

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Douglas Zechin

**INFLUÊNCIA DA CHUVA NOS PARÂMETROS DE  
CALIBRAÇÃO DO MICROSSIMULADOR DE TRÁFEGO PTV  
VISSIM**

Porto Alegre

2019

Douglas Zechin

**Influência da chuva nos parâmetros de calibração do microssimulador de tráfego PTV  
VISSIM**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Acadêmica (ou Profissional), na área de concentração em Sistemas de Produção (ou de Qualidade ou de Transportes).

Orientador: Helena Beatriz Bettella Cybis

Porto Alegre  
2019  
Douglas Zechin

**Influência da chuva nos parâmetros de calibração do microsimulador de tráfego PTV  
VISSIM**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Acadêmica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

**Helena Beatriz Bettella Cybis, PhD.**

Orientadora PPGEP/UFRGS

---

**Prof. Flávio Sanson Fogliatto**

Coordenador PPGEP/UFRGS

**Banca Examinadora:**

Felipe Caleffi, Dr.

Professor Fernando Michel, Dr. (LASTRAN/UFRGS)

Professor Daniel Sergio Presta García, Dr. (LASTRAN/UFRGS)

Dedico este trabalho a meus pais João Roque e Magda, que sempre estiveram ao meu lado e tanto me apoiaram no decorrer de minha graduação.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Profa. PhD Helena Beatriz Bettella Cybis, orientadora deste trabalho, por todo o suporte oferecido desde a decisão do tema a ser discutido até a conclusão do mesmo.

Agradeço aos colegas Yan Galvan, Daniel Rodrigues Acosta, Rodrigo Tapia, Lucas De Maman, Francisco Dalosto, Manon Masi e Rodrigo Schmidt, colegas do laboratório que sempre me auxiliaram nas pesquisas. Agradeço especialmente os colegas Maurício de Oliveira Castilhos, Dr. Felipe Caleffi, e Laísa Braga Kappler, que participaram ativamente da construção dos algoritmos e simulações utilizados neste estudo.

Agradeço ao corpo docente do LASTRAN, especialmente ao professor Dr. Fernando Dutra Michel, que contribuiu nos processos de criação do algoritmo utilizado neste estudo, e à Verônica Oliveira, que também não mediu esforços para contribuir na realização deste trabalho.

Agradeço a meus amigos e familiares, que sempre me dirigiram palavras de apoio e motivação, criando sempre um ambiente construtivo e aberto de produção.

Agradeço à minha namorada Bruna Souza Passos e a meus pais João Roque Zechin e Magda Didoné Zechin, que me auxiliaram e aconselharam incondicionalmente, com todo o carinho e em qualquer momento.

A eterna vigilância é o preço da liberdade.

*Thomas Jefferson*

## **RESUMO**

Microsimuladores de tráfego como o PTV VISSIM, objeto deste estudo, não possuem modelos específicos para simulação de tráfego sob diferentes condições climáticas, assumindo condições genéricas e estáveis. A possibilidade de simulações com chuva é de especial interesse a localidades onde a incidência de chuvas intensas é alta, como o sul do Brasil e os Estados Unidos. Neste trabalho propõe-se a alteração das velocidades desejadas e dos parâmetros dos modelos comportamentais utilizados pelo simulador para emular os efeitos provocados pela chuva no tráfego. As distribuições de velocidade desejada são feitas por meio do ajuste dos dados de tráfego à distribuição de Weibull e os parâmetros comportamentais são calibrados com um algoritmo genético. Os resultados indicam que a metodologia aplicada é capaz de identificar influências da chuva sobre o tráfego e pode ser utilizada para a construção de modelos de simulação de tráfego sob chuva.

**Palavras-chave:** chuva, microsimulação, VISSIM, breakdown, calibração

## **ABSTRACT**

Traffic simulators like the PTV VISSIM, object of this study, do not have specific models to simulate traffic under different climatic conditions, assuming general and stable conditions. The possibility of simulations with rain is of special interest to places where the incidence of intense rains is high, