milhas. Nessa ZPE, a preocupação é a ingestão de alimentos e líquidos que podem estar contaminados por radioatividade.

De modo geral, diante das preocupações descritas acima, o plano de evacuação emergencial considera apenas a ZPE com raio de 10 milhas. Os procedimentos para a evacuação dos funcionários e da população dependerão do nível de risco que envolve o acidente. Para isso, faz-se uso da classificação de emergência, que consiste em um conjunto de condições que indicam o nível de risco interno e externo à usina.

O modelo internacional de classificação considera quatro categorias de emergência, relacionadas a seguir, conforme sua escala de risco (USNRC, 2009).

- 1) **Evento Não Usual (ENU)** – consiste em uma anormalidade na usina. Todavia, não há possibilidade de liberação de material radioativo para o meio ambiente. As autoridades nacionais, estaduais e municipais são notificadas. No entanto, a população não sofre qualquer alteração em seu cotidiano.
- 2) **Alerta** – nessa classe existe a indicação de real ou provável degradação nos níveis de segurança, com possível liberação de pequena quantidade de material radioativo no interior da usina. Os funcionários são avisados e colocados em alerta, no entanto, ainda não há necessidade de evacuação da população.
- 3) **Emergência de Área** – tem a indicação de real ou possível falha nas funções de segurança. Apesar disso, não há indicação de possível falha do núcleo do reator. Trata-se de um problema mais grave, onde há eminência de liberação de pequenas quantidades de material radioativo na área da usina. Nesse caso, os trabalhadores (não envolvidos na resposta à emergência) e quem mais estiver dentro da área da usina precisam ser removidos para outro local, sem risco de contaminação.
- 4) **Emergência Geral** – trata-se da situação mais grave, em que há indicação de liberação de material radioativo, com possível ou real degradação do núcleo do reator. Precisam ser tomadas medidas para a realização da evacuação da população no entorno da usina.

Os regulamentos da USNRC são projetados para mitigar as consequências de acidentes e minimizar a exposição de funcionários e

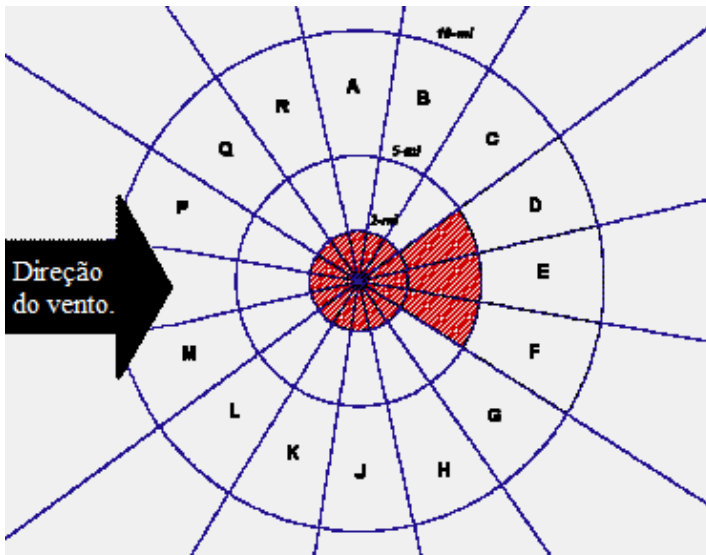
da população à radiação. No entanto, nem sempre a evacuação será necessária, e isso dependerá da classificação do evento. Além disso, quando ocorre a evacuação nem sempre ela se dá de forma completa em todo o raio de 10 milhas.

Isso acontece porque, na maioria dos casos, a liberação de material radioativo de uma usina nuclear não atinge todas as direções ao redor da usina por causa do vento. Sendo assim, as evacuações devem ter seu comportamento mapeado, conforme as características climáticas e de comportamento do vento local, a fim de antecipar o melhor caminho a ser percorrido pela população (USNRC, 2009).

Destaca-se que o raio mínimo de 3 milhas em volta da usina precisa ser evacuado quando ocorre o evento de emergência de área. No caso de uma emergência geral, também devem ser evacuadas as pessoas que vivem na área localizada dentro da zona de 5 milhas na direção do vento. Para essa evacuação devem ser observados todos os caminhões dentro dos raios de 3 e 5 milhas em torno da usina, projetados no mapeamento (USNRC, 2009).

A USNRC (2009) considera que o comportamento do vento segue o padrão denominado de "buraco de fechadura". Representado na Figura 3, ele ajuda a explicar as mudanças de vento.

Figura 3 – Comportamento do vento e direção da evacuação



Fonte: USNRC (2009).

O vento deve ser monitorado dentro da ZPE de 5 milhas, no sentido de dar prioridade a áreas que podem ser contaminadas primeiro pela nuvem de radiação. Comumente, em resposta a uma emergência geral, as pessoas que vivem na zona de 10 milhas provavelmente não serão evacuadas. Elas deverão ser aconselhadas a se recolherem em suas casas e ficarem atentas aos sistemas de comunicação, acompanhando as ocorrências do acidente.

### 3.1.1.2 Legislação Nacional

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) licencia e fiscaliza instalações nucleares e radioativas, sendo responsável pela emissão de licenças para a aprovação do local, construção, operação e desativação, as quais seguem procedimentos baseados em normas técnicas e padrões internacionais. Há um apanhado de leis, normas e regulamentações que envolvem o programa nuclear brasileiro, no entanto este estudo menciona apenas aquelas envolvidas com a elaboração do plano de evacuação.

Aprovada pela Portaria nº 144/SAE de 1997, a Diretriz de Angra 1, que trata do planejamento global, em suas instruções complementares, consta que ele precisa ser composto, dentre outros, pelos seguintes documentos: o Plano de Emergência Local (PEL), voltado às instalações da usina; e o Plano de Emergência Externo (PEE) do Estado do Rio de Janeiro, voltado à área externa a ela.

Esses planos consideram as ações de resposta à emergências, sendo uma delas a necessidade de remoção dos funcionários e da população. Assim, nesses documentos estarão descritas as atividades de controle de tráfego, as rotas, os pontos de encontro e os locais de abrigo, conforme a área de delimitação de cada plano.

A norma CNEN-NE-1.04/2002 que trata do licenciamento de instalações nucleares considera os Planos Preliminares para Procedimentos em Situações de Emergência, indicando a necessidade de cada instalação “assegurar a possibilidade de evacuação e de reentrada na instalação a fim de minorar as consequências de um acidente ou, se for o caso, continuar a operação.” (CNEN-NE-1.04, 2002, p. 15).

Com relação ao Plano de Emergência, a CNEN-NE-1.04/2002 contém a descrição do PEL, no qual deve constar a operação inicial e a operação em caráter permanente, no sentido de tomar medidas apropriadas para garantir a saúde e a segurança do público e prevenir danos a propriedades. Com relação à evacuação, esse plano deve conter:

Acordos firmados com autoridades locais, estaduais ou federais para pronto aviso e evacuação do público, ou para outras medidas protetoras necessárias ou desejáveis, incluindo identificação das principais autoridades, por título e organização, conforme disposto nas normas do SIPRON. (CNEN-NE-1.04, 2002, p. 20).

Os planos preliminares para emergências devem obedecer à orientação contida nas Normas Gerais do SIPRON, dentro da filosofia da IAEA. O Sistema de Proteção ao Programa Nuclear Brasileiro (SIPRON) tem como uma de suas atribuições planejar e coordenar as ações, em situações de emergência nuclear, que tenham como objetivo proteger:

- As pessoas envolvidas na operação das instalações nucleares e na guarda, manuseio e transporte dos materiais nucleares.
- A população e o meio ambiente situados nas proximidades das instalações nucleares.
- As instalações e materiais nucleares (SIPRON, 2013a).

Conforme a norma do NI-01/2012 para o gerenciamento de uma situação de emergência nuclear, para o SIPRON, as situações de emergências estão associadas às unidades operacionais, podendo ocorrer em:

- reatores de potência;
- instalações do ciclo de combustível;
- instituições de ensino e pesquisa;
- unidades de transportes.

Segundo a mesma norma, no que consta sobre o Plano de Emergência Externo (PEE) ou Plano de Apoio Externo (PAE), é estabelecido que as medidas de proteção à população, implementadas fora da área de propriedade da unidade operacional, na ocorrência de acidente nuclear, sendo, portanto, de responsabilidade do governo.

Outro importante documento mencionado na norma é a Carta de Situação, que será confeccionada de acordo com a área da emergência e deverá conter as seguintes informações:

- zonas de planejamento de emergências;
- pontos de monitoramento radiológico;
- bloqueios de estrada;
- áreas atingidas pela radiação;

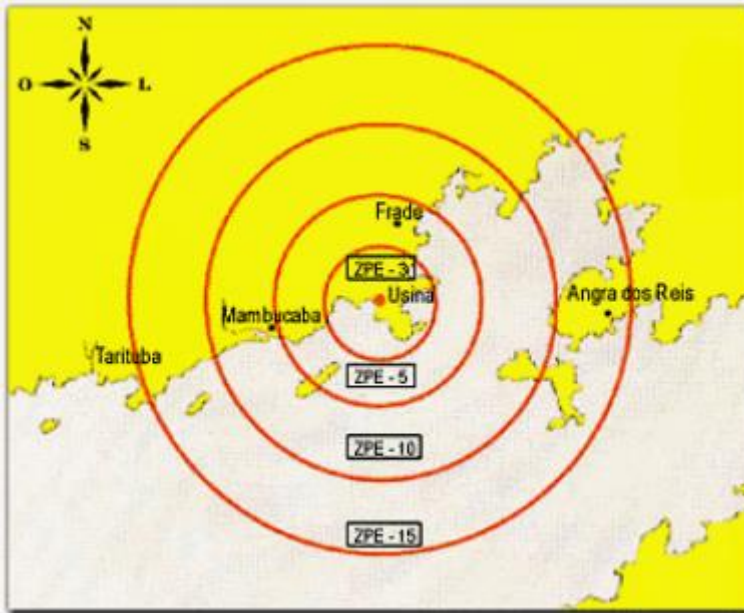
- localização dos abrigos;
- localização de heliportos, portos e terminais rodoviários e ferroviários;
- outros dados julgados úteis (SIPRON, 2013b).

Os planos de emergência da instalação, do município e do estado são testados anualmente através de exercícios simulados. Esses planos são o PEE ou PAE, o PEL e os Planos de Emergência Complementares (PEC), cada instituição de apoio à evacuação é responsável pela elaboração do próprio PEC. Existem os Exercícios Gerais realizados a cada dois anos, e os Exercícios Parciais que ocorrem, no mínimo, a cada dois anos sob a coordenação do órgão central do SIPRON (SIPRON, 2013b).

Esses exercícios têm como propósito avaliar e, caso seja necessário, aperfeiçoar o planejamento, especificamente no que diz respeito à ativação e aos procedimentos dos Centros de Emergência. Neles, busca-se exercitar as possíveis tomadas de decisão referentes às ações previstas na Norma Geral para Instalação e Funcionamento dos Centros encarregados da Resposta a uma Situação de Emergência Nuclear NI-01/2012.

Conforme o PEE do estado do Rio de Janeiro, é considerado o plano de evacuação da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), no município de Angra dos Reis. A CNAAA é formada pelas usinas nucleares Angra 1, Angra 2 e Angra 3, atualmente em construção, as quais estão sobre a administração da Eletronuclear, subsidiária das Centrais Elétricas Brasileiras (Eletrobras). As Zonas de Planejamento de Emergência recomendadas estão representadas através da Figura 4

Figura 4 – Representação Gráfica das ZPE recomendadas para a CNAAA



Fonte: RIO DE JANEIRO (2013).

Ainda conforme o PEE/RJ (2013), o plano de evacuação está previsto até a ZPE 5, que são denominadas como Zonas de Ações Preventivas, sendo que:

- ZPE 3 – área circunscrita num raio de 3 km, com centro na Unidade I da CNAAA, excetuando-se a Área de Propriedade da Eletronuclear (APE).
- ZPE 5 – coroa circular, com centro na Unidade I da CNAAA, com 5 km de raio externo e 3 km de raio interno.

Existem ainda as Zonas de Controle Ambiental, que são:

- ZPE 10 – coroa circular, com centro na Unidade I da CNAAA, com 10 km de raio externo e 5 km de raio interno.
- ZPE 15 – coroa circular, com centro na Unidade I da CNAAA, com 15 km de raio externo e 10 km de raio interno.

Além das zonas mencionadas, há ainda a Zona de Acompanhamento Ambiental, que consiste em uma área circunscrita em um raio de 50 km, com centro na Unidade I da CNAAA (RIO DE JANEIRO, 2013).



### **3.1.2 Evacuação utilizando a microssimulação de tráfego**

Os autores Onelcin, Mutlu e Alver (2013) realizaram um estudo sobre o planejamento de evacuação de uma área de indústrias químicas em Aliaga, na costa Oeste da Turquia. Nesse estudo, eles utilizaram os *softwares* MATsim para a microssimulação e Cube Avenue para mesossimulação.

A necessidade do estudo surgiu da falta de um plano de evacuação para uma área residencial suscetível ao risco de acidentes, devido à proximidade de instalações químicas. Um caso que muito se assemelha a necessidade de evacuação diante de uma emergência nuclear, em que se buscam as melhores rotas e o menor tempo de deslocamento possível.

Primeiramente, foi definida a delimitação das zonas de risco em torno da instalação suscetível a um acidente químico. Essas zonas foram denominadas de Zonas de Risco e podem ser consideradas como as Zonas de Planejamento de Emergência (ZPE), abordadas neste trabalho. A Figura 5 apresenta os raios que delimitam essas zonas em torno do complexo industrial, demonstrando o limite da área de evacuação (ONELCIN; MUTLU; ALVER, 2013).

Figura 5 – Zonas do plano de evacuação



Fonte: Onelcin, Mutlu e Alver (2013).

As zonas de risco foram definidas através do *software* Aloha, com raios de 1,7 km, 2,4 km e 3,7 km, sendo que dentro destes raios foram determinadas e numeradas as zonas de tráfego para serem evacuadas. Fora do limite da área de evacuação, existem três centros de saúde e outras três áreas destacadas por polígonos em verde, considerados como destinos, os quais também podem ser visualizados na Figura 5 (ONELCIN; MUTLU; ALVER, 2013).

O Hospital Estadual Aliaga é representado pelo círculo azul, pela cruz vermelha e pelo número 30; os outros centros de saúde, pelos mesmos símbolos e números 26 e 27. A primeira zona de risco é a zona mais vulnerável, sendo que as pessoas que necessitam de intervenção médica têm como principal destino o Hospital estadual. O comportamento típico de pessoas na Turquia é ir diretamente para os hospitais em situações de emergência. Isso foi considerado na geração dos cenários.

Além disso, os autores Onelcin, Mutlu e Alver (2013) observam que, diante de uma situação emergencial, as pessoas não possuem um comportamento comum, podendo, inclusive, sair a pé de suas casas, caminhando por ruas e calçadas. Essa situação é difícil de ser modelada, haja vista a dificuldade em estimar a divisão modal do número de viagens, entre pessoas a pé, veículos e transporte público. Portanto, no estudo abordado, apenas os veículos foram levados em consideração para o modelo de evacuação.

Considerou-se também que no caso de uma emergência haverá maior movimentação de pessoas. Sendo assim, os autores usaram uma taxa média de duas pessoas por veículo, baseada na taxa de 1,57, que é tida como normal pelo Departamento Municipal de Planejamento de Transportes de Istambul. Para a determinação dessa taxa, foi averiguado também o número de total de desalojados mensurado em 14.472. O resultado do número de veículos foi de 7.236.

Para o desenho da malha, foi utilizado o *Open Street Map* (OSM). Para os dados de capacidade da malha, o estudo fez uso dos valores obtidos pelo *Highway Capacity Manual* (HCM), de 2010. Como resultado, chegou-se à conclusão que a capacidade nas vias arteriais é de 1.050 veículos por hora por pista; nas coletoras, é de 450 veículos por hora por pista; e nas locais, de 300 veículos por hora por pista (ONELCIN; MUTLU; ALVER, 2013).

Feito isso, foram simulados três cenários, os quais tiveram como base a localização dos pontos de destino, a demanda do tráfego e o tempo de evacuação. Cada cenário utilizou uma matriz OD diferente, considerando também cada zona de tráfego. Desse modo, os cenários diferem um do outro pela distribuição e localização da demanda de tráfego, o que afeta no tempo de evacuação.

O número de cenários pode ser aumentado, considerando-se a hora do dia, a área do impacto, entre outros aspectos. Os cenários do estudo em análise foram gerados por um evento à noite, em que toda a população das áreas de risco deve deixar a área onde está através de veículos particulares, considerando a ocupação média de duas pessoas por veículo, conforme mencionado anteriormente.

Os simuladores possuem diferentes metodologias de distribuição de veículos. No Cube Avenue os veículos são analisados como "pacotes", que se movem através da rede, em uma simulação mesoscópica. Um veículo pode ter que esperar, devido a limitações de capacidade da via, diante da demanda de fluxo. O resultando em cada *link* é avaliado através das relações entre velocidade e fluxo de tráfego agregados.

O Avenue requer dados de entrada como o número de veículos que podem preencher o *link*, a distância, a capacidade e o número de pistas. O armazenamento das ligações rodoviárias é calculado através da multiplicação do número de vias, veículos e a distância do *link*.

Os centroides são atribuídos automaticamente e as viagens são geradas a partir do centroide da zona de origem. As simulações são realizadas considerando os cenários determinados através de matrizes de origem e destino (ONELCIN; MUTLU; ALVER, 2013).

O MATSim, uma ferramenta *open-source*, trabalha com uma estrutura modular que pode ser modificada ou substituída de acordo com várias condições dos cenários, como consta em Horni *et al.* (2009) *apud*. Onelcin, Mutlu e Alver (2013). Tem como foco a simulação microscópica, portanto, é observado o comportamento de cada condutor, através da determinação de um plano para cada agente.

O movimento de cada agente é baseado na demanda de tráfego, na malha e na interação com os demais agentes. Como dados de entrada, foram utilizados o número de pessoas e de locais que precisam ser evacuados, a localização e a capacidade dos centros de saúde destinos, bem como as distâncias entre os locais de evacuação e os centros médicos.

Através do módulo *DemandGenerator*, o MATSim determina a demanda de tráfego inicial de cada zona, e essa demanda varia de acordo com a densidade populacional da zona e a malha viária existente nela. O MATSim atribui o início da viagem para o nó mais próximo às coordenadas de atividade do agente, e não para o baricentro da zona definida, diferente do que ocorre no Cube Avenue (ONELCIN; MUTLU; ALVER, 2013).

O Cube Avenue distribui os veículos a partir dos centroides das zonas de origem, que se deslocam através da malha até os centroides das zonas de destino. No MATSim a densidade populacional das zonas de origem é considerada, de forma que as zonas de destino são pré-definidas, através do menor caminho.

Os valores do tempo de evacuação variam entre os diferentes cenários e também entre os simuladores utilizados. A utilização de dois *softwares* possibilitou comparar os tempos de evacuação. A Tabela 6 compara os dados dos dois *softwares* utilizados.

Tabela 6 – Comparação dos tempos de evacuação dos simuladores

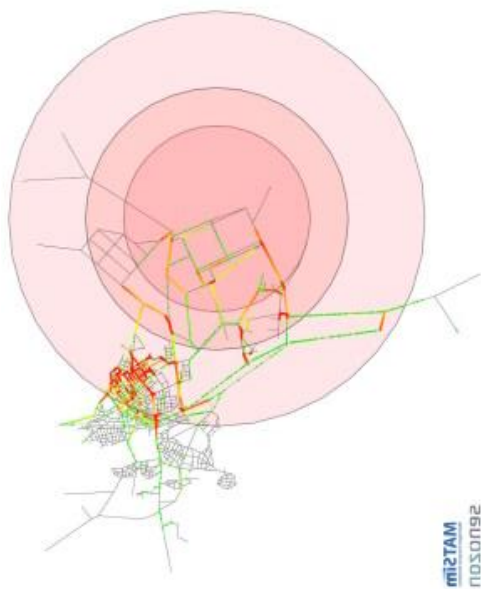
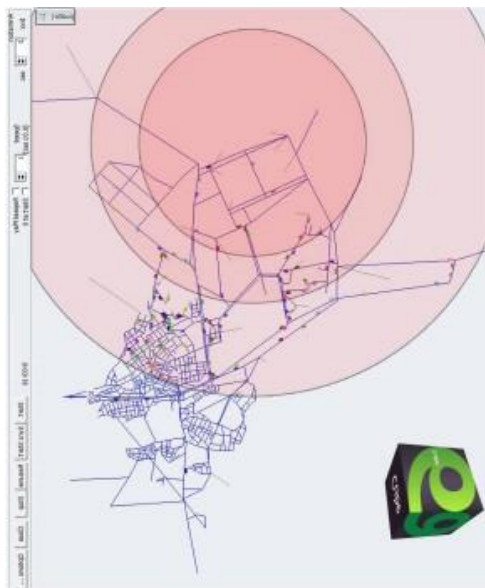
Resultados MATSim				Resultados Citilabs Cube Avenue			
Cenários	Zona de risco 1	Zona de risco 2	Zona de risco 3	Cenários	Zona de risco 1	Zona de risco 2	Zona de risco 3
1	45	83	86	1	43	64	93
2	44	82	91	2	42	65	106
3	47	86	88	3	43	65	80

Fonte: Onelcin, Mutlu e Alver (2013).

Verifica-se que a maior variação no tempo de evacuação ocorre nos tempos verificados para as zonas de risco 2 e 3, sendo que esta possui o maior tempo de evacuação. A Figura 6 apresenta a malha e os pontos de maior densidade de tráfego, representados nos dois *softwares*, referentes ao mesmo instante de simulação do terceiro cenário, sendo possível notar grande quantidade de pontos de congestionamento na zona de risco 3.

A variação encontrada nos tempos simulados pelos dois softwares pode ser resultado da distribuição dos veículos, visto que o Cube possui maior número de centroides. Enquanto que o MATSim distribui os veículos a partir de um número menor de nós.

Figura 6 – Zonas do plano de evacuação



Fonte: Onelcin, Mutlu e Alver (2013).

A partir dos tempos de evacuação verificados nos cenários simulados, foi possível obter um tempo médio. A Tabela 7 apresenta o tempo médio de evacuação verificado através das simulações realizadas para cada cenário, considerando as três zonas de risco.

Tabela 7 – Tempo médio de evacuação

<b>Médias de tempo de evacuação</b>			
<b>Cenários</b>	<b>Zona de risco 1</b>	<b>Zona de risco 2</b>	<b>Zona de risco 3</b>
<b>1</b>	44	74	90
<b>2</b>	43	74	99
<b>3</b>	45	76	84

Fonte: Onelcin, Mutlu e Alver (2013).

Os tempos médios de evacuação aumentam de acordo com a distância dos raios das zonas de risco, que também aumentam. Tanto a zona de risco 1 como a 2 apresentaram tempos médio semelhantes, nos três cenários simulados para cada zona.

Visando diminuir esses tempos, os autores sugerem a instalação de um corredor, para ser utilizado em situação de emergência, como rota de evacuação da zona de risco 1 em direção ao Hospital Estadual de Aliaga.

A zona de risco 3 conta com o maior tempo médio de evacuação, verificado no segundo cenário. Segundo os autores, isso pode acontecer por conta da utilização de um maior número de ruas locais, que possuem menor velocidade média. Assim, os mesmos sugerem a implantação de luzes nas estradas principais, indicando as rotas onde o tráfego flui melhor.

Outro estudo nessa área foi desenvolvido por Chen, Maker e Zhan (2006), que trata da evacuação do arquipélago Florida Keys no sudeste da Florida, situado em uma rota de furacões, e que possui apenas uma rodovia como alternativa de evacuação terrestre. Tal estudo tem como uma de suas principais questões identificar o tempo necessário para a evacuação dos moradores da região, diante de uma situação emergencial.

Chen, Maker e Zhan (2006) também fizeram uso de modelos de microssimulação, sendo que o *software* utilizado foi o Vissim V3.70, capaz de modelar quatro tipos básicos de comportamento de condutores: livre, aproximação, seguindo, freando.

A diferença entre as formas de comportamento considera características psicológicas de cada condutor, que podem variar a velocidade do veículo conforme as características da via ou por influência dos outros condutores. Há os que dirigem na velocidade de fluxo livre, há os que conduzem aproximando-se dos demais carros, os que seguem e os que freiam mesmo antes da aproximação do outro veículo.

Para o alcance dos dados de geração de viagem, Chen, Maker e Zhan (2006) se basearam no estudo de Nelson *et al.* (1989), que desenvolveu uma equação para determinar o número de viagens geradas. Sendo assim, a função da multiplicação baseia-se nas seguintes variáveis: número de residências, número de veículos por residência, percentual de pessoas a serem evacuadas, taxa de ocupação das residências e percentual de veículos utilizados.

O estudo averiguou diferentes cenários e dividiu a área em sete zonas de tráfego, onde foram consideradas as unidades residenciais, as unidades de habitação temporária e as unidades destinadas ao turismo. Neste estudo a evacuação deve ser realizada para toda a área nos casos de furacão nas categorias de 3 a 5.

Como o Vissim é um *software* com base no comportamento estocástico, foram realizadas dez replicações que atuaram no sentido de identificar a aleatoriedade dos eventos simulados. Com isso, foi possível identificar os trechos mais problemáticos da rodovia.

Fez-se uso também de distribuição horária, o que indicou que o tempo de evacuação e a quantidade de congestionamentos variam durante os períodos do dia. O pior cenário apresentou um tempo de evacuação de 20 horas e 12 minutos. Isso permitiu estabelecer um limite de até 24 horas para a evacuação da área (CHEN; MAKER; ZHAN, 2006).

As abordagens adotadas em estudos como os descritos podem ser empregadas em outras áreas que tratam de planejamento de evacuação. O conhecimento sobre o tempo estimado de evacuação permite aos gestores de desastre maior confiança para planejar e organizar uma evacuação quando necessária, contribuindo também para a implementação de melhorias.

### **3.1.3 Métodos para planejamento de evacuação com microssimulação de tráfego**

Existem alguns métodos que contemplam a elaboração do plano de evacuação através da abordagem de como desenvolver um plano de



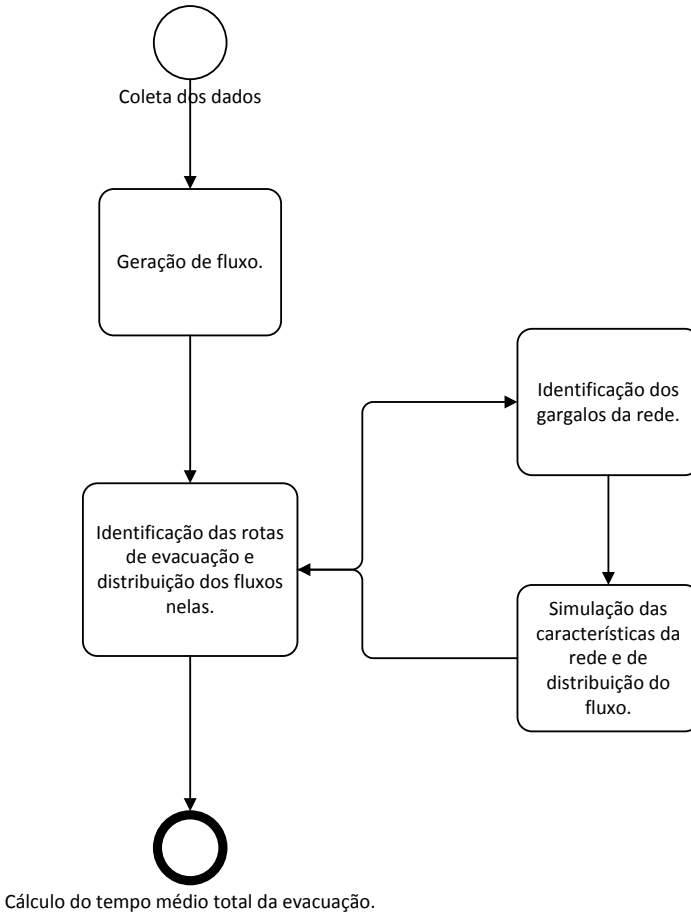
emergência. Conforme Balbi (2008), a definição de um método para o planejamento de evacuação precisa considerar os seguintes passos.

- 1) levantamento das características principais das áreas ameaçadas;
- 2) mapeamento das estruturas de apoio;
- 3) identificação dos sistemas de comunicação;
- 4) detalhamento das ações de resposta e dos procedimentos emergenciais.

Essas etapas são consideradas para a estruturação do plano de emergência, e fazem parte também da formulação do plano de evacuação. Campos (1997) aborda esse processo de forma mais profunda, especificando algumas etapas que precisam ser observadas na elaboração de um plano de evacuação.

Através da adoção de um método, Campos (1997) considera um conjunto de procedimentos, representados em três fases que resultarão no cálculo do tempo médio de evacuação total, conforme apresentado no fluxograma da Figura 7.

Figura 7 – Etapas de um plano de evacuação



Fonte: Adaptado de Campos (1997).

Nesse método, a etapa que inicia o processo de planejamento de evacuação corresponde à criação de um banco de dados, que deve conter informações sobre a população e a região em estudo. Para usinas nucleares, dependendo da dimensão da região, é estabelecido um raio de abrangência como limite da área de estudo. No caso de desastres naturais, a região de estudo deve englobar as áreas mais propícias à ocorrência de acidentes.

Por conseguinte, dependendo da natureza do risco de acidente e de sua localização, faz-se necessária a delimitação da região e, quando

for o caso, a sua divisão em regiões ou zonas menores. Esse procedimento auxilia a forma de estabelecer os locais de abrigo e a rede viária correspondente (CAMPOS, 1997).

Conforme Boeri (1987), do ponto de vista do planejamento de transportes, devem constar no banco de dados as seguintes informações:

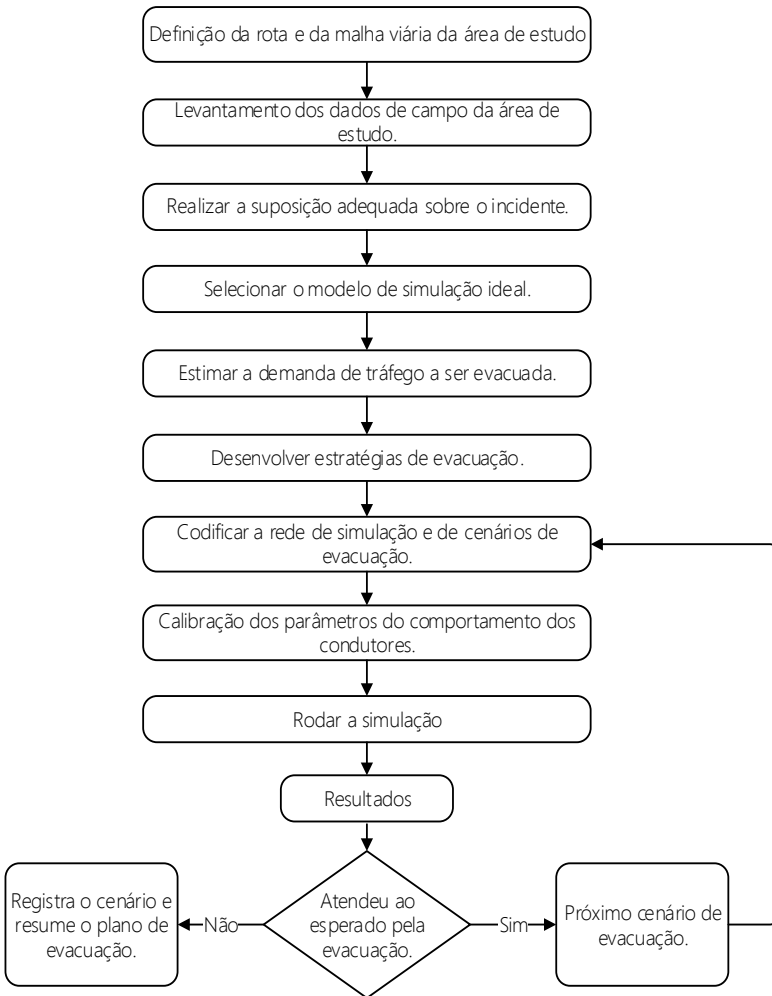
- Características da comunidade: rural ou urbana.
- Densidade populacional: classificada por idade e tipo de residência.
- Situação da população em termos de propriedade ou disponibilidade de veículos particulares.
- Localização de abrigos ou áreas seguras.
- Geometria e características da rede: comprimento e largura das vias, velocidade e volume médio diário de tráfego nas vias e capacidade destas.

A segunda etapa, de geração de fluxo, compreende a determinação da demanda de fluxo de tráfego com base em dados socioeconômicos, como a densidade populacional e a propriedade de veículos. Perry *et al.* (1981) constataram que a maioria da população utiliza veículos particulares durante a evacuação. Isso, contudo, não inviabiliza a utilização do transporte coletivo, através de ônibus que auxiliem na evacuação.

A terceira etapa considera a definição das rotas e a distribuição do fluxo nestas através da alocação de fluxos. Assim, esta etapa subsidia informações para a próxima, que define o tempo total de evacuação da população. Podem, ainda, ser utilizadas ferramentas como os simuladores de tráfego para testes e verificação de cenários e características da rede. Como resultado, tem-se o cálculo do tempo médio total da evacuação, bem como todas as informações necessárias para a elaboração e montagem do plano.

Outro método que detalha a elaboração de um plano de evacuação com a utilização de ferramentas de transportes é o desenvolvido por Qiao, Ge e Yu (2009). Esses autores descrevem que para a elaboração de um plano de evacuação, considerando os polos geradores de tráfego, precisam ser seguidas as etapas que se encontram esquematizadas na Figura 8.

Figura 8 – Estrutura para a elaboração de um plano de evacuação



Fonte: Adaptado de Qiao, Ge e Yu (2009).

A estrutura proposta integra estudos de evacuação na área de transporte com simulação de tráfego. O fluxograma da Figura 6 apresenta as etapas de um processo iterativo que só termina quando o cenário de evacuação proposto atende àquilo que é requisitado pela evacuação. Caso contrário, um próximo cenário com diferentes estratégias de evacuação precisa ser desenvolvido e simulado.

O primeiro passo é a definição da rota e da malha que será utilizada para a evacuação. O segundo corresponde ao levantamento de campo dos dados da área que precisa ser evacuada. O terceiro consiste na identificação correta do tipo de incidente, pois Qiao, Ge e Yu (2009) consideram que a necessidade de evacuação de um polo gerador de tráfego pode ser provocada por diferentes tipos de acidente.

Essa terceira etapa merece atenção especial em virtude de que, a partir dela, identifica-se a necessidade real de evacuação, segundo a gravidade do incidente. Isso irá influenciar em diversos cenários de simulação, que podem assumir diferentes impactos em função de variações nos transportes, como queda de pontes ou de barreiras.

A suposição de incidentes está intimamente relacionada à área de estudo. Ao fazer a suposição do incidente, dois fatores principais são levados em conta: um é a possibilidade de ocorrência de incidentes na área de estudo, e o outro é se o evento de emergência necessita de evacuação utilizando transportes para áreas pequenas e densas (QIAO; GE; YU, 2009).

Sendo assim, para a suposição e identificação do incidente são consideradas basicamente a gravidade dos impactos e a área afetada, fatores estes que afetarão também na estimativa da demanda de evacuação e no tipo de simulação. Destaca-se, dessa forma, que a escolha do modelo ideal de simulação consiste na etapa seguinte.

As atividades exclusivas de tráfego e de veículos nas situações de emergência e de evacuação são muito diferentes daqueles em ruas urbanas diárias. Qiao, Ge e Yu (2009) destacam que, nesses casos, há em uma pequena área uma grande quantidade de veículos de diferentes tipos, que precisam ser carregados na rede viária, num curto período de tempo. Além disso, existem comportamentos especiais de condução que precisam ser considerados, haja vista a situação emergencial.

A simulação microscópica é preferível em estudo de evacuação em pequenas áreas, devido ao seu grau de detalhamento. O modelo de simulação de tráfego escolhido precisa ser capaz de modelar redes viárias detalhadamente, representando os diferentes comportamentos de condução (QIAO; GE; YU, 2009).

A quinta etapa apresentada no fluxograma realiza a estimativa da demanda de viagens para a evacuação. Nesse momento, são utilizados dados históricos ou taxas de geração considerando a participação de diferentes tipos de veículos. Em seguida, desenvolve-se uma matriz de Origem-Destino (O/D), que deverá alimentar o sistema de simulação.

A próxima etapa exige bastante estudo em busca de eficiência e mobilidade durante o processo de deslocamento na evacuação. De modo

geral, as áreas a serem evacuadas, considerando os polos geradores de viagens, são pequenas e densas. Nesses casos, conforme Qiao, Ge e Yu (2009), o número de pessoas é maior que o número de veículos disponíveis na área. Portanto, ações estratégicas precisam ser tomadas no sentido de sancionar problemas como esses, através da aplicação de transportes coletivos.

A etapa de codificação da rede inclui sobre a malha informações sobre geometria, tráfego local, tipos de veículos, configurações e atribuições de rota. São detalhes referentes ao preparo do *software* de simulação, que permitem futuros resultados o mais próximos da realidade possível. Além disso, critérios analíticos precisam ser levados em consideração para o desenvolvimento dos cenários.

Esses critérios são alcançados através da calibração, validação do modelo e determinação dos parâmetros, objetivando garantir resultados de simulação consistentes com a realidade. Cabe salientar que os parâmetros usados na calibração do modelo auxiliam a determinar o comportamento dos veículos dentro da rede.

As etapas finais do método proposto por Qiao, Ge e Yu (2009) consideram rodar o simulador e analisar os resultados obtidos, averiguando a conformidade destes com o esperado pelo plano de evacuação. Caso os resultados estejam adequados e correspondam bem à situação de emergência, o cenário é gravado e o plano de evacuação é descrito de forma detalhada.

#### **4 MÉTODO PROPOSTO PARA A ELABORAÇÃO DE UM PLANO DE EVACUAÇÃO**

Este capítulo apresenta a proposta de um método que dê suporte à elaboração de um plano de evacuação. Para tanto, tomou como base o estudo realizado para o melhoramento da BR-101, no entorno do Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) sob administração da Eletrobras – Eletronuclear.

De forma resumida, no planejamento de evacuação, precisam ser analisados aspectos específicos para tornar o plano mais eficiente e bem sucedido, tais como:

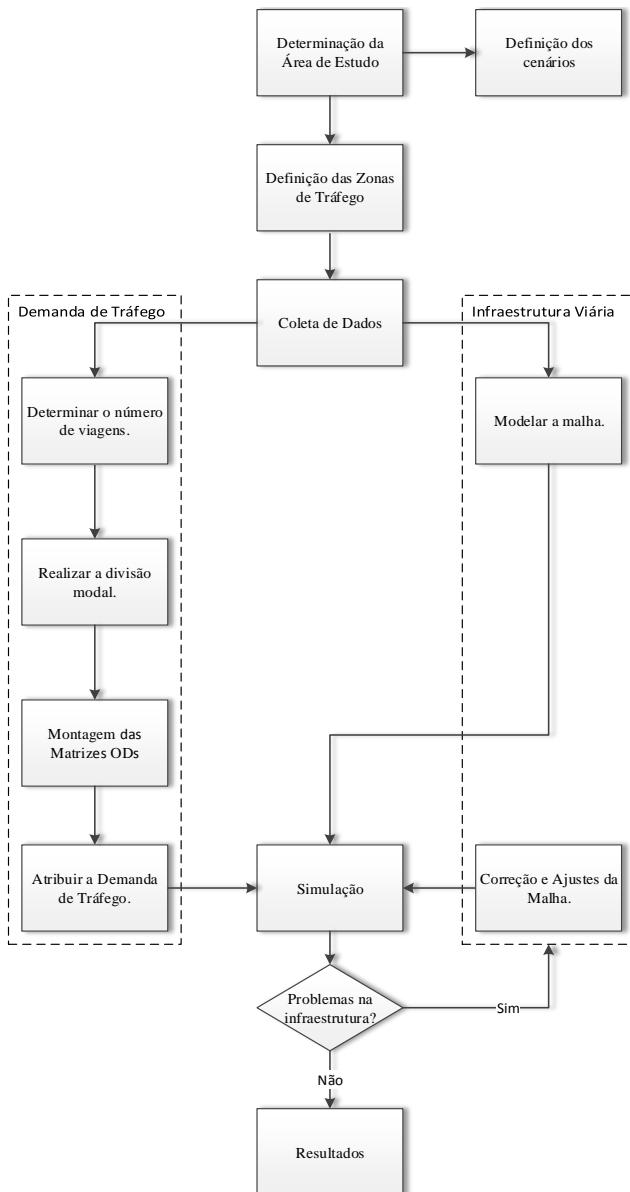
- O tamanho da população em risco, que deve ser evacuada;
- O volume de tráfego gerado pela evacuação.
- As condições da rede viária e rotas possíveis de serem utilizadas.
- A identificação de pontos de estrangulamento ao longo das rotas de evacuação.

O método baseia-se na literatura e é implantado com o uso de microssimulação de tráfego, no sentido de facilitar a determinação das melhores rotas e estimar o tempo de evacuação das zonas de risco.

Uma vez simulados os cenários previstos, para a evacuação é possível verificar quais as ações capazes de afetar o tempo despendido com o deslocamento da população. A identificação dessas ações devem colaborar na elaboração do plano, a fim de, por exemplo, indicar quais vias devem ser bloqueadas, ou ter seu sentido, ou sinalização, modificado.

Para o emprego da simulação de tráfego, uma série de procedimentos precisa ser realizada. O método sugerido considera esses procedimentos através da aplicação das etapas apresentadas na Figura 9.

Figura 9 – Fluxograma das etapas do método proposto



Fonte: Dados do autor (2014)



As etapas esquematizadas no fluxograma da Figura 9 estão descritas nas seções a seguir, que detalham o método proposto. Importante ressaltar que para melhor compreensão do funcionamento do modelo e a forma de executar essas etapas, além da descrição a seguir, a aplicação das mesmas se encontra descrita por meio de um exemplo, considerando uma situação hipotética, no capítulo 5.

#### 4.1 DETERMINAR A ÁREA DE ESTUDO

O primeiro passo é a determinação da área de estudo. Para a evacuação, são observados primeiramente os raios de 3 e de 5 quilômetros no entorno da usina nuclear. Esses raios compõem as Zonas de Planejamento de Emergência (ZPE) 3 e 5, respectivamente. Elas representam a área de risco que deverá ser evacuada, diante uma situação de emergência.

A área de estudo do plano de evacuação considera, além das ZPEs 3 e 5, os locais de abrigos que se encontram mais afastados da usina, situados em um ambiente onde o risco de contaminação seja muito pequeno. Isso porque a pluma responsável pela contaminação nuclear se comporta como uma poeira e tende a se depositar em regiões próximas do local do vazamento.

As distâncias e os parâmetros internacionais de determinação das ZPEs dão embasamento para a delimitação da área de estudo. O posicionamento dos abrigos visa facilitar o deslocamento da população da área de risco até os mesmos. Por conseguinte, nesta fase é considerada a localização dos abrigos, dos pontos de encontro e das vilas residenciais dos funcionários, que também podem ser chamadas de vila de moradores.

Durante a determinação da área de estudo, precisam ser observadas as características da malha, como a infraestrutura, a organização espacial, a capacidade das vias e dos abrigos. É importante analisar o mapa do local com a infraestrutura existente, a fim de observar a melhor localização para os pontos de encontro, os abrigos, as vilas residenciais, além de verificar a possível existência de algum PGV.

#### 4.2 DEFINIR OS CENÁRIOS

A simulação de diferentes cenários permite a avaliar o comportamento do tráfego mediante diferentes situações. Além da simulação para variados períodos do dia, também podem ser averiguadas mudanças no tempo (presente/futuro), mudanças no volume

de tráfego e possíveis incidentes. Isso possibilita averiguar de várias formas a situação da área estudada, antes de uma real intervenção no volume de tráfego ou na infraestrutura (PORTUGAL, 2005).

Para a elaboração de um plano de evacuação, buscou-se simular o pior cenário, ou seja, aquele em que é necessário ser evacuado o maior número de pessoas, das áreas de risco. Como uma emergência nuclear ocorre de forma gradativa, o primeiro cenário considera a evacuação de toda a população residente na ZPE 3 e, posteriormente, a evacuação de toda a ZPE 5.

Para cada uma das ZPEs, são simulados dois cenários, um que represente a situação atual e outro, a situação futura. O cenário da situação futura visa representar como o tráfego irá se comportar no longo prazo, caso nenhuma melhoria ou intervenção seja realizada, dentro de dez anos.

#### 4.3 DEFINIR AS ZONAS DE TRÁFEGO

Para determinar as Zonas de Tráfego (ZTs), bem como a localização de cada centroide, que as representam, são observadas variáveis como o desenvolvimento econômico, o uso e a ocupação do solo da área em análise. Portanto, as ZTs são determinadas de acordo com as características geográficas e socioeconômicas da região.

Com relação aos centroides, a sua definição se dá de acordo com as características da ZT que ele representa, sendo considerado o número de viagens gerada e/ou atraída pela referida zona. A localização dos centroides depende também da forma como a infraestrutura da malha está modelada naquela ZT, bem como da forma como a quantidade de viagens está distribuída nela.

Percebe-se então, que a definição das zonas de tráfego influencia tanto na modelagem da demanda de tráfego, como na modelagem de infraestrutura. De modo geral, para a determinação das zonas de tráfego, no Brasil, são utilizadas as mesmas subdivisões político-regionais adotadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), tais como: estados, municípios, distritos, bairros, setores censitários, entre outros, escolhidos de acordo com a necessidade do estudo e disponibilidade dos dados.

#### 4.4 COLETAR OS DADOS

Essa etapa consiste no levantamento dos dados dos sistemas de transportes, os socioeconômicos e os de uso e ocupação do solo. Para

melhor operacionalização a presente etapa ela foi dividida em duas partes, uma considera o levantamento dos dados de demanda de tráfego e a outra se refere aos dados de infraestrutura da malha viária.

Os dados socioeconômicos auxiliam na definição da modelagem de demanda de tráfego, pois são capazes de explicar o comportamento de algumas movimentações de origem e destino, são exemplos destes dados:

- população;
- densidade demográfica;
- distribuição etária;
- número de domicílios;
- renda;
- frota;
- consumo de energia elétrica;
- número de estabelecimentos comerciais.

A demanda de tráfego depende do fluxo de veículos e visa encontrar o número de viagens das zonas de tráfego. Esse número pode ser estimado através do auxílio de variáveis como as mencionadas anteriormente, aliadas aos modelos e às ferramentas estatísticas, ou através de contagens volumétricas de tráfego.

Os dados referentes à infraestrutura de transporte observam características físicas nos arredores da localização da usina. Para o levantamento desses dados, são considerados aspectos da malha viária, a existência de transporte público e seus pontos de paradas, a capacidade do sistema viário, os limites de velocidades, as regras de trânsito, a sinalização, o relevo, entre outros.

#### **4.4.1 Modelar a demanda de tráfego**

A modelagem da demanda de tráfego é feita a partir do levantamento dos dados capazes de estimar número de viagens existente entre as zonas de tráfego (ZT). Informação essa que é primordial para a montagem das matrizes de origem e destino (O/D). Os dados necessários à estimação do número de viagens são coletados e trabalhados, de acordo com as subdivisões adotadas no zoneamento.

A geração de viagens abrange a determinação do número do tráfego produzido ou atraído por cada ZT. Sendo que, o tráfego produzido é constituído por viagens que se originam em uma

determinada ZT, enquanto que, o atraído são as viagens que se destinam à dada ZT, por unidade de tempo (PORTUGAL; GOLDNER, 2003).

Ortúzar e Willumsen (2001) citam alguns fatores socioeconômicos que influenciam na produção de viagens, como: renda, propriedade de automóvel, estrutura do domicílio, tamanho da família, valor do solo, densidade residencial, acessibilidade, entre outros. Como dados que atraem viagens, os mesmos citam: o número de empregos ofertados, o nível de atividade comercial e o número de matrículas escolares.

Para estimar a geração de viagens é comum o uso de métodos causais, consta em Souza e D'Agosto (2013), o emprego de taxas de crescimento ou regressão (linear ou não), em que a geração de viagens é função do uso do solo e de aspectos socioeconômicos. Em suma, a definição de que dados serão utilizados depende da forma de cálculo ou de modelagem escolhida, que melhor represente o número de viagens geradas, de acordo com as especificidades do estudo.

Para a modelagem da demanda de tráfego, no caso dessa pesquisa, são consideradas ações prévias à evacuação da usina nuclear, como o controle do tráfego, que objetiva isolar a área de risco (RIO DE JANEIRO, 2013). Sendo assim, no caso deste estudo, conclui-se que o maior número de viagens possíveis geradas por cada ZT é o número máximo de veículos existentes nela, visto que não haverá tráfego de passagem.

#### 4.4.1.1 Estimar o número de viagens

Na estimativa das viagens geradas pelas zonas de tráfego, considera-se o número de automóveis existentes em cada ZT. Tendo conhecimento do número de moradores e também da quantidade de residências da ZT é possível estimar um valor médio de ocupação de pessoas por automóvel.

Para tanto, adota-se a premissa de que há um automóvel por domicílio. Trata-se de simplificação, tomada a partir da observação dos dados censitários do IBGE e da frota do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN).

Além das viagens geradas pelos automóveis, precisam ser observadas as viagens geradas pelo transporte público, que implicam no número de ônibus necessários para evacuação. Para estimar essas viagens, são observadas as pessoas que não possuem carro.

A estimativa do número de pessoas sem automóvel se baseia na ocupação média de pessoas por carro, em cada zona de tráfego. Esse

valor é alcançado através da diferença entre o número total da população da ZT e a multiplicação da ocupação média pelo número de carros da ZT.

A existência de um polo gerador de viagem (PGV), de modo geral, provoca grande movimentação de tráfego. Logo, as viagens geradas pela usina nuclear precisam ser estimadas separadamente. Assim a usina é considerada como em uma ZT em que há geração apenas de viagens relacionadas a ela, para estimar essas viagens, observa-se o número de funcionários por turno (RIO DE JANEIRO, 2013).

O número de ônibus disponíveis e utilizados no transporte dos funcionários é um dado que deve ser coletado junto à usina nuclear. Bem como as porcentagens de funcionários que usam veículo próprio e dos que estão em férias. Busca-se basicamente estimar o total máximo de veículos que podem sair da usina, por turno.

A quantidade de viagens geradas por cada zona de tráfego é fundamental para a montagem das matrizes O/D. Como o cálculo do número de viagens geradas por automóveis e por ônibus é realizado separadamente, sendo possível gerar uma matriz O/D para cada um destes tipos de veículos, executando assim a divisão modal juntamente na etapa de montagem da matriz O/D.

A metodologia de cálculo utilizada para estimar o número de veículos de cada zona de tráfego é a mesma que foi desenvolvida no Produto 7 do Estudo para Melhoria da Trafegabilidade, Segurança e Monitoramento Rodoviário da BR 101, realizado pelo LabTrans para a Eletronuclear. A explicação de como esses cálculos foram realizados pode ser averiguada na seção 5.4.1.

#### **4.4.2 Modelar a infraestrutura**

Na modelagem da infraestrutura é importante observar os detalhes da malha viária presente na área de estudo, ferramentas como *Open Street Map* (OSM), *Google Earth*, *Google Street View* e o plano diretor municipal muito podem auxiliar nessa etapa. Para as regras de trânsito e sinalização, a legislação vigente deve ser consultada, no caso do Brasil o Código Brasileiro de Trânsito.

Os principais elementos existentes na malha viária precisam ser representados no modelo, tais como: sentido dos fluxos, possibilidade e impossibilidade de conversão, limites de velocidade, dentre outros fatores que dependerão das características da malha e dos objetivos do estudo. Por exemplo, além da sinalização e das regras de trânsito, é

importante observar o tempo e sequenciamento dos semáforos, caso eles existam.

Na fase de coleta de dados, tanto para a modelagem de tráfego como para estimar a demanda de tráfego, é essencial fazer uso de fontes legítimas tais como o IBGE, as prefeituras municipais e os Planos Diretores Rodoviários. Há casos em que as variáveis mencionadas não são encontradas no nível das zonas de tráfego, de modo que pesquisas complementares precisem ser efetuadas.

#### 4.5 MONTAR AS MATRIZES O/D

Ortúzar e Willumsen (2001) descrevem simplificarmente que, para a criação da matriz O/D, deve ser considerado o número de viagens (T) entre as zonas de tráfego (em que origens são  $i$  e destinos são  $j$ ). Então, são tomados como base os resultados obtidos na etapa de geração de viagens. Este número é representado por  $T_{ij}$ , que significa a quantidade de viagens existente entre a zona de origem  $i$  e a zona de destino  $j$ .

Isso significa que, cada célula ( $i, j$ ) da matriz O/D se refere a um par O/D, formado entre duas zonas de tráfego, que representa o número de viagens existe entre essas zonas. Como as zonas de tráfego são representadas por centroides, as viagens ocorrem de centroide ( $i$ ) a centroide ( $j$ ).

Há possibilidade de ser montada uma ou mais matrizes para cada cenário, visto que a quantidade de viagens já foi estimada, considerando os diferentes modais, de modo que a matriz O/D de automóveis é uma e a de transporte público é outra, consolidado a divisão modal.

Para cada matriz O/D criada no sistema, é determinado o tipo de veículo, que tem a quantidade de viagens representada por ela, como, por exemplo, carro ou ônibus. Na montagem da matriz, é definido também o horário de simulação e a duração da simulação, considerados os cenários a serem simulados. É importante destacar que esses parâmetros podem ser editados, conforme objetivos do estudo (TSS, 2013).

São as informações contidas na matriz O/D que dão subsídio para a atribuição da demanda de tráfego no sistema de microssimulação, ou seja, a demanda de tráfego para cada cenário se comporta conforme o intervalo de tempo e tipo de veículos contidos nas matrizes que as compõem. A atribuição da demanda é descrita na próxima seção.

#### 4.6 ATRIBUIR UMA DEMANDA DE TRÁFEGO

Para que seja simulado, é necessário atribuir a cada cenário uma demanda de tráfego. A demanda de tráfego é composta por uma ou mais matrizes O/D, criadas de acordo com a etapa de montagem das matrizes. Vale mencionar, que a demanda de tráfego pode ser formada por matrizes O/D ou por estados de tráfego. A proposta deste modelo considera a atribuição da demanda através da utilização de uma matriz O/D para automóveis e outra para ônibus.

A demanda de tráfego, em cada um dos cenários considerados, é formada por uma matriz O/D para carros de passeio e outra para ônibus, ou seja, de transporte coletivo. Contudo, é possível que mais matrizes sejam adicionadas na composição das demandas de tráfego.

O intervalo de tempo da simulação depende da quantidade de matrizes ou estados de tráfego que são adicionados à composição da demanda, de dado cenário, e do intervalo de tempo das matrizes ou dos estados de tráfego utilizados. Portanto, esta etapa possui um resumo com o número do total de viagens por matriz O/D, considerando o intervalo de tempo da demanda do cenário simulado.

#### 4.7 EXECUTAR A SIMULAÇÃO

O processo de simulação considera separadamente os diferentes cenários determinados nas etapas iniciais do método. Para realizar a simulação é necessário observar as características do *software* utilizado, no caso deste estudo o Aimsun 8. Sendo assim, um evento é criado representando cada um dos cenários que se deseja simular, a partir deste evento é rodada uma ou mais replicações, que consistem em microssimulações de tráfego, com resultados estocásticos.

Portanto os cenários de microssimulação de tráfego são simulados através de replicações, cada replicação busca representar a aleatoriedade de um evento. De modo que, é importante considerar mais de uma replicação para cada cenário, no sentido de alcançar resultados mais representativos, para tanto é possível realizar a média das replicações (TSS, 2013).

Diante de uma situação emergencial, em que seja necessária a evacuação da área, os veículos saem de suas origens ao mesmo tempo. Assim, o modelo de geração de tráfego para este tipo de microssimulação é o “ASAP”, em que os veículos são inseridos na malha de forma instantânea. Para o caso deste estudo, o modelo de tráfego é definido globalmente.

### 4.7.1 Ajustes

Ao realizar a simulação é possível a verificação de algum tipo de problema de infraestrutura na malha, que possa vir a prejudicar os resultados oriundos da replicação. Quando identificado algum tipo de problema, a modelagem da malha precisa ser examinada novamente, ajustada e corrigida até que todos os problemas sejam corrigidos e seja possível alcançar os resultados pretendidos.

Erros na modelagem da malha como seções soltas, final de seção desconexo a algum centroide, ou conectado a mais de um centroide e velocidades não compatíveis, podem impedir que a simulação ocorra, ou até mesmo que gere resultados inconsistentes. Evidenciando a importância da realização de correção e ajustes.

Reparados os problemas identificados na malha, a execução das replicações permite verificar os pontos de gargalo, as formações de filas, os cruzamentos problemáticos, dentre outras características da malha viária e do comportamento do fluxo de tráfego. O que pode gerar a necessidade de novos ajustes na malha, tais como mudanças de sentido, possibilidade de conversão, de sinais de preferência, entre outros capazes de facilitar a fluidez do tráfego.

Uma vez realizados esses ajustes, a nova situação deve ser verificada através de outra simulação. Logo, quando realizadas as melhorias e mudanças oportunas para o plano, a simulação precisa ser realizada novamente, a fim de averiguar se o nível de eficiência desejado foi alcançado.

## 4.8 ANALISAR RESULTADOS

A partir das simulações para a evacuação das áreas de risco, é possível estimar o tempo necessário para que as pessoas deixem esta área, bem como o tempo que despendem para chegarem aos abrigos. Diante dessas informações é constatada a eficiência, ou não, do plano de evacuação. Haja vista, que se busca a menor exposição das pessoas, evitando a contaminação das mesmas.

Os planos de evacuação precisam ser testados e aprimorados regularmente, o procedimento de simulação facilita a observação do comportamento futuro do tráfego, bem como de melhorias propostas. Sendo, portanto, capaz de analisar cenários atuais e futuros, mantendo os planos atualizados.

Em suma, como resultados, buscou-se o tempo total de evacuação, o que pode averiguado em cada uma das situações propostas



nos diferentes cenários, para que todos os veículos deixem as zonas de risco. Além do tempo necessário para a chegada dos veículos aos locais de abrigo, que também pode ser verificado a partir de cada cenário.

A estimativa desses tempos ocorre com a utilização de detectores implantados nos limites das zonas de risco e nos acessos aos abrigos e às vilas residenciais. Mediante resultados como esses é possível definir tempos e medidas de segurança para a evacuação dos funcionários e da população situados nas áreas de risco. Além de propor e inclusive simular melhorias na infraestrutura.



## 5 APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Tomou-se como exemplo para aplicação do método a implementação de uma usina nuclear hipotética em determinada área. Foi considerada uma área real, com características semelhantes a da localização da usina nuclear de Angra dos Reis, como baixa urbanização e a proximidade de uma importante rodovia com capacidade para a evacuação da população.

Isso possibilitou a utilização de dados reais para a aplicação do método. As seções deste capítulo descrevem as etapas do método proposto através de um exemplo de execução do referido método.

### 5.1 ÁREA DE ESTUDO

Existem diversos fatores para a instalação de uma usina nuclear, envolvidos na escolha do local ideal. No sentido de atingir o objetivo deste estudo, buscou-se a simplificação desses fatores e não foram consideradas todas as variáveis necessárias para a real instalação de uma usina nuclear, visto que o método pode ser utilizado também para uma usina nuclear já existente.

Assim, levou-se em conta apenas a existência de uma área plana e não urbanizada, a proximidade de uma rodovia e a existência de água nas proximidades onde estaria a usina. Foram também observados aspectos como a ocupação do solo e a existência de algum PGV no entorno da usina.

A determinação da área de estudo parte da localização da usina e então são observados primeiramente os raios de três e cinco quilômetros em volta da mesma. Esses raios constituem as Zonas de Planejamento Emergencial (ZPE 3 e ZPE 5), áreas consideradas de risco e que precisam ser evacuadas no caso de uma emergência. Dentro desses raios, precisam ser determinados os pontos de encontro para a população, que será evacuada através de transporte público.

Além disso, é preciso averiguar os locais para onde a população situada dentro da área de risco poderá se dirigir, no caso de acionado o plano de evacuação. Trata-se dos abrigos, os quais devem estar situados em uma área segura, com relação a cada ZPE a ser evacuada.

Na ZPE 5 além dos pontos de encontro, podem também estar localizados os abrigos para os desalojados da ZPE 3, visto que esta é a primeira ZPE a ser evacuada. A Figura 10 apresenta a localização dos

pontos de encontro, dos abrigos e das vilas residenciais, referentes à evacuação da ZPE 3. Nela, a partir da observação do ponto que faz referência à localização da usina, é possível notar a área de estudo.

Figura 10 – Pontos de encontro, abrigos e vilas residenciais: ZPE 3



Fonte: Google *Earth* e IBGE (2014).

Na Figura 10, a usina nuclear é representada por um marcador no centro dos dois raios, sendo que o menor é a ZPE 3 e o maior é a ZPE 5. As vilas residenciais são representadas pelos marcadores denominados “Vila de Moradores” 1 e 2, enquanto que os marcadores Ab1.1 e Ab1.2 são os abrigos destinados a população da ZPE 3, que tem seus pontos de encontro identificados pelos marcadores PE1, PE2 e PE3, disponíveis à população que usará o transporte público, para seu deslocamento no momento de deixarem a área de risco.

A população localizada ao norte da usina deve seguir para o abrigo Ab1.1, enquanto que, a população situada ao sul da usina deve se destinar ao abrigo Ab1.2. Os funcionários, que estiverem trabalhando na usina, deverão se dirigirem para suas residências, localizadas nas vilas de moradores.

Diante da localização das vilas residenciais dos funcionários, os abrigos e os pontos de encontro, para a utilização de transporte público, os pares de origem e destino já podem ser determinados para a ZPE 3. Ponderando a respeito da quantidade de pessoas a serem evacuadas, a localização dos abrigos e a disponibilidade de infraestrutura para chegar nos mesmos, foram determinados os pares O/D para a evacuação da ZPE 3, conforme apresenta a Tabela 8.

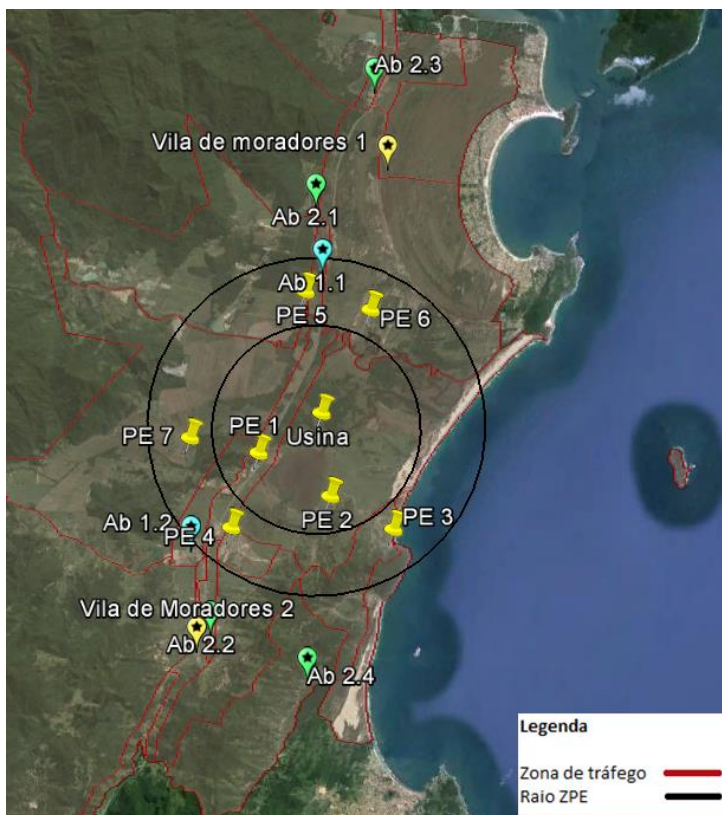
Tabela 8 – Pares O/D ZPE 3

<b>Origem</b>	<b>Destino</b>
PE1	Ab_1.2
PE2	Ab_1.2
PEU	Vila1 e Vila2
PE3	Ab_1.1

Fonte: Dados do autor (2014).

Realizou-se a mesma análise, considerando os abrigos e os pontos de encontro, para a evacuação da ZPE 5. A identificação desses locais pode ser observada através dos marcadores apresentados na Figura11.

Figura 11 – Pontos de encontro, abrigos e vilas residenciais: ZPE 5



Fonte: Google Earth e IBGE (2014).

A Figura 11 demonstra, além de elementos como a usina e as vilas de moradores já descritas na Figura 10, os pontos de encontro PE 3, PE 4, PE 5 e PE 6, bem como os abrigos: Ab2.1, Ab2.2, Ab2.3 e Ab2.4. Ressalta-se que para a evacuação da ZPE 5, os abrigos Ab1.1 e Ab1.2 (locais de destino na evacuação da ZPE3), tornam-se pontos de encontro (origem).

Desse modo, os pares de origem e de destino para o planejamento da evacuação da ZPE 5 constam na Tabela 9.

Tabela 9 – Pares O/D ZPE 5

<b>Origem</b>	<b>Destino</b>
Ab_1.1	Ab_2.3
Ab_1.2	Ab_2.2
PE3	Ab_2.4
PE4	Ab_2.2
PE5	Ab_2.3
PE6	Ab_2.1

Fonte: Dados do autor (2014).

Nota-se que, durante a determinação da área de estudo, foi realizada a definição dos principais pares O/D, considerando os pontos de encontro, a usina, as vilas residenciais de funcionários e os abrigos – para cada ZPE a ser evacuada. Essa atividade auxilia diretamente na etapa de montagem da matriz O/D, detalhada em uma das próximas seções.

## 5.2 CENÁRIOS

Este estudo considera quatro cenários, que procuram representar a pior situação diante da necessidade de evacuação. Consistem em dois cenários para cada ZPE a ser evacuada (ZPE 3 e ZPE 5), sendo um para a situação atual e outro para a situação futura. Por conseguinte, os cenários a serem simulados são:

- Evacuação da ZPE 3, considerando todos os veículos existentes nas zonas de tráfego desta ZPE, sendo:
  - cenário 1 – ano de 2014, cenário atual;
  - cenário 2 – ano de 2024, cenário futuro.
- Evacuação da ZPE 5, considerando todos os veículos existentes nas zonas de tráfego desta ZPE, sendo:
  - cenário 3 – ano 2014, cenário atual;
  - cenário 4 – ano de 2024, cenário futuro.

O cenário atual permite a realização de ações convenientes e que podem ser tomadas de imediato, enquanto que o cenário futuro apresenta uma situação agravada pelo longo prazo, levando em conta o crescimento do tráfego e da população na ZPE 3 e na ZPE 5, sem considerar intervenções ou melhorias.

### 5.3 ZONAS DE TRÁFEGO

Foi considerada como zona de tráfego (ZT) a subdivisão de setores censitários, adotada pelo IBGE, para a realização do Censo 2010. Vale esclarecer que setor censitário é a menor unidade territorial, em que os dados do Censo podem ser coletados por uma pessoa responsável, o recenseador (IBGE, 2011).

O Censo Demográfico é tido como uma das pesquisas mais completas realizadas pelo IBGE. Essa pesquisa ocorre com a frequência de 10 anos e considera o universo de toda a população do país. Dentre os dados levantados pelo Censo, tem-se: número de domicílios, número de moradores, renda, faixa etária alfabetizada, entre outros possíveis de serem usados na modelagem da demanda de tráfego.

Os setores censitários foram adotados como zona de tráfego devido à facilidade de coleta de dados e também por conta de características como homogeneidade e tamanho. Além disso, através do IBGE é possível ter acesso a arquivos georreferenciados com a demarcação territorial dos setores censitários, o que facilita a visualização das zonas de tráfego na modelagem da infraestrutura.

É importante observar que o setor censitário pode mudar de um censo para outro. Então, quando usados dados de dois censos, o tamanho e a localização do setor censitário devem ser verificados, e, no caso de mudança, as devidas correspondências de dados precisam ser realizadas.

### 5.4 COLETA DE DADOS DE ENTRADA

A maior parte dos dados socioeconômicos foi levantada através do IBGE, dando subsídio à modelagem da demanda de tráfego, juntamente com os dados de frota do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN).

Com relação aos dados e à modelagem da infraestrutura, fez-se uso dos arquivos dos setores censitários georreferenciados, disponibilizados pelo IBGE, além de ferramentas como o Google *Earth* e Google *Street View*, que permitiram a visualização das características da malha.

Devido à grande diferença na forma de tratamento dos dados de infraestrutura viária e de demanda de tráfego, optou-se por descrevê-los separadamente nas seções a seguir.



### 5.4.1 Cálculo do número de viagens

O cálculo do número de viagens consiste basicamente na modelagem da demanda de tráfego. Para estimar o número de viagens considerando uma situação de emergência em uma usina nuclear, pondera-se que previamente à evacuação da população do entorno de uma usina, uma série de procedimentos precisem ser realizados, tais como os descritos no segundo capítulo deste estudo, na seção 2.4.1.

Dentre esses procedimentos, destaca-se que as sirenes devem ser acionadas alertando a população de uma situação de risco e preparando-a a respeito da iminente necessidade de evacuação. Nesse momento, o controle do tráfego precisa ser realizado, no sentido de isolar primeiramente a ZPE 3 e, no caso do agravamento da situação, também a ZPE 5.

Então, quando soar o alarme (através de sirenes estrategicamente localizadas) para que as pessoas de fato deixem suas casas, as viaturas responsáveis pelo controle do tráfego e os ônibus destinados ao transporte coletivo precisam estar devidamente posicionados. Além disso, as viaturas devem estar posicionadas nos locais de retorno da rodovia, impedindo que outros veículos entrem na zona de risco e os ônibus nos pontos de encontro, os quais estarão à disposição da população que não possui veículo próprio para o deslocamento até os abrigos.

Logo, o controle de tráfego deve ser feito anteriormente ao aviso das sirenes. A fim de que as pessoas evacuem a área de risco, esse controle precisa continuar sendo realizado durante a execução do plano. Diante disso, conclui-se que o número de viagens geradas pelas zonas de tráfego está diretamente relacionado aos veículos existentes e à quantidade de pessoas residentes nas zonas de tráfego. (LABTRANS, 2014)

Ocorre, contudo, que a frota de veículos é um dado por município, sendo que, assim, para alcançar o número de automóveis, por setor censitário, foram realizados diversos testes de regressão linear (simples e múltipla). Para tanto, foram observados dados como: o número de domicílios, o número de moradores, a renda e a quantidade de pessoas alfabetizadas na faixa etária de 18 a 80 anos, por setor censitário. (LABTRANS, 2014)

Essas variáveis foram consideradas como independentes, enquanto que a frota de veículos, disponível por município na base de dados do DENATRAN, foi considerada como a variável dependente. (LABTRANS, 2014)

Segundo Barbetta (2011), a regressão linear faz uso de uma série de observações de variáveis independentes, correlacionadas a uma série de observações da variável dependente, no sentido de explicar o comportamento desta. O modelo linear tenta basicamente encontrar a reta que passe o mais próximo possível dos pontos observados.

Essa reta pode ser representada por uma função de primeiro grau, chamada de reta de regressão ou equação de regressão, e tem sua representação estrutural dada pela Equação 4:

$$y = ax + b \quad (4)$$

Para verificar o quanto as alterações da variável dependente  $y$  podem ser explicadas por alterações da variável independente  $x$ , são analisados os resíduos. Eles consistem na diferença entre o valor observado e o valor pretendido pelo modelo. Os resíduos auxiliam na observação que garante o quão confiável é o modelo (BARBETTA, 2011).

A soma dos quadrados dos resíduos (SQT) é o numerador de uma estimativa para a variância da parte aleatória do modelo, que não leva em consideração a relação entre  $x$  e  $y$ . A soma dos quadrados devida ao erro aleatório (SQE) leva em conta apenas aquilo que a equação não soube explicar, assim, SQE deve ser menor que SQT, especialmente se a relação entre  $x$  e  $y$  for forte.

A soma dos quadrados da regressão (SQR) é a diferença entre as duas somas descritas no parágrafo anterior ( $SQR = SQT - SQE$ ). A razão entre SQR e SQT é o coeficiente de determinação  $R^2$ , o qual é utilizado como medida descritiva da proporção da variação de  $y$  que pode ser explicada por  $x$ . O coeficiente  $R^2$ , representado na Equação 5, é também conhecido como coeficiente  $r$  de Pearson (BARBETTA, 2011).

$$R^2 = \frac{SQR}{SQT} = \frac{\text{variação explicada}}{\text{variação total}} \quad (5)$$

Outra medida usada para avaliar a confiabilidade do modelo de regressão é o desvio padrão, que considera a variabilidade da parte aleatória. Quanto menor o desvio padrão, melhor o ajuste. Tal desvio padrão pode ser estimado através da Equação 6 (BARNETTA, 2011):

$$S_e = \sqrt{\frac{SQE}{n-2}} \quad (6)$$

Foram realizados testes de regressão linear simples e multivariada, sendo verificadas as correlações entre as variáveis independentes: domicílio, renda e alfabetizados na faixa etária de 18 a 80 anos e a variável dependente, frota. Foram feitos testes multivariados com as três variáveis independentes e também com a combinação delas duas a duas. Realizaram-se também testes de regressão linear simples com cada variável independente, de forma separada.

Por meio da observação dos resíduos e do coeficiente de correlação linear, identificou-se que a variável que melhor explica o comportamento da frota de veículos foi a renda, através de uma regressão linear simples. Os resultados alcançados para essa regressão constam nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 – Resultados da análise de regressão pelo Excel – estatística de regressão

<b>Estatística de regressão</b>	
<b>R múltiplo</b>	0,965658784
<b>R-Quadrado</b>	0,932496886
<b>R-quadrado ajustado</b>	0,932264917
<b>Erro padrão</b>	4982,270835
<b>Observações</b>	293

Fonte: Dados do autor (2014).

Nota-se que o coeficiente de regressão  $R^2$  teve boa representatividade, ou seja, a variável independente consegue representar 93% da variável dependente, restando apenas 7% que é explicado pelas demais variáveis. Para este teste, contou-se com uma amostra de 293 observações. Na Tabela 11 é possível observar os parâmetros alcançados pela mesma regressão linear.

Tabela 11 – Resultados da análise de regressão pelo Excel: coeficientes e erro padrão

	<b>Coefficientes</b>	<b>Erro padrão</b>
<b>Interseção</b>	31,01842421	309,8394795
<b>Renda</b>	0,175197157	0,002763241

Fonte: Dados do autor (2014).

Na primeira coluna da Tabela 11, constam os coeficientes, de modo que, através desses resultados, a Equação 7 foi obtida para o modelo:

$$y = 0,1752x + 31,0184 \quad (7)$$

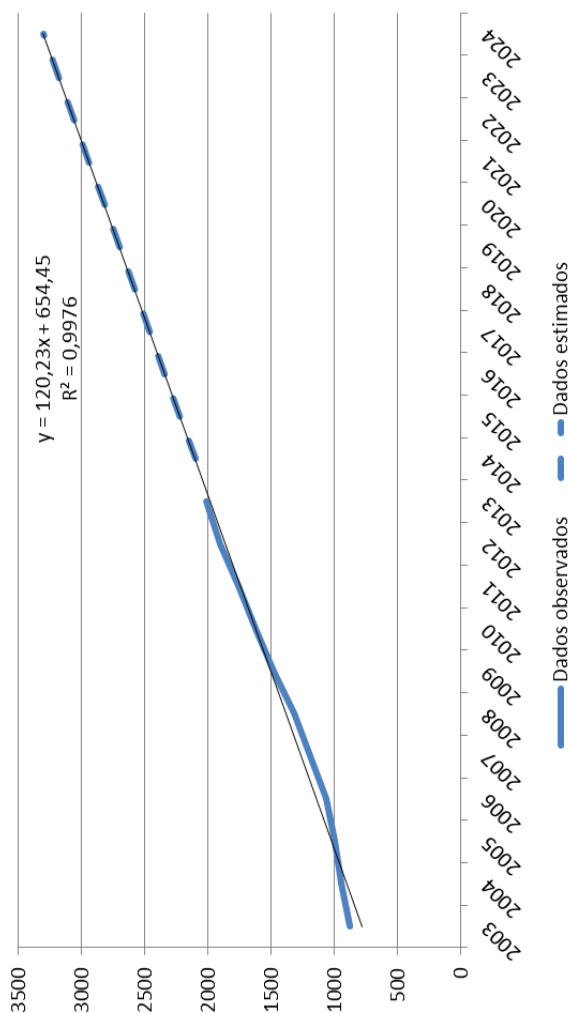
Em que  $x$  representa a renda e  $y$  o valor estimado de automóveis por setor censitário (zona de tráfego), ou seja, para uma renda  $x$  em dado setor censitário, haverá uma determinada frota  $y$ .

A frota de automóveis por ZT, encontrada a partir da Equação 7, foi ajustada considerando a diferença existente entre os valores estimados e os reais, disponíveis por município. Constatou-se que o número de automóveis obtido através do modelo é, em média, 15% inferior ao dado real, disponibilizado pelo DENATRAN. Sendo assim, o número de veículos estimado para cada ZT teve seu valor ajustado em 15% a mais.

A estimativa do número de automóveis por ZT utilizou dados do censo de 2010. Por conseguinte, foi necessário realizar a projeção desses dados para o ano de 2014, no que diz respeito ao cenário atual, e para o ano de 2024, considerando o cenário futuro.

Para realizar essa projeção, levou-se em conta o ajustamento linear baseado na evolução da frota do município, onde estaria localizada a usina. Foi observado o período de 2003 a 2013, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Frota observada e estimada para o cenário futuro



Fonte: Dados do autor (2014).

Através da projeção linear apresentada na Figura 19, foi possível mensurar os fatores de crescimento da série, os quais foram usados para projetar o número de veículos, por setor censitário, tanto para o ano de 2014, como para o de 2024.

Utilizou-se o ano de 2010 como ano base para o cálculo desses fatores, demonstrados na Tabela 12.

Tabela 12 – Fatores de crescimento da frota municipal

<b>Ano</b>	<b>Frota Municipal</b>	<b>Crescimento (base 2010)</b>
2010	1.623	-
2014	2.097	29,22%
2024	3.299	103,29%

Fonte: Dados do autor (2014).

Os fatores de crescimento da Tabela 12 foram aplicados ao número de automóveis estimados para os setores censitários, com base no ano de 2010, de modo que se alcançou o número de automóveis para os anos de 2014 e 2024, estando esses dados descritos na Tabela 13.

Tabela 13 – Número de automóveis por zona de tráfego

<b>Zona de Tráfego</b>	<b>2014</b>	<b>2024</b>
<b>1</b>	176	216
<b>2</b>	162	199
<b>3</b>	239	295
<b>4</b>	188	232
<b>5</b>	220	270
<b>6</b>	167	206
<b>7</b>	193	237
<b>8</b>	159	195
<b>9</b>	138	170
<b>10</b>	279	421

Fonte: Dados do autor (2014).

É importante ressaltar que a zona de tráfego 10 representa a ZT onde está situada a usina nuclear. Foi criada uma ZT específica para a usina, pois a forma de cálculo do número de viagens geradas por ela é diferente das demais zonas de tráfego. Por ser um PGV, considerou-se o número de funcionários da usina para estimar o número de viagens geradas por ela.

Por se tratar de uma usina hipotética, tomaram-se como base os dados dos funcionários da Eletrobras Eletronuclear, disponíveis no relatório de

gestão da Eletronuclear de 2012. Nesse relatório, consta o total de 2.783 funcionários que trabalham na central onde estão situadas as usinas Angra 1 e Angra 2. Nesse total de funcionários, não estão contabilizados os operários da obra de Angra 3, situada na mesma central e em construção na atualidade.

Ainda tomando o exemplo da Eletronuclear, com base nas informações do relatório, do total de funcionários, foi assumido que:

- 10% dos funcionários possuem carro próprio;
- 10% dos funcionários estão em férias;
- 10% representam os funcionários do turno da noite.

Subtraindo os percentuais dos funcionários em férias e daqueles que representam o turno da noite, chega-se ao número de 2.227 funcionários a serem evacuados. Essa quantidade de funcionários está dividida em dois turnos, visto que foram considerados os turnos da manhã ou da tarde pelo fato de haver maior número de funcionários trabalhando nesses períodos.

A partir das porcentagens assumidas, constata-se que o número de automóveis na ZT da usina é de 279, sendo este valor o número de automóveis que sairão da usina em caso de evacuação. Constatou-se que 1.948 funcionários necessitam de ônibus para seu deslocamento no momento da evacuação. Como essa quantidade de funcionários está dividida em dois turnos de trabalho (manhã e tarde), assume-se que um ônibus circular tenha capacidade para 60 pessoas, sendo necessários 17 ônibus para a evacuação do total de funcionários por turno.

No cálculo do número de ônibus necessários para a evacuação da população das demais zonas de tráfego, observou-se o número de domicílios e a quantidade de carros por zona de tráfego, no que foi adotado que há apenas um veículo por domicílio. Assim, subtraiu-se o número de domicílios do número de carros, para encontrar a quantidade de domicílios que não possuem carros. Essa quantidade de domicílios foi multiplicada pelo número médio de ocupação de domicílios.

Por falta de disponibilidade de dados, como séries históricas com observações suficientes para realizar regressões, fez-se a utilização dos dados disponíveis nos censos de 2000 e 2010, a fim de definir essa taxa de ocupação por domicílios. Não houve variação significativa entre os censos, de modo que foi utilizada a ocupação média por domicílio do último censo, estimada em três pessoas por domicílio.

Esse valor foi calculado – por meio da divisão da quantidade de pessoas pela quantidade de domicílios particulares permanentes –, de acordo com o setor censitário. A adoção dos dados do Censo de 2010 é

justificada também pelo fato de a proporção pessoas por domicílio ter diminuído de um censo para o outro, sendo que a diferença entre as proporções foi negativa em 0,46 pessoas por domicílio.

Assim, para estimar as viagens realizadas pelo transporte público, a taxa de ocupação por domicílio (no caso três) foi multiplicada pela quantidade de domicílios sem veículos. Chegou-se, então, a o número de pessoas sem veículo e que necessitam de transporte público.

Em seguida, a quantidade total de pessoas sem automóvel foi dividida por 60, valor assumido para a ocupação de um ônibus circular. A quantidade de ônibus que precisam estar disponíveis nos pontos de encontro de cada zona de tráfego está relacionada na Tabela 14, onde se considerou, no mínimo, um ônibus por zona de tráfego.

Tabela 14 – Número de ônibus zona de tráfego

<b>Zona de Tráfego</b>	<b>2014</b>	<b>2024</b>
<b>1</b>	5	4
<b>2</b>	4	3
<b>3</b>	1	1
<b>4</b>	1	1
<b>5</b>	3	1
<b>6</b>	2	1
<b>7</b>	2	1
<b>8</b>	1	1
<b>9</b>	1	1
<b>10</b>	17	14

Fonte: Dados do autor (2014).

É importante destacar que os dados de população são referentes ao ano em que foi realizado o último censo, ou seja, 2010, de maneira que também foi necessário projetar os dados desse ano para os anos de 2014 e 2024. Na projeção da população, fez-se uso da metodologia de estimativa da população de residentes de domicílios do IBGE (2011).

Trata-se do método de tendência de crescimento demográfico, tomado para estimar a população dos municípios. O método se baseia na subdivisão de uma área maior, cuja estimativa é conhecida, em  $n$  áreas menores, de tal forma que seja possível estimar a população dessas áreas menores em função da área maior (IBGE, 2011).



Para a projeção dos dados relacionados ao número de domicílios por setor, nenhuma metodologia foi identificada na literatura. Uma vez que este estudo não considera projeções mais robustas, foi adotado que a relação entre domicílios e pessoas não se alterou, como já mencionado.

Nota-se que, além disso, o número de viagens foi determinado considerando os tipos de veículos. Por conseguinte, a etapa de divisão modal já é considerada neste momento, o que permite que as matrizes O/D sejam montadas por tipo de veículo, em etapa posterior a esta.

Em suma, o número de viagens de cada zona de tráfego foi estimado como sendo o número de carros de cada setor, acrescido no número de ônibus necessários à evacuação de cada ZT. A zona de tráfego onde se encontra a usina é a que possui maior número de veículos, devido ao número de viagens geradas pelos funcionários que trabalham lá.

Destaca-se que na realização dos cálculos do número de viagens deste estudo foi realizado com o uso de uma regra adotada pelo IBGE, de que todo o número com vírgula deve ser arredondado para o número inteiro superior mais próximo.

#### **5.4.2 Modelagem da malha no Aimsun**

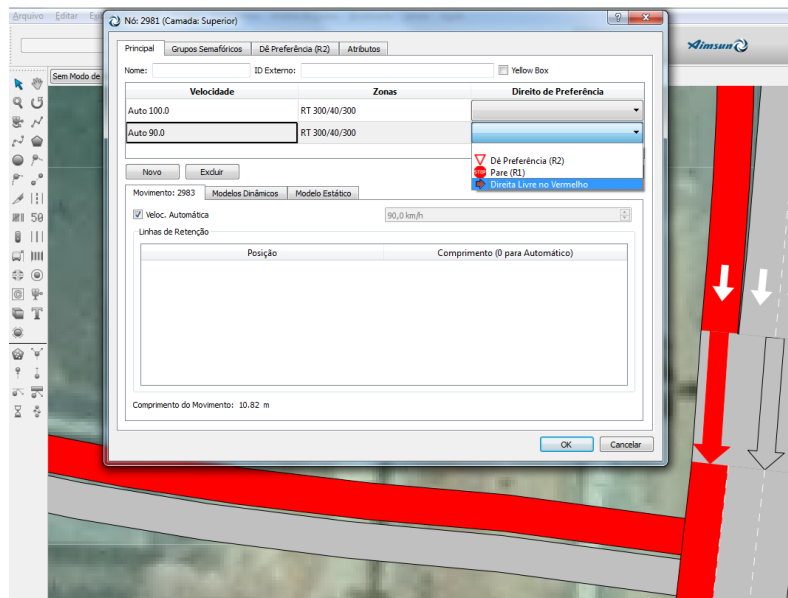
Para modelar a infraestrutura foram observadas as características da malha viária, considerando a área de estudo. Fez-se uso de ferramentas como o *Google Earth* e o *Google Street View*, softwares que auxiliaram na observação dos sentidos dos fluxos, existência de interseções, número de faixas e até mesmo características de uso e ocupação solo. Além disso, observou-se o Código de Trânsito Brasileiro (CTB) no que tange às regras de sinalização e à definição das vias de trânsito rápido, arteriais, coletoras e locais.

A malha foi modelada através do desenho de seções, interseções, faixas de aceleração e desaceleração, dentre outros elementos que compõem sua infraestrutura. Salienta-se que, cada seção possui características específicas como o tipo de via, o comprimento, a largura, o número de faixas, a velocidade e o sentido. Essas propriedades podem ser editadas, no sentido de melhor representarem a realidade da área de estudo.

A Figura 13 apresenta uma seção e a caixa de atributos referente a um nó, no qual esta seção está conectada, sendo que os nós existentes na malha representam as interseções. Cada nó possui uma caixa de atributos, na qual é possível editar características relacionadas aos movimentos da interseção, tais como o sentido do fluxo e os direitos de

preferência de passagem, identificados por meio da sinalização. Esta pode ser editada através da caixa de atributos também representada na Figura 13.

Figura 13 – Exemplo de edição de uma interseção no Aimsun

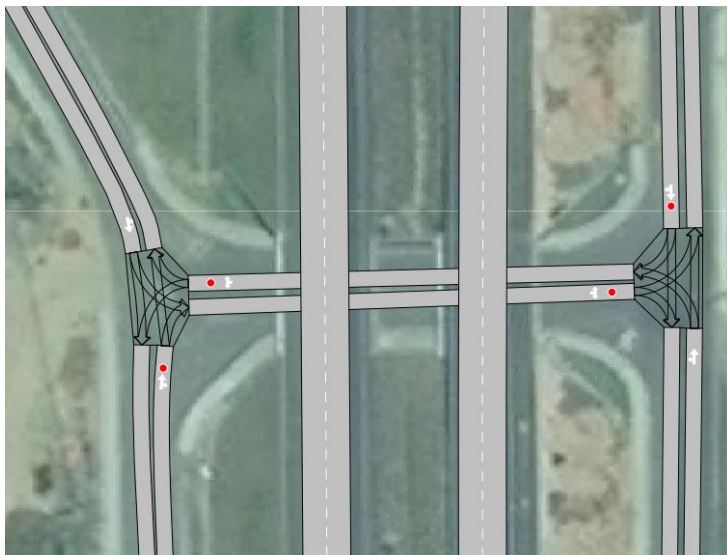


Fonte: Dados do autor (2014).

As vias podem ser modeladas conforme a necessidade do estudo, sendo capazes de representar a situação atual ou um cenário futuro, é possível a criação de mais de uma faixa, além disso, há possibilidade de editar a largura da faixa, o modo de conversão, o sentido e a velocidade, conforme as características mais próximas da realidade.

Na Figura 14, encontram-se selecionados dois nós, onde é possível notar a existência de diferentes movimentos de fluxos de tráfego. Esses nós representam duas interseções em nível, sendo que as seções ligadas a eles possuem pontos marcados em vermelho, os quais se referem à sinalização. Eles significam o sinal de “pare” para estas vias, dando prioridade de passagem às demais.

Figura 14 – Exemplo de modelagem de interseções

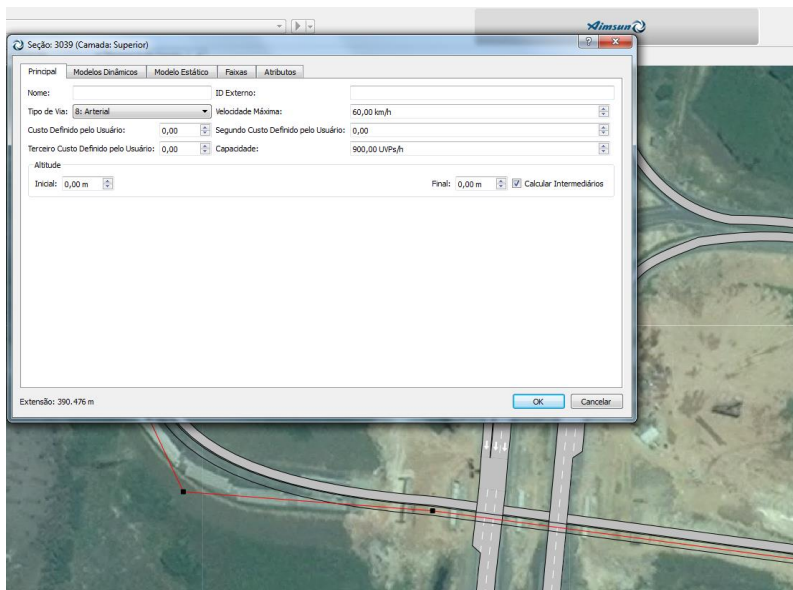


Fonte: Dados do autor (2014).

Ainda na Figura 14, visualiza-se um cruzamento em níveis diferentes e sem ramos, ou seja, quando não há trocas de fluxos de tráfego entre as rodovias que se interceptam. De acordo com DNIT (2005), designa-se passagem superior quando a rodovia principal passar sobre a via secundária e passagem inferior quando passar sob a via secundária.

Na sequência, a Figura 15 também apresenta uma interseção em níveis diferentes. No entanto, trata-se de uma interconexão, isto é, além do cruzamento em desnível, a interseção possui ramos que conduzem os veículos de uma via à outra, havendo troca de fluxos (DNIT, 2005).

Figura 15 – Caixa de atributos da seção em destaque

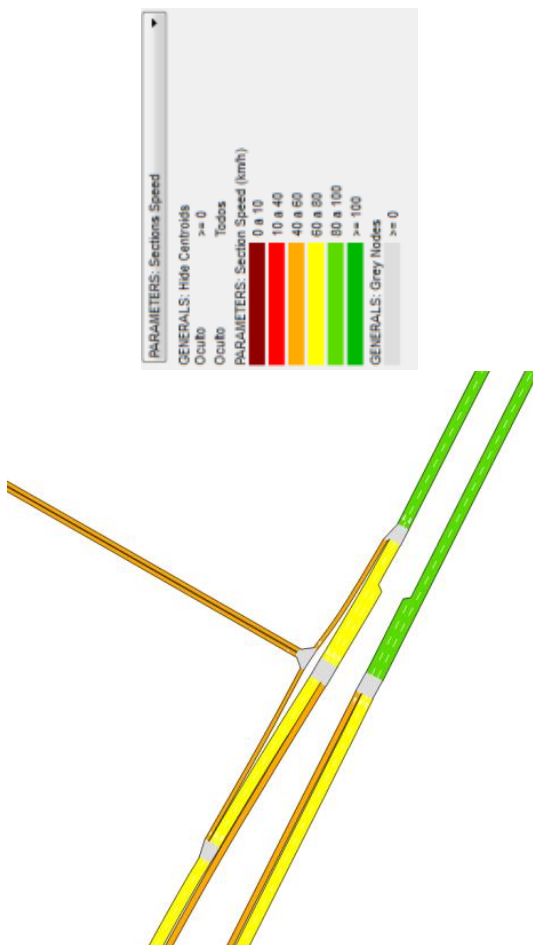


Fonte: Dados do autor (2014).

Consta também na Figura 15 a janela de atributos da seção contendo suas características, como o tipo de via, velocidade e capacidade. Ainda nesta figura, é possível observar os vértices de edição da seção em destaque, os quais auxiliam na modelagem de via, pois permitem realizar efeitos de curvas e retas, a fim de que a representação da infraestrutura se torne fidedigna à situação real.

Na Figura 16 está representado o modo de visualização da velocidade, que pode ser atribuída para cada seção, de acordo com a característica da via.

Figura 16 – Modo de visualização da velocidade, por seção



Fonte: Dados do autor (2014).

Uma vez desenhadas todas as seções e os nós existentes na malha, foram determinados os centroides do modelo. Cada centroeide representa a origem e/ou o destino dos veículos de cada zona de tráfego. Os centroides têm papel fundamental na simulação de tráfego, visto que é através deles que os veículos entram e saem da malha durante a simulação.

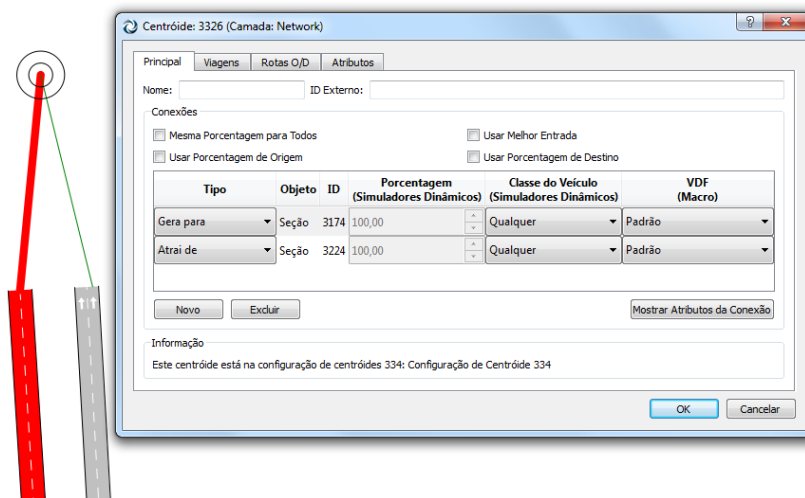
Cada centroeide pode ser ligado a quaisquer seções ou nós presentes no modelo. No entanto, para a definição dos centroides é

importante observar duas premissas fundamentais, como a existência de apenas um centroide para cada ZT e que, todo término de seção precisa estar conectado a um centroide, de modo que nenhuma seção possa estar desconexa, caso contrário não será possível realizar a simulação.

Para a localização do centroide em cada zona de tráfego, observa-se a necessidade de um centroide para cada ponto de encontro (origem), e outro para cada abrigo ou vila residencial (destino).

A Figura 17 apresenta um exemplo de definição de centroide, situado no final de uma seção. Na mesma figura, nota-se a caixa de atributos deste centroide, na qual é possível editar o percentual de viagens geradas e atraídas por ele.

Figura 17 – Definição do centroide ao final de uma seção, ao lado a caixa de edição com os atributos relacionados ao centroide



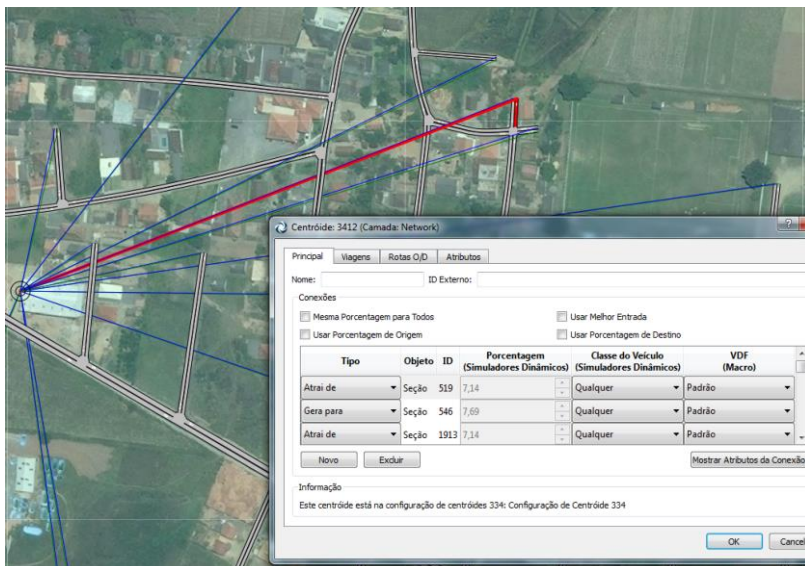
Fonte: Dados do autor (2014).

Durante a simulação de evacuação, os centroides que representam as zonas de tráfego da área de risco produzem viagens, já os que representam os abrigos atuam atraindo as viagens. A um centroide podem estar ligados mais de uma seção ou nó.

A Figura 18 está representado um exemplo de centroide no qual estão conectados todos os terminais de seções de uma zona de tráfego. Nessa figura, observa-se também a caixa de atributos do centroide, na qual se encontram relacionadas todas as seções conectadas a ele e que

podem ser editadas, com relação ao percentual de produção/atração de viagens.

Figura 18 – Exemplo de diversas seções conectadas a um centróide



Fonte: Dados do autor (2014).

Os centróides foram os pares O/D, que são representados através de células, com seu número de viagens na montagem das matrizes O/D. Após ser estimado o número de viagens e verificado os pares O/D, é possível realizar a etapa de montagem da matriz O/D, descrita na seção seguinte.

## 5.5 MATRIZ OD

A montagem da matriz OD é o momento em que o número de viagens é inserido ao sistema. Ele considera a quantidade de viagens existente entre os pares O/D, representados por células  $(i, j)$ , sendo origem  $(i)$  e destino  $(j)$ . Através das matrizes O/D todas as viagens estimadas podem ser inseridas no modelo.

Para cada matriz criada, foi considerado o tipo de veículo que a compõe e o horário referente ao cenário de simulação, bem como o tempo de duração máximo dessa simulação, por exemplo, de uma hora.

A Figura 19 apresenta a montagem de uma das matrizes O/D feitas neste estudo.

Figura 19 – Exemplo da matriz OD cenário 1

	3351	3377	3388	3389	3412	3413	3468	3739	3795	3798	Total
3351								150			300
3340										159	159
3389										138	138
3468						193					193
3798										790	790
Total					193		150		297		790

Fonte: Dados do autor (2014).

Na matriz O/D, é possível observar a quantidade de viagens entre os centroides de origem e de destino, bem como a soma das viagens de cada centroide, na coluna e na linha denominada total. Considerando os diferentes cenários a serem simulados, foram montadas oito matrizes O/D, pois existem quatro cenários. Para cada um dos cenários, foi necessária a montagem de uma matriz referente aos carros de passeio e outra referente aos ônibus.

## 5.6 ATRIBUIR DEMANDA DE TRÁFEGO AOS CENÁRIOS

A criação da demanda de tráfego ocorre através da agregação das diferentes matrizes O/Ds existentes para cada cenário. Como mencionado na etapa de montagem das matrizes, neste estudo foram usadas matrizes de carros de passeio e de ônibus, relativas às ZPE3 e ZPE5. Desse modo, foram montadas oito matrizes O/D e criadas quatro demandas de tráfego, referentes aos cenários simulados, conforme descrito a seguir.



- Cenário 1: evacuação da ZPE 3, ano de 2014, a demanda de tráfego é composta pelas matrizes O/D de carro e de ônibus, que consideram as viagens geradas entre as ZTs da ZPE3, referentes ao ano de 2014.
- Cenário 2: evacuação da ZPE 3, ano de 2024, a demanda de tráfego é composta pelas matrizes O/D de carro e de ônibus, que consideram as viagens geradas entre as ZTs da ZPE3, referentes ao ano de 2024.
- Cenário 3: evacuação da ZPE 5, ano de 2014, a demanda de tráfego é composta pelas matrizes O/D de carro e de ônibus, que consideram as viagens geradas entre as ZTs da ZPE5, referentes ao ano de 2014.
- Cenário 4: evacuação da ZPE 5, ano de 2024, a demanda de tráfego é composta pelas matrizes O/D de carro e de ônibus, que consideram as viagens geradas entre as ZTs da ZPE5, referentes ao ano de 2024.

Na demanda de tráfego, pode ser determinado o intervalo da distribuição dos veículos no tempo dentro do intervalo de tempo máximo definido para o cenário de simulação, conforme indicado na montagem da matriz O/D.

A Figura 20 apresenta o exemplo de criação de demanda de tráfego para o cenário 1.

Figura 20 – Exemplo demanda de tráfego para o Cenário 1

Principal Sumário Perfil

Nome: Demanda de Tráfego 4170 ID Externo:

Início: 08:00:00 Duração: 01:00:00 Tipo: Matrizes Fator: 100 %

	08:00:00	08:15:00	08:30:00	08:45:00	09:00:00
Car	ZPES car 2014 01:00 (100%)				01:00:00
Bus	ZPES bus 2014 01:00 (100%)				01:00:00

Adicionar Excluir

Ítem da Demanda Atual

Início: 00:00:00 Duração: 00:00:00 Fator: %

Entradas de Tráfego

Entradas de Tráfego: Nenhum

OK Cancelar

Fonte: Dados do autor (2014).

Na janela da demanda de tráfego, representada na Figura 21, é possível adicionar as matrizes O/D que compõem a demanda que está sendo criada. Além disso, observa-se nesta figura que o intervalo de tempo em que a demanda está distribuída na simulação é de uma hora. Esse intervalo pode ser editado dentro do limite estabelecido pelo tempo de simulação do cenário, que nesse caso é de uma hora.

## 5.7 SIMULAR OS CENÁRIOS

Nessa etapa, primeiramente precisam ser criados cenários dinâmicos no projeto, sendo a eles atribuídas as respectivas demandas de tráfego, o que ocorre através da criação de um experimento. Através deste experimento, é possível rodar uma ou mais replicações, por meio das quais é possível verificar e analisar os resultados da simulação.

A janela de edição do cenário possui várias pastas: na primeira constam os dados mais importantes (consiste basicamente no que vai ser simulado e na seleção da demanda de tráfego que representa aquele cenário). A Figura 21 apresenta o exemplo do editor de simulação para o cenário 1 deste estudo.

Figura 21 – Pasta principal da caixa de edição do Cenário 1

Fonte: Dados do autor (2014).

Cada replicação simulada apresenta um resultado diferente, visto que neste trabalho foram simuladas três replicações para cada cenário. Para a verificação dos tempos de evacuação e de chegada aos abrigos foi observada a média das três replicações.

Ao se executar uma replicação, é possível verificar o comportamento do fluxo de tráfego dentro da malha modelada e, desse modo, realizar ajustes e correções necessárias à infraestrutura da malha.

### 5.7.1 Ajustes e correção da malha

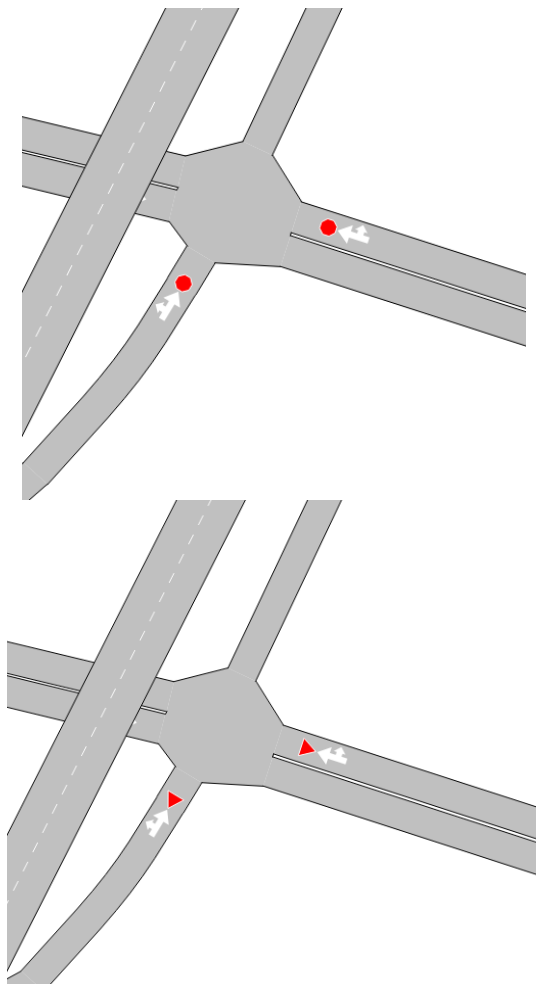
Quando executada a simulação, é possível testar a geometria da infraestrutura modelada, verificar a existência de algum impedimento do fluxo, possíveis inconsistência de velocidade, de sentido, ou de outro problema existente em seções e/ou nós.

Sempre que realizados os ajustes na malha, é preciso que as replicações sejam simuladas novamente, a fim de verificar os novos resultados provocados pelos ajustes. Portanto, correções e ajustes na malha são seguidos de uma nova simulação – trata-se de ações realizadas de forma cíclica, até que se alcancem os resultados pretendidos.

A Figura 22 apresenta um exemplo de interseção que teve sua sinalização modificada, a fim de proporcionar maior fluidez ao tráfego.

Na primeira simulação, os condutores necessitavam parar completamente os veículos para então seguirem, o que gerava filas, conforme verificado nas simulações. Observado isso, o sinal de “pare” foi modificado para o de “dê a preferência”, o que diminuiu o tempo de evacuação para os cenários simulados.

Figura 22 – Exemplo de ajuste



Fonte: Dados do autor (2014).

Durante a verificação da malha, foram observados se todos os finais de seção estavam conectados a um centroide, bem como a inexistência de seções desconexas e a existência de um centroide por zona de tráfego. Nesse caso, se algum erro do gênero existir, não é possível realizar a replicação da forma pretendida.

Outro ajuste necessário foi relacionado à configuração dos centroides, no que tange à distribuição das viagens nas seções conectadas a cada centroide. Verificou-se na simulação, que considera o algoritmo de caminhos mínimos, que as viagens geradas pelo centroide tendiam a utilizar apenas a seção de caminho mais curto. Logo, não correspondiam a situação real, sendo necessário realizar um ajuste para a uniformização de distribuição das viagens entre as seções.

Uma vez realizados os ajustes necessários, conforme os objetivos do trabalho, os resultados da simulação podem ser analisados, como consta na seção seguinte.

## 5.8 RESULTADOS

A partir da simulação dos cenários, o Aimsun disponibiliza diversas formas que permitem a análise dos resultados, como vídeos, gráficos, tabelas, representações temáticas da malha, entre outros. Assim, é necessário observar quais os objetivos pretendidos pela pesquisa, no sentido de identificar os *outputs* mais adequados para a análise.

Importante destacar que os gráficos gerados, que contém o tempo

Este trabalho propõe um método para elaborar um plano de evacuação. Para tanto, foram analisados os seguintes resultados: representações temáticas da malha, que exibem os locais com a identificação dos tempos de atraso; gráficos com os tempos de evacuação e gráficos com os tempos de chegada aos abrigos.

Através da simulação dos cenários que consideram a situação atual, tanto na ZPE 3 como na ZPE 5, percebeu-se o fluxo de veículos nos cenários atuais não apresentam graves problemas, como grandes congestionamentos. No entanto, ao observar o cenário futuro algumas seções apresentaram pontos críticos. Mas, ainda assim foi verificada pouca diferença entre as densidades de fluxo dos cenários atual e futuro.

Identificou-se que as seções com maior concentração de veículos estão localizadas próximas aos locais onde há maior concentração de malha urbana e perto dos pontos de encontro e dos abrigos.

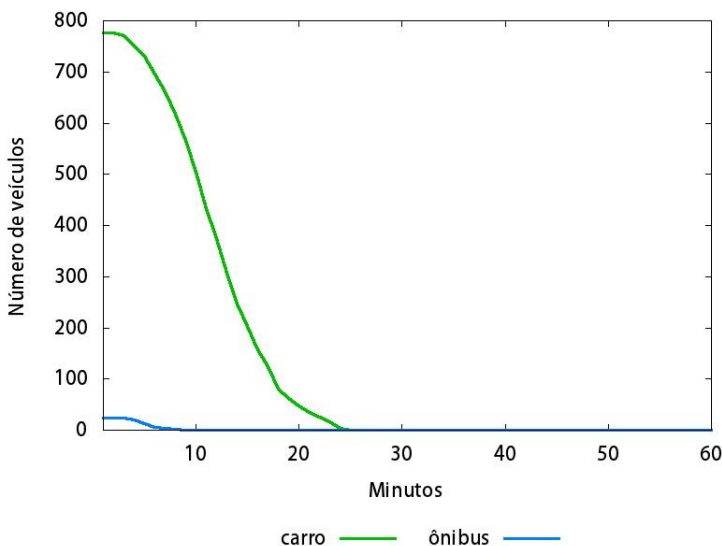
Além disso, constata-se que os cenários futuros são os que apresentam as situações mais críticas, visto que o número de veículos

tende a aumentar, e não foram consideradas alterações na infraestrutura da malha. As demais análises a respeito dos resultados encontrados estão descritas de acordo com cada cenário simulado nas seções a seguir.

### 5.8.1 Cenário 1: ZPE 3 em 2014

O cenário 1 representa a evacuação da ZPE 3, na situação atual. O número total de viagens nesse cenário, somando carros e ônibus, foi de 813, sendo que todas essas viagens se originam dentro do raio da ZPE 3 e têm destinos fora dela. Por conta do baixo volume de viagens na ZPE 3, o tempo de evacuação verificado no Cenário 1 é menor que trinta minutos e pode ser verificado através do gráfico da Figura 23.

Figura 23 – Gráfico do tempo de evacuação ZPE 3 em 2014

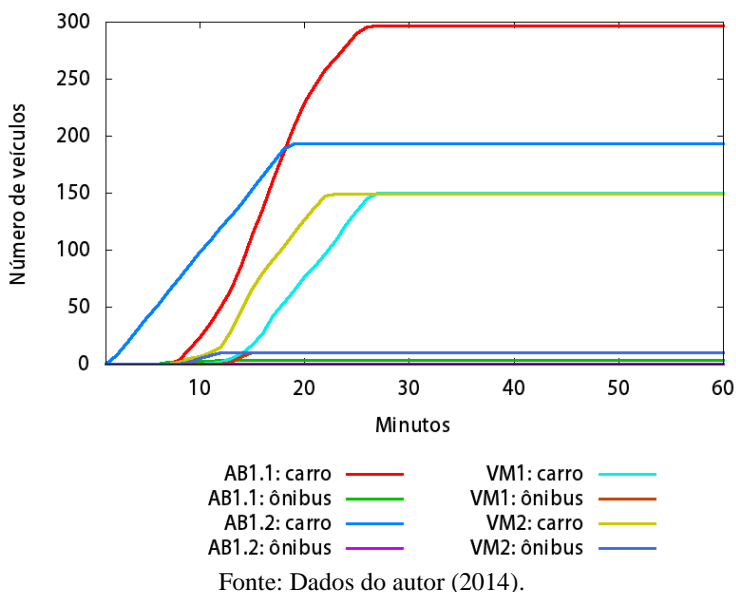


Fonte: Dados do autor (2014).

Sendo assim, na situação atual, no caso de uma evacuação, todos os veículos da ZPE 3 estariam fora da zona de risco em menos de meia hora. Ainda na Figura 23 é possível notar que o número de automóveis é consideravelmente maior que o número de ônibus, de modo que os ônibus conseguem deixar o raio da ZPE 3 em menos de dez minutos.

Para a evacuação da ZPE 3, existem quatro destinos possíveis: as duas vilas de moradores para os funcionários da usina, uma localizada ao norte da usina (VM1) e outra ao sul (VM2); o abrigo AB1.1 ao norte; além do abrigo AB1.2 ao sul. Considerando a localização desses destinos, estimou-se o tempo que os automóveis e os ônibus evacuados da ZPE 3 demorariam a chegar aos seus respectivos destinos. Esse tempo é representado no gráfico da Figura 24.

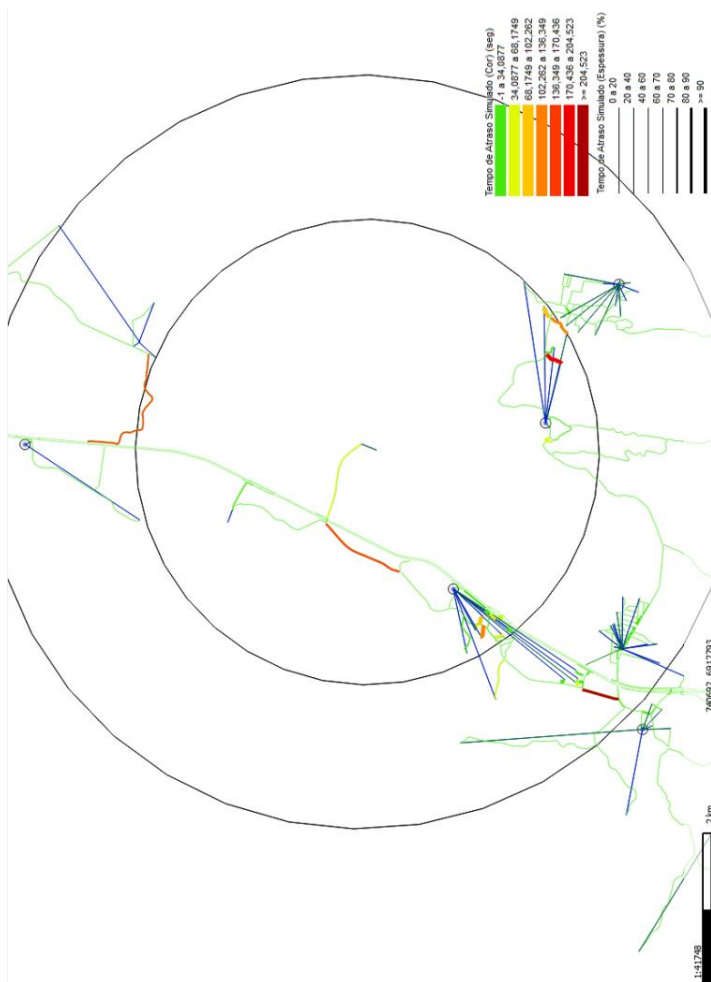
Figura 24 – Gráfico do tempo de chegada aos abrigos na ZPE 3 em 2014



Constata-se no gráfico que o tempo de chegada aos abrigos varia, dependendo do abrigo, devido à diferente localização que eles possuem. Apesar disso, trata-se de um tempo próximo de trinta minutos, muito semelhante ao tempo estimado para a evacuação total da ZPE 3.

Percebe-se, ainda, que o abrigo AB1.1 é o que recebe o maior número de veículos, e que a vila de moradores VM1 é o local de destino em que há maior tempo despendido para a chegada dos veículos. Esse fato se dá porque a referida vila de moradores é o abrigo mais distante, considerado nesse cenário, por meio da Figura 25 é possível notar os locais com maior incidência de tempo de atraso.

Figura 25 – Representação na malha dos tempos de atraso na ZPE3 em 2014



Fonte: Dados do autor (2014).

As seções mais problemáticas estão situadas próximas da usina, o centro do círculo que representa a ZPE 3 e nas seções mais sinuosas, ou ainda naqueles que estão situadas em locais mais urbanizados, em que há maior quantidade de nós, ou seja, interseções.

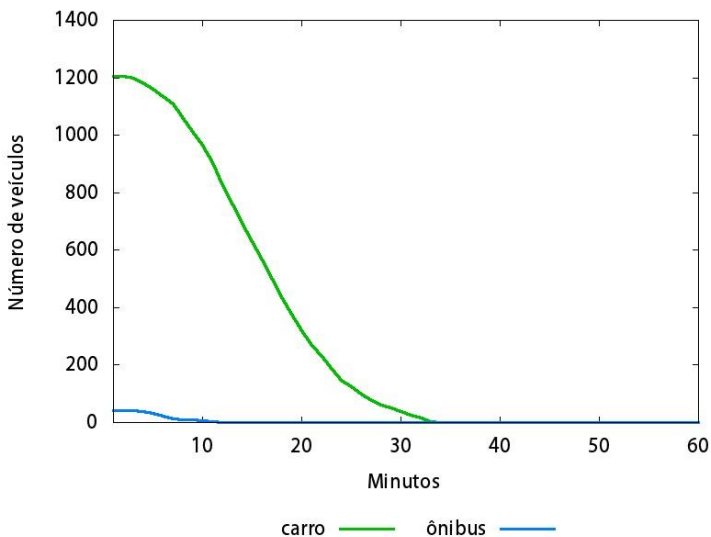


### 5.8.2 Cenário 2: ZPE 3 em 2024

O cenário 2 considera a evacuação da ZPE 3 em uma situação futura. No cenário futuro, há tendência de que a conjuntura se agrave, visto que o número de veículos a serem evacuados aumenta de 813 para 1.234. O crescimento da frota e da população, de acordo com as projeções realizadas, demonstra que o número de automóveis cresce mais que o número de ônibus necessários para realizar a evacuação.

Na Figura 26, o gráfico apresenta o tempo de evacuação para o Cenário 2.

Figura 26 – Gráfico do tempo de evacuação na ZPE 3 em 2024

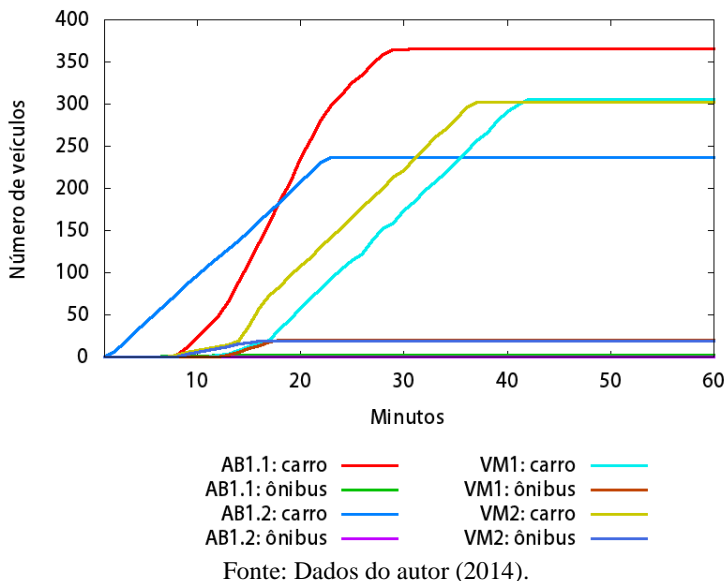


Fonte: Dados do autor (2014).

Percebe-se que os ônibus levam mais de dez minutos para deixar a ZPE 3 e que os automóveis, que na situação atual (cenário 1) deixam a área de risco em menos de meia hora, no futuro ultrapassarão esse tempo. No entanto, mesmo com o aumento do número de veículos, todos conseguem sair da ZPE 3 dentro de 40 minutos.

Os locais de abrigo continuam sendo os mesmos do cenário 1, mas devido ao maior número de veículos, o tempo despendido para a chegada aos destinos é maior e pode ser verificado com o gráfico da Figura 27.

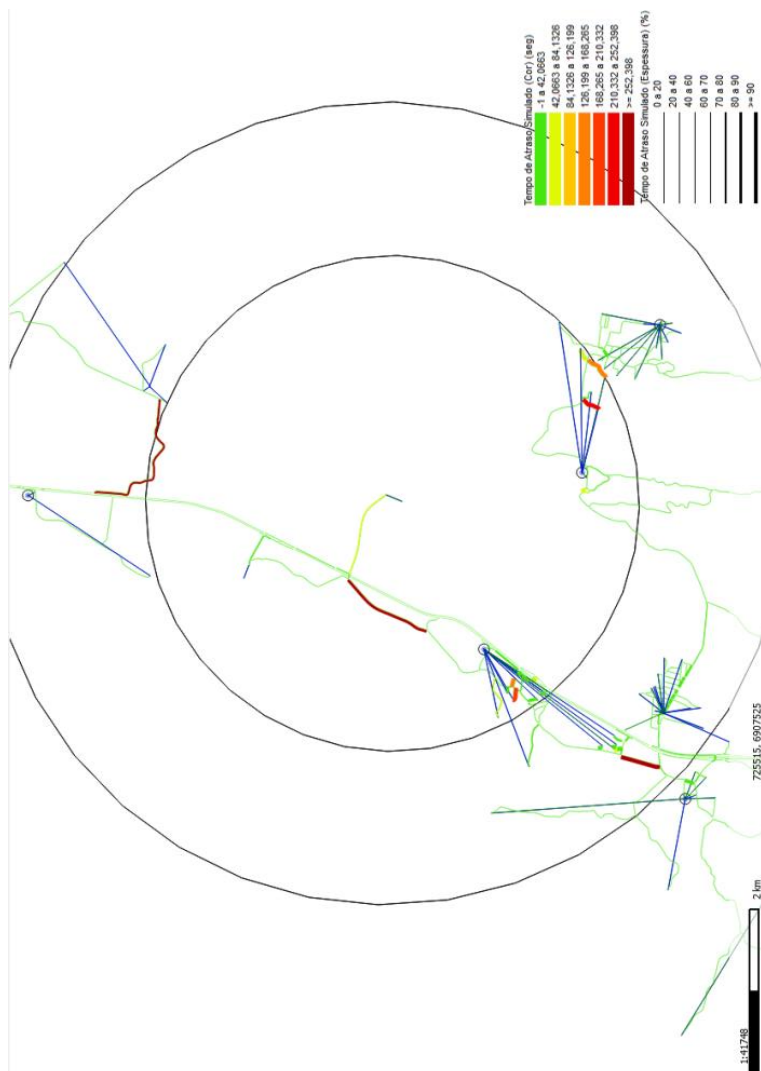
Figura 27– Gráfico do tempo de chegada aos abrigos na ZPE 3 em 2024



O abrigo que recebe maior número de veículos continua sendo o AB1.1. Nota-se que os abrigos possuem menor tempo de chegada, quando comparados às vilas residenciais dos funcionários. Dessa forma, o abrigo que possui o menor tempo de chegada é o AB1.2, enquanto que, assim como verificado no cenário 1, a vila de moradores VM1 é o local com o maior tempo de chegada dos veículos.

O tempo de evacuação sofre influência dos tempos de atraso, uma vez que o cenário futuro apresenta uma situação agravada com relação ao cenário atual. A Figura 28 apresenta os tempos de atraso nos locais mais críticos para esse cenário. Nessa figura, percebe-se que as seções destacadas em vermelho são as mais problemáticas e, portanto, estão situadas próximas aos locais identificados como consideráveis geradores de viagens.

Figura 28 – Representação na malha dos tempos de atraso na ZPE 3 em 2024



Fonte: Dados do autor (2014).

Um fator que atua nos tempos de atraso é a infraestrutura da via, os trechos sinuosos e as interseções com grande volume de veículos, os quais podem ser responsáveis por maiores tempos de atraso. Os locais com maior tempo de atraso, identificados na Figura 29, são basicamente

os mesmos verificados para o cenário da ZPE3 2014, contudo, com tempos de atraso maiores, o que aumenta o tempo total de evacuação dos veículos.

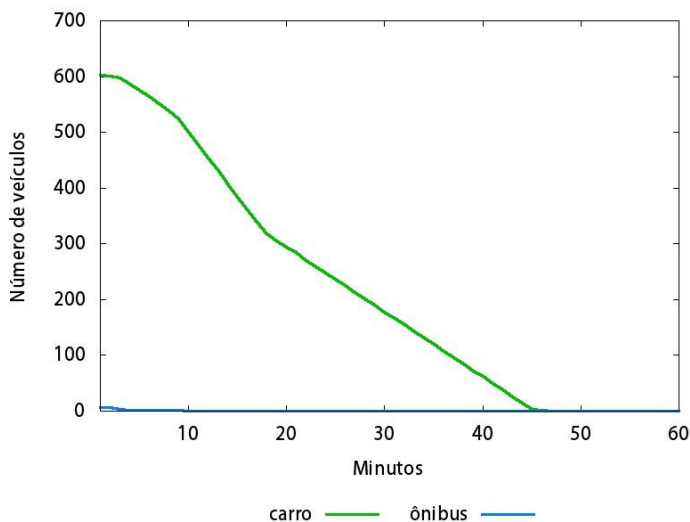
Desse modo, na atualização do planejamento de evacuação essas seções precisam ser analisadas com mais cuidado. A fim de evitar problemas futuros, propostas como desvio de rotas, construção de vias paralelas ou de outros abrigos são exemplos de ações mitigatórias.

### 5.8.3 Cenário 3: ZPE 5 em 2014

Esse cenário considera a evacuação da ZPE 5 na situação atual. Em relação ao tempo de evacuação, por se tratar de uma área maior que a ZPE 3, com mais veículos e pessoas, tem um maior número de viagens estimado em 1.168, entre carros e ônibus.

O tempo total para evacuação nesse cenário, considerando a média das replicações, foi menor que cinquenta minutos, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 29.

Figura 29 – Gráfico do tempo de evacuação na ZPE 5 em 2014



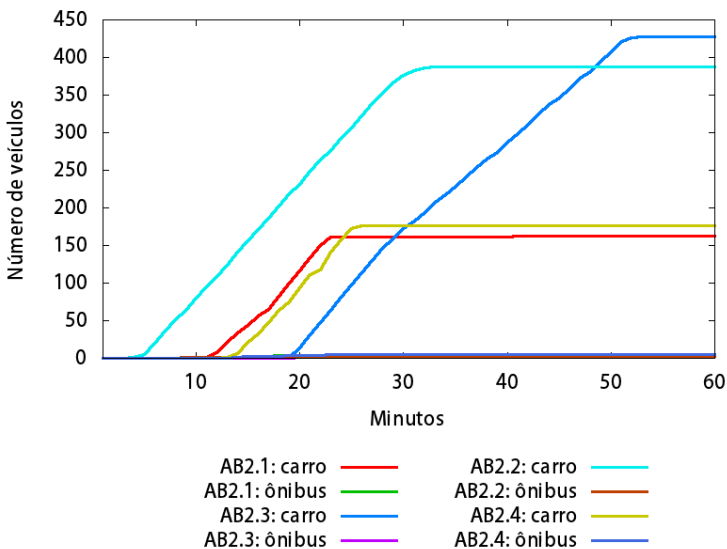
Fonte: Dados do autor (2014).

A quantidade de ônibus necessária para a evacuação da população da ZPE 5 é muito pequena comparada ao número de automóveis. Isso significa que a maior parte da população possui carro

próprio. Outro fator que contribui para o baixo número de ônibus é que os funcionários da usina, que representam uma parte da população usuária de transporte público, já foram evacuados para fora da ZPE 5, onde estão localizadas as vilas residenciais.

Os habitantes da ZPE 3 que foram evacuados para os abrigos AB1.1 e AB1.2 também precisam ser removidos para áreas seguras, visto que esses abrigos se encontram dentro da ZPE 5. O gráfico da Figura 30 indica o tempo de chegada aos abrigos destinados à população evacuada da ZPE 5.

Figura 30 – Gráfico do tempo de chegada aos abrigos na ZPE 5 em 2014

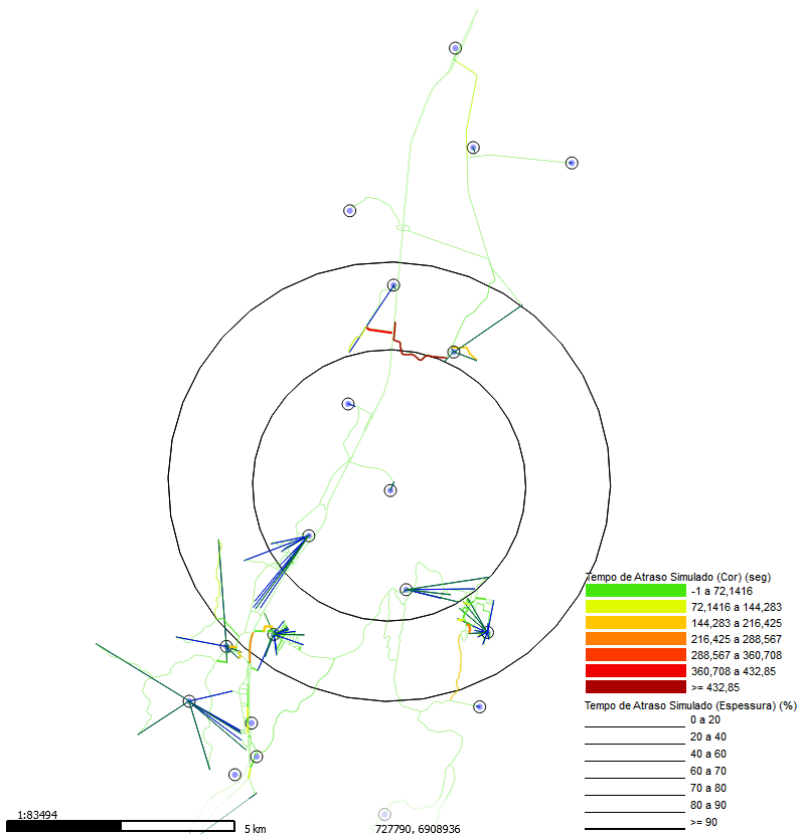


Fonte: Dados do autor (2014).

O abrigo AB2.3 é observado com o maior tempo despendido para a chegada de todos os veículos destinados a ele, sendo que, para este abrigo se destinam a maior quantidade de veículos simulados neste cenário, como pode ser verificado no gráfico (Figura 30). O abrigo AB2.2 é o segundo em número de veículos e com maior tempo despendido para a chegada dos mesmos. Percebe-se, contudo, que dentro de uma hora todos os veículos terão chegado aos destinos e a população terá acesso aos abrigos.

O tempo de chegada aos abrigos é influenciado pelo tempo de atraso, que varia para cada seção, como demonstra a Figura 31.

Figura 31 – Representação na malha dos tempos de atraso na ZPE 5 em 2014



Fonte: Dados do autor (2014).

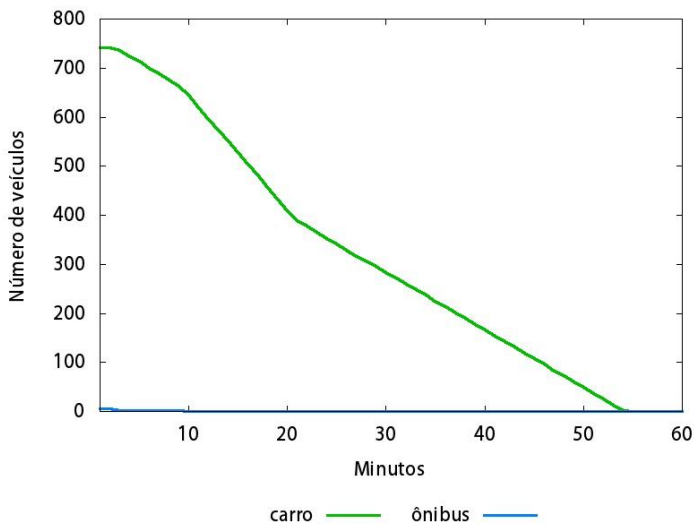
Assim como observado nos cenários da ZPE 3, os locais com maiores tempos de atraso possuem características comuns. Tratam-se de algumas seções sinuosas próximas a pontos de encontro e abrigos. Ou seja, locais em que a velocidade média não pode ser alta, devido às características da malha e locais onde há concentração de fluxo de veículos.

#### 5.8.4 Cenário 4: ZPE 5 em 2024

No cenário futuro da evacuação da ZPE 5, ocorre o agravamento da situação simulada no cenário anterior, pois é considerado o aumento da população e da quantidade de veículos, sem a realização de melhoria alguma na infraestrutura existente.

O gráfico da Figura 32 demonstra o tempo de evacuação despendido para que todos os veículos, carros e ônibus, deixem a ZPE 5.

Figura 32 – Gráfico do tempo de evacuação na ZPE 5 em 2014

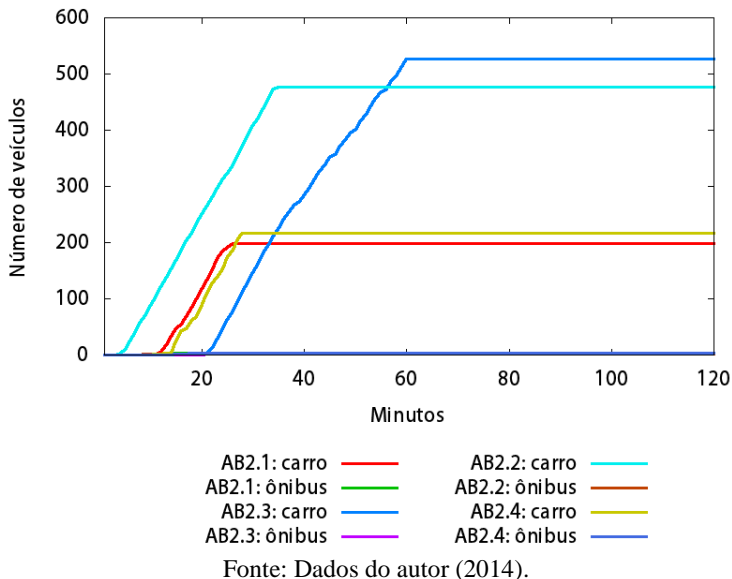


Fonte: Dados do autor (2014).

Apesar de na situação futura o número de viagens ter aumentado de 1.168 para 1.428, o tempo total de evacuação dessa área de risco não chega a uma hora, sendo um pouco maior que cinquenta minutos. Como a frota de carros particulares aumentou consideravelmente, a quantidade de ônibus necessária para a evacuação das pessoas diminuiu. Sendo assim, todos os ônibus saem da área de risco em menos de dez minutos.

A Figura 33 apresenta o gráfico com os tempos de chegada aos abrigos.

Figura 33 – Gráfico do tempo de chegada aos abrigos na ZPE 5 em 2024



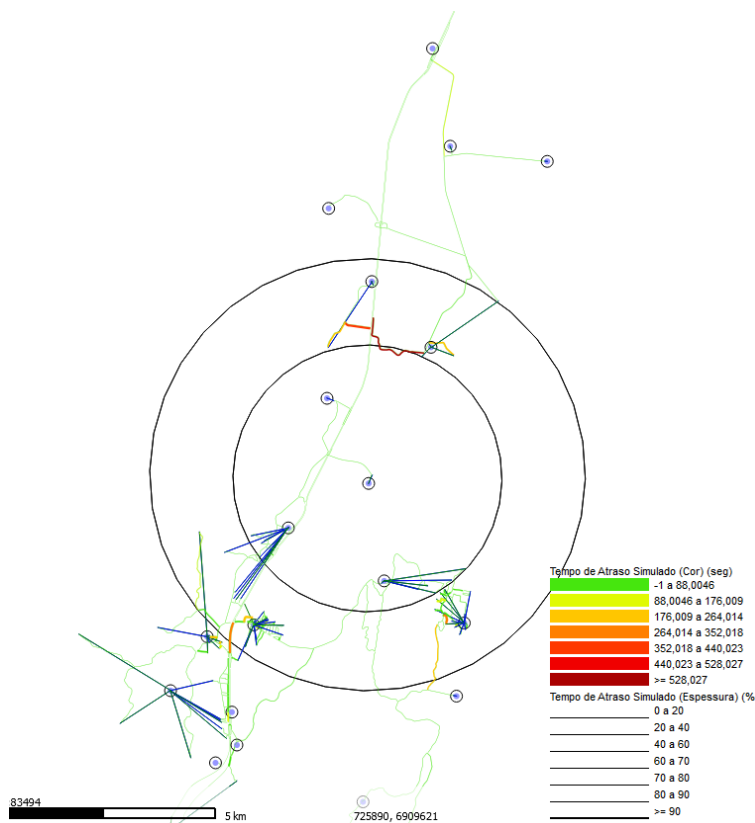
O destino com maior tempo de chegada e maior número de veículos é o abrigo AB2.3, situação muito semelhante à observada na simulação do Cenário 3, que considera a evacuação da ZPE 5 na situação atual – entretanto, de modo agravado, devido ao aumento considerável no número de viagens.

Sendo assim, este se configura no cenário com o maior tempo de chegada dos veículos aos abrigos, estimado em mais de uma hora. Diante da informação desses tempos, é possível adotá-los como parâmetro para o melhor planejamento da evacuação.

O tempo de evacuação está diretamente relacionado ao tempo de atraso nas seções; assim, quanto maior a ocorrência de atrasos, maior será o tempo de evacuação. A Figura 34 indica os pontos críticos, onde ocorrem os maiores tempos de atraso.



Figura 34 – Representação na malha dos tempos de atraso na ZPE 5 em 2024



Fonte: Dados do autor (2014)

Os maiores tempos de atraso são verificados na proximidade do abrigo AB2.3 e nos locais com maior densidade de malha viária urbana, como ocorre na proximidade dos pontos de encontro e do abrigo AB2.2. Esses locais são vistos como pontos críticos, podendo apresentar problemas no futuro. Logo, configuram os pontos em que o planejamento deve atuar, a fim de manter a eficiência da evacuação.







## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 CONCLUSÃO

O planejamento de transporte atua tanto para melhorar as condições de tráfego em situações cotidianas, como também durante situações extremas, como é o caso de uma evacuação emergencial. A microssimulação de tráfego, portanto, opera como uma ferramenta de planejamento de transporte decisiva no desenvolvimento de um plano de evacuação.

Essa ferramenta foi um dos elementos que embasou o sequenciamento das etapas do método proposto, cuja descrição e aplicação foram abordadas no presente estudo. Sendo assim, ao realizar o levantamento dos dados de demanda de tráfego e de infraestrutura, necessários à modelagem de microssimulação, as informações envolvidas no planejamento de evacuação da área foram sendo averiguadas.

As principais ações que precisam ser tomadas para o desenvolvimento de um plano de evacuação foram descritas por meio do método proposto. Constatou-se basicamente que, para desenvolver um plano de evacuação, é indispensável identificar a área de risco, levantar o número de pessoas, domicílios e demais locais que se encontrem dentro dessa área.

Além disso, devem ser avaliados os locais disponíveis, como abrigos, para onde a população deverá ser movida, bem como o meio de transporte destinado à locomoção das pessoas. Para tanto, é ideal que se tenha conhecimento do número de veículos existente nas zonas que serão evacuadas, a fim de estimar a quantidade de viagens geradas dentro da área de risco.

Foi possível verificar que no caso de uma evacuação, em que não haja influência do tráfego de passagem, o número de viagens geradas é representado pelo número de veículos existente nas zonas de tráfego, adicionado à quantidade de moradores, os quais não possuem automóveis e necessitam de transporte público. Para estimar esse número, é necessário ter conhecimento da quantidade de domicílios presentes nas zonas de tráfego.

A contribuição essencial deste trabalho está em ordenar as ações necessárias ao planejamento de evacuação, por meio do método apresentado, o qual permite estimar o tempo de evacuação e de chegada

aos abrigos destinos. Com isso, o método permite observar se diante das condições modeladas a população consegue, ou não, abrigar-se em um intervalo seguro de tempo, bem como evidenciar a vantagem do uso de um microssimulador de tráfego capaz de gerar resultados, como os apresentados.

Outra contribuição do modelo proposto é manter o plano atualizado, com a utilização da ferramenta de microssimulação. Segundo os resultados observados, para a situação hipotética modelada neste trabalho, a evacuação de toda a população ocorreu dentro de um intervalo de tempo aceitável. Por meio da simulação dos cenários propostos, os locais críticos, responsáveis por possíveis atrasos e que necessitam de intervenções, foram identificados.

Vale destacar que as particularidades de cada plano de evacuação estão diretamente relacionadas à geografia da área de risco, às formas de ocupação do solo, à malha viária existente e, principalmente, à quantidade de pessoas que precisam ser removidas do local. Além disso, deve ser levado em consideração que a aplicação do modelo irá trazer diferentes resultados, o que dependerá da forma como o evento será modelado.

Também é importante lembrar que o modelo considera que as pessoas já se encontram dentro dos veículos de transporte, prontas para realizar a evacuação. Em outras palavras, isso significa que o tempo estimado pelo modelo observa apenas o intervalo de tempo despendido pelas pessoas já em trânsito, para deixar a área de risco e chegarem aos abrigos.

As vantagens do modelo estão relacionadas às diversas variáveis capazes de ser representadas por meio da modelagem de microssimulação de tráfego, a qual permite observar quais as melhores ações a serem tomadas, referentes à área de estudo em análise, em conformidade com as características simuladas em cada cenário.

As dificuldades para aplicar o método desenvolvido dizem respeito à obtenção de dados socioeconômicos de qualidade e em nível detalhado. De modo geral, dados socioeconômicos como, por exemplo, a frota de veículos por zona de tráfego, auxiliam significativamente na estimativa da demanda de tráfego. Esses dados são essenciais para o desenvolvimento do plano, bem como do modelo de microssimulação de tráfego.

Problemas com a obtenção dos dados afetam diretamente os estudos de planejamento de transporte, que possuem como uma de suas etapas fundamentais a estimativa de geração de viagens. Isso é muito

comum, devido à falta de dados de contagens volumétricas regulares nos locais em análise.

Informações necessárias ao método descrito, tais como a população, os domicílios e o número de veículos precisam ser detalhadas por zona de tráfego, e, no caso deste estudo, por setor censitário. Essa questão se apresenta como uma grande dificuldade, pois dificilmente esses dados estão disponíveis com tal nível de detalhamento, assim precisam ser estimados por meio de ferramentas estatísticas.

Além disso, outro fator limitante é que, por conta da necessidade de atualizar os dados, visto que eles nem sempre estão disponíveis no mesmo ano dos estudos. Ainda, devido à importância de verificação de cenários futuros, projeções precisam ser feitas. Para realizar essas projeções, o mesmo nível de detalhamento deve ser observado, considerando uma série de dados com observações suficientes para o alcance de uma projeção representativa.

Então, as projeções também foram um fator limitador, haja vista a ausência de séries históricas dos dados utilizados. Portanto, foi necessária a adoção de valores, conforme as informações existentes – o que afetou a obtenção de resultados mais condizentes com a realidade.

Em suma, a aplicação do método desenvolvido neste trabalho permite identificar a operacionalidade do plano de evacuação e a prioridade de medidas que consideram a demanda de tráfego e a infraestrutura da via.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A existência de eventos emergenciais, os quais representam risco à saúde da população, de modo geral, consideram a necessidade de retirada das pessoas localizadas dentro da área de risco. Ocorre que, nesses momentos, realizar uma evacuação de forma efetiva e ordenada é um grande desafio, que necessita de um robusto planejamento.

Portanto, um estudo de grande relevância seria o aprofundamento do método descrito, o qual pudesse ser utilizado para o planejamento de evacuação de emergências de áreas em torno de polos geradores de viagens, de diferentes naturezas, e que considere uma área de risco que necessita ser evacuada em um determinado intervalo de tempo.

Sugere-se o desenvolvimento de métodos mais abrangentes, que considerem qualquer situação emergencial, dado um PGV como uma indústria química ou algum terminal em que haja movimentação de produtos capazes de contaminar determinada área. Nesse sentido, seria

de grande valia e poderia aprofundar questões levantadas por este trabalho, tais como delimitação de uma área de risco, estimação da quantidade de viagens geradas, averiguação do tempo despendido para a evacuação da população, entre outras.

Nota-se também a dificuldade em modelar uma evacuação de emergência para as pessoas que não utilizam veículos, deslocando-se a pé. O aprofundamento de pesquisas nessa área seria de grande relevância para a evolução de pesquisas acadêmicas, na área de divisão modal e de estimativa do número de viagens de pessoas que se deslocam a pé. A modelagem desse tipo de comportamento já se encontra disponível em alguns *softwares* de microsimulação.

Além disso, deve ser observada a grande dificuldade em modelar eventos que considerem a influência de eventos climáticos, como as mudanças no sentido e na velocidade do vento, visto que ele é um importante fator que pode alterar na prioridade de evacuação de determinado local. Sugere-se, então, ampliar a área de análise, avaliando de que maneira a direção do vento pode influenciar priorizando a evacuação de determinadas zonas. Isso pode trazer grandes ganhos aos planejamentos de emergência.

O vento, enquanto fenômeno da natureza, pode mudar de comportamento, fazendo com que o fluxo de veículos precise mudar de direção. Assim, propõe-se também o aprofundamento a respeito das ferramentas de microsimulação existentes e que considerem a possibilidade de mudanças de fluxos, durante a simulação, a fim de modelar esse tipo de acontecimento, o que afetará no tempo total de evacuação.

Outra sugestão é a realização de uma pesquisa que consiga encontrar relação entre a quantidade de veículos e o número de domicílios. Isso facilitaria a estimativa do número de viagens no caso de uma evacuação, haja vista que, geralmente, não há disponibilidade de dados de contagem volumétrica.

Por fim, destaca-se que a continuidade de pesquisas na área de microsimulação podem contribuir amplamente para casos em que se verifiquem as melhores rotas de evacuação para a população, no caso de desastres naturais, como enchentes e deslizamentos, eventos que frequentemente ocorrem no país, inclusive no estado de Santa Catarina. É importante considerar, inclusive, a evacuação de pedestres diante dessas situações de emergência.



## 7 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. B. *et al.* **Dam Break Flood Risk Management in Portugal**. Lisboa: LNEC, 2003. 265 p.

ALMEIDA, A. B. Emergência e gestão do risco. In: **Curso de Exploração e Segurança de Barragens**. Capítulo 7. Lisboa: Instituto Nacional da Água (INAG), 2001. 104 p.

AN, S. *et al.* **Location planning for transit-based evacuation under the risk of service disruptions**. Transportation Research Part B: Methodological. Volume 54, August 2013, 1-16p.

ANDRADE, E. P.; PORTUGAL, L. S. Geração de viagens em PGVs. In: PORTUGAL, L. S. **Polos geradores de viagens orientados a qualidade de vida e ambiental: modelos e taxas de geração de viagens**. Rio de Janeiro: Interciência, 2012. p. 106-133.

ARAUJO, J. B. **Um Modelo de Indicadores Crítico para Ações Regulatórias Baseados em uma APS Nível 1**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

BALBI, D. A. F. **Metodologias para a elaboração de planos de ações emergenciais para inundações induzidas por barragens: estudo de caso: Barragem de Peti**: Dissertação de mestrado do Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2008.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Planejamento, Organização e Logística Empresarial**. Trad. de Elias Pereira. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

BARBETTA, P. A. **Estatística aplicada às ciências sociais**. 7. ed. Florianópolis: EdUFSC, 2011.

BARCELÓ, J. **Fundamentals of Traffic Simulation**. International series in operations research & management science, [s.l.]. Springer science bussines media, 2010.

BASTOS SILVA, A. M *et al.* **Microsimulação aplicada aos estudos de acessibilidade**. In: Congresso Rodoviário Português, 7. Lisboa,

2013. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 2013. p. 10-12.

BEHRISCH, M. *et al.* **SUMO – Simulation of Urban Mobility**: an Overview. Institute of Transportation Systems German Aerospace Center The Third International Conference on Advances in System. Berlin: Iaria, 2011.

BINNING, J.; BURTENSHAW, G. Green light for TRANSYT 13. Traffic Software News, UK, 2008.

BOERI G. C. *et al.* Dynamic Model for the Study of Evacuation Under Accident Conditions, Radiation Protection Dosimetry. **Nuclear Technology Publishing**, Box No. 7, Ashford, Kent, England, v. 21, n. 1/3, p. 171-174. 1987.

BOXILL, S. A.; YU, L. **An Evaluation of Traffic Simulation Models for Supporting ITS Development**. Report 167602-1, Southwest Region University Transportation Center, Texas A&M University, College Station, TX, EUA, 2000.

BRASIL, Biblioteca digital da câmara dos deputados. **Código de Trânsito Brasileiro (CTB)**. 4. ed. Brasília, 2010. Disponível em: <file:///C:/Users/Owner/Downloads/codigo\_transito\_4ed.pdf >. Acesso em: 19 maio 2014.

\_\_\_\_\_. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de projeto de interseções**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2005. 528 p. (IPR. Publ., 718).

\_\_\_\_\_. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de estudos de tráfego**. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN). **Manual de procedimentos para o tratamento de polos geradores de tráfego**. Departamento Nacional de Trânsito, Ministério da Justiça. Brasília, 2001.

\_\_\_\_\_. **Diretriz Angra 1**. Aprovada pela Portaria nº 144/SAE, de 20 de novembro de 1997. Disponível em:  
<<http://www.sipron.planalto.gov.br/legislacao/diretrizes/83-legislacao/3622-diretriz-angra-i>>. Acesso em: 08 dez. 2013.

\_\_\_\_\_. Laboratório de Transporte e Logística (LabTrans). **Estudo para Melhoria da Trafegabilidade, Segurança e Monitoramento Rodoviário da BR 101**. Produto 7: Relatório de desenvolvimento do sistema. Florianópolis, SC, 2014. 82 p.

\_\_\_\_\_. Ministério da Integração Nacional. Defesa Civil. Programas e Ações. Gestão de Riscos e Resposta a Desastres. Ações. Coordenação e Fortalecimento do Sistema Nacional de Defesa Civil. **Orientações para elaboração de um plano de contingência**, 2007. Disponível em:  
<<http://www.mi.gov.br/orientacoes-para-elaboracao-de-um-plano-de-contingencia>>. Acesso em: 03 nov. 2013.

\_\_\_\_\_. Ministério da Integração Nacional. **Secretaria Nacional de Defesa Civil**. Disponível em:  
<<http://www.integracao.gov.br/web/guest/sedec/apresentacao>>  
Acessado em: 03 nov. 2013

\_\_\_\_\_. Ministério de Planejamento, Orçamento e Gestão. Centro de Documentação e Disseminação de Informações. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Base de informações do Censo Demográfico 2010**: resultados do universo por setor censitário. Documentação do Arquivo. Rio de Janeiro, 2011.

BRITO, J.; FONTES, N. **Estratégias para eventos**. São Paulo: Aleph, 2002.

BURGHOUT, W. **Mesoscopic Simulation Models for Short-Term Prediction**. Sweden: Institute of Technology Linköpings University, 2005.

CAMPOS, V.; BANDEIRA, R.; BANDEIRA, A. **A method for evacuation route planning in disaster situations**. Energy efficient transportation networks. EWGT– Compendium of Papers. Paris, 2012.

CAMPOS, V. B. G. Método de alocação de fluxo no planejamento de transportes em situações de emergência: definição de rotas disjuntas.

1997. 195 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – COPPE, UFRJ. Rio de Janeiro, 1997.

CET, Companhia de Engenharia de Tráfego. **Polos geradores de tráfego**. Boletim técnico. São Paulo, 1983.

CERTITECNA, Engenheiros Consultores, S.A. Segurança. **Planos de emergência**. Disponível em:

<[http://www.certitecna.pt/detalhe\\_faq.php?idselec=4](http://www.certitecna.pt/detalhe_faq.php?idselec=4)>. Acesso em: 12 nov. 2013.

CHEN, X.; MEAKER, J. W.; ZHAN, B. Agent-Based Modeling and Analysis of Hurricane Evacuation Procedures for the Florida Keys. **Natural Hazards**, Texas, v. 38, n. 3, p. 321-338, Julho. 2006.

CNEN, Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Licenciamento de instalações nucleares. CNEN-1.04**. Dezembro, 2002. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm104.pdf>> Acesso em: 08 dez. 2013.

CUNHA, R. F. F. Uma sistemática de avaliação e aprovação de projetos de Polos Geradores de Viagens (PGVs). 2009. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – COOPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2009.

ELETRONUCLEAR, Eletrobras S. A. Ministério de minas e energia (MME). **Relatório de Gestão 2012**. Disponível em: <[http://www.eletronuclear.gov.br/LinkClick.aspx?fileticket=HVU7X\\_Q\\_xWo%3D&tabid=90](http://www.eletronuclear.gov.br/LinkClick.aspx?fileticket=HVU7X_Q_xWo%3D&tabid=90)>. Acesso em: 04 jun. 2014a.

\_\_\_\_\_. **Perguntas frequentes, Angra 1 e Angra 2**. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/Saibamais/Perguntasfrequentees/Angra2desempenhoopera%C3%A7%C3%A3o.aspx>>. Acesso dia: 09 jun. 2014b.

EMA. Emergency Management Australia. **Evacuation planning**. Manual number 11. Australia, 2005. Disponível em: <<http://www.em.gov.au/Documents/Manual11-EvacuationPlanning.pdf>>. Acesso em: 08 dez. 2013.

FARZANEH, M. **Modeling traffic dispersion**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia. 2005.

FHWA, Federal Highway Administration. **Traffic Analysis Toolbox Volume I: Traffic Analysis Tools Primer**, Washington D.C, 2004a.

FHWA, Federal Highway Administration. **Traffic Analysis Toolbox, Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software**, Washington D.C, 2004b.

FHWA, Federal Highway Administration. **Traffic Analysis Toolbox, Volume II: Decisions Support Methodology for Selecting Traffic Analysis Tools**, Washington D.C, 2004c.

FOX, K. **New tools to evaluate Intelligent Transportation Systems: the SMARTTEST project**. Institute for Transport Studies, University of Leeds. UK, 1998. Disponível em:  
<<http://www.sidrasolutions.com/documents/KFoxPaperTecSmart.pdf>>  
Acesso em: 10 jun. 2013.

GIL, A. C. **Metodologia do ensino superior**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2005.

GOMES, A. **A organização de eventos**. Disponível em:  
<[http://www.facape.br/aluisiogomes/org\\_eve/Organizacao\\_de\\_Eventos.pdf](http://www.facape.br/aluisiogomes/org_eve/Organizacao_de_Eventos.pdf)>. Acesso em: 02 nov. 2013.

GONÇALVES, F. S. **Classificação dos PGVs e sua Relação com as Técnicas de Análise de Impactos Viários**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – COOPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2012.

GONÇALVES, F. S. *et al.* **Caracterização dos polos geradores de viagens**. In: PORTUGAL, L. S. **Polos geradores de viagens orientados a qualidade de vida e ambiental: modelos e taxas de geração de viagens**. Rio de Janeiro: Interciência, 2012. p. 4-43.

IAEA, International Atomic Energy Agency. **Epr Medical: EPR method: Method for Developing Arrangements for Response to a Nuclear or Radiological Emergency**. IAEA, Vienna. 2003.

INTEGRATION Release 2.30 For Windows:User's Guide – Volume I:Fundamental Model Features. February, 2010.

ITE. Trip Generation Handbook, Na ITE Recommended Praticce. Institute of Transportation Engineers, Washington, D.C., EUA, 2008.

KNEIB, E. C. Caracterização de empreendimentos geradores de viagens: contribuição conceitual à análise de seus impactos no uso, ocupação e valorização do solo urbano. 2004. Dissertação de mestrado do departamento de engenharia civil e ambiental – Universidade de Brasília. Brasília, 2004.

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

LACALLE, M. J. Calibración del Microsimulador AIMSUN para Flujo Ininterrumpido en la Ciudad de Santiago. Dissertação de mestrado, Escuela de Ingenieria, PUC. Chile, 2003.

LATOSKI, S. P.; WAGENBLAST, J. R.; WALKER, M. D. Managing travel for planned special events, Handbook – Final Report, Federal Highway Administration – FHWA, USA Department Transportation, September, 2003.

LIGHTHILL, M.; WHITHAM, G. On Kinetic waves II: a theory of traffic flow on long, crowded roads. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, n. 229, 1955.

LINDELL, M.; PRATER, C. Critical Behavioral Assumptions in Evacuation Time Estimate Analysis for Private Vehicles: Examples from Hurricane Research and Planning. J. Urban Plann. Dev. 133. Special issue title: Emergency Transportation Preparedness, Management, and Response in Urban Planning and Development, 2007, 18–29p.

LOPES FILHO, J. I. de O. **Pós-Avaliação da Previsão de Demanda por Transportes no Município de Fortaleza**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2003.

MATSIM. MATSim - Multi-Agent Transport Simulation, 2014a. Disponível em: <<http://www.matsim.org/>>. Acesso em: 10 out. 2014.

MATSIM. Tutorial: Learning MATSim in 8 Lessons, 2014b. Disponível em: <<http://www.matsim.org/docs/tutorials/8lessons>>. Acesso em: 10 out. 2014.

MELLO, J. C. **Planejamento dos transportes**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975.

NAGHAWI, H.; WOLSHON, B. Performance of Traffic Networks during Multimodal Evacuations: Simulation-Based Assessment. **Nat. Hazards Rev.**, v. 13, n. 3, p. 196-204. 2012.

McCONNELL, A.; DRENNAN, L. Mission Impossible? Planning and Preparing for Crisis . **Journal of Contingencies and Crisis Management**, v. 14, n. 2, p. 59-70, Junho. 2006.

McLEAN, J. R. **Two-Lane Traffic Operations: Theory and Praticy**. New York: Gordon & Breach, 1989.

McNALLY, M. G. The Four-step Model. In: **Handbook of Transport Modelling**, Edited by D. A. Hensher and K. J. Button, Elsevier Science. 2. ed. Irvine, CA: Elsevier, 2007. Disponível em: <<http://www.its.uci.edu/its/publications/papers/CASA/UCI-ITS-AS-WP-07-2.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2013.

ONELCIN, P.; MUTLU, M. M.; ALVER, Y. Evacuation plan of an industrial zone: Case study of a chemical accident in Aliaga, Turkey and the comparison of two different simulation softwares. **Safety Science**, v. 60, p. 123-130, Dezembro. 2013

ORTÚZAR, J. D.; WILLUMSEN, L.G. **Modelling Transport**. 3. ed. New Delhi, India: Wiley, 2001.

OSHA, Occupational Safety and Health Administration. **E-tools. Evacuation**. Disponível em: <<https://www.osha.gov/SLTC/etools/evacuation/eap.html>>. Acesso em: 12 nov. 2013.

PAIVA NETO, P. M.; CASTRO NETO, M. M.; LOUREIRO, C. F. G. Progressão em tempo real versus tempo fixo por banda de passagem em

períodos de baixa demanda – estudo de caso. In: ANPET: XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Rio de Janeiro-RJ, 2003, 1-8p.

PERRY, R. W.; LINDELL, M. K.; GREENE, M. R. **Evacuation Planning in Emergency Management**. Lexington Books, 1981.

PINTO, C. R. S. *et al.* Megaeventos: impactos e estratégias de transportes. In: PORTUGAL, L. S. **Polos geradores de viagens orientados a qualidade de vida e ambiental: modelos e taxas de geração de viagens**. Rio de Janeiro: Interciência, 2012. p. 599-635.

PORTUGAL, Ministério da Ciência e Educação. Direção regional de educação do Algarve. Agrupamento de escolas do conselho de Alcoutim. **Plano de emergência**. Alcoutim, 2012.

PORTUGAL, L. S. **Simulação de tráfego: conceitos e técnicas de modelagem**. Rio de Janeiro: Interciência, 2005.

PORTUGAL, L. S.; GOLDNER, L. G. **Estudo dos polos geradores de tráfego e de seus impactos nos sistemas viário e de transportes**. São Paulo: Edgard Blucher, 2003.

PTV, Vison. **VISSIM** – State of the Art Multi-Modal Simulation.

Disponível em:

<[http://www.ptvap.com/docs/VISSIM\\_AP\\_LowRes\\_opt.pdf](http://www.ptvap.com/docs/VISSIM_AP_LowRes_opt.pdf)>. Acesso em: 01 ago. 2013.

PTV. GROUP. **The mind of movement**. PVT Vissim. Disponível em:

<<http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-uk/products/ptv-vissim/>>. Acesso em: 01 ago. 2013.

QIAO, F; GE, R.; YU, L. Computer Simulation-Based Framework for Transportation Evacuation in Major Trip Generator. Research Report SWUTC/09/473700-00057-1. Center for Transportation Training and Research 9. Performing Organization Name and Address. Texas Southern University. 3100 Cleburne. Houston, Texas, 209.

RAJASAKRAN, R. A. Aimsun microsimulation: A practical application: micro-simulation of the n1 freeway. Goba (Pty) Ltd, Block B Belvedere Place, 5 Eglin Road, Sunninghill, 2157, 2008.



RIO DE JANEIRO, Defesa Civil. Secretaria de Estado de Defesa Civil – SEDEC. **Plano de Emergência Externo do Estado do Rio de Janeiro:** para caso de emergência nuclear nas instalações da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA). Decreto n.º 44.384 aprovação do PEE/RJ, de 11 de setembro de 2013. Disponível em: <<http://www.dgdec.defesacivil.rj.gov.br/images/pee/pee.pdf>>. Acesso em: 08 jan. 2013.

ROBERTSON, D. Transyt. Traffic network study tool. [S.l.], 1968.

SÃO PAULO (município). **Decreto nº 36.613, de 6 de dezembro de 1996.** Disponível em: <<https://www.leismunicipais.com.br/a/sp/s/sao-paulo/decreto/1996/3661/36613/decreto-n-36613-1996-da-nova-redacao-aos-artigos-1%C2%BA-e-2%C2%BA-do-decreto-n%C2%BA-34713-de-30-de-novembro-de-1994-que-dispoe-sobre-o-relatorio-de-impacto-de-vizinhanca-rivi-e-da-outras-providencias-1996-12-06.html>>. Acesso em: 02 nov. 2013.

SETTI, J. R. A. **Tecnologia de transportes.** São Carlos: Universidade de São Paulo, EESC-USP, 2005.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração da dissertação.** Laboratório de Ensino a Distância da UFSC. Florianópolis, 2001.

SIRPON. **Sistema de Proteção ao Programa Nuclear Brasileiro.** Gabinete de Segurança Institucional da Presidência da República. Apresentação. Disponível em: <<http://sipron.planalto.gov.br/>>. Acesso em: 03 dez. 2013a.

\_\_\_\_\_. **NI-01: Norma Interna para Instalação e Funcionamento do Centro Nacional para o Gerenciamento de uma Situação de Emergência Nuclear.** Disponível em: <<http://www.sipron.planalto.gov.br/legislacao/normas/internas/83-legislacao/3621-ni-01-norma-interna-para-instalacao-e-funcionamento-do-centro-nacional-para-o-gerenciamento-de-uma-situacao-de-emergencia-nuclear>>. Acesso em: 03 dez. 2013b.

\_\_\_\_\_. **Exercícios.** Disponível em: <<http://www.sipron.planalto.gov.br/exercicios>>. Acesso em: 03 dez. 2013c.

SOUSA, D. L. M. **Análise dos Impactos Causados no Tráfego por Alterações na Rede Viária Utilizando Microssimulação**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – COPPE, UFRJ. Rio de Janeiro, 2003.

SOUZA, C. D. R.; D'AGOSTO, M. A. Modelo de quatro etapas aplicado ao planejamento de transporte de carga. **Journal of Transport Literature**, v. 7, p. 207-234. 2013.

STALLINGS, R. A. **Methods of Disaster Research. International Research Committee on Disasters**: Xlibris. Philadelphia, 2002.

STEPANOV, A. SMITH, J. M. Multi-objective evacuation routing in transportation networks. *Production, Manufacturing and Logistics*. **European Journal of Operational Research**, p. 435-446. 2009.

SUMO. **Simulation of Urban Mobility**. Get Started. Disponível em: <<http://sumo.sourceforge.net/>>. Acesso em: 14 ago. 2013.

TAVARES, D. M. **Método Para Análise de Polos Geradores de Viagem Utilizando Ferramentas de Microssimulação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Distrito Federal, 2011.

TSS – Transport Simulation Systems 1997-2013. **Traffic modelling without boundaries**. Disponível em: <[http://www.aimsun.com/wp/?page\\_id=21](http://www.aimsun.com/wp/?page_id=21)>. Acesso em: 05 jun. 2013a.

\_\_\_\_\_. **Aimsun 8 Dynamic Simulators User's Manual**. Espanha. January, 2013b.

TURLEY, C. Calibration Procedure for a Microscopic Traffic Simulation Model. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Brigham Young University. Utah, 2007.

USMC. United States Marine Corps. **Marine Corps Planning Process**. DEPARTMENT OF THE NAVY Headquarters United States Marine Corps Washington, D.C. 20380-1775, 2001. Disponível em: <[http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/usmc/mcwp/5-1/mcwp5-1\\_2001.pdf](http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/usmc/mcwp/5-1/mcwp5-1_2001.pdf)>. Acesso em: 02 nov. 2013.

UNHCR. United Nations High Commissioner for Refugees. UN Refugee Agency. Handbook for Emergencies. Geneva. Third Edition February, 2007.

USNRC. United State Nuclear Regulatory Commission. 0654: Criteria for Preparation and Evaluation of Radiological Emergency Response Plans and Preparedness in Support of Nuclear Power Plants. Washington, D.C., November, 1980.

\_\_\_\_\_. NCR Library. **Backgrounder on Emergency Preparedness at Nuclear Power Plants**. Washington, 2009. Disponível em: <<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/emerg-plan-prep-nuc-power-bg.html>>. Acesso em: 01 dez. 2013.

VASCONCELOS, A. L. P. **Modelos de atribuição/simulação de tráfego**: o impacto na qualidade dos resultados de erros no processo de modelação. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Departamento de Engenharia Civil Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra. Coimbra, 2004.

VISEU, T. **Segurança dos vales a jusante de barragens**: metodologias de apoio à gestão dos riscos. 2006. 482 f. Tese de doutorado – Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2006.

VISSIM. **VisSim User's Guide Version 8.0**. By Visual Solutions, Inc. 487 Groton Road Westford, MA 01886, 2010. Disponível em: <[http://www.vissim.com/downloads/doc/VisSim\\_UGv80.pdf](http://www.vissim.com/downloads/doc/VisSim_UGv80.pdf)>. Acesso em: 13 ago. 2013.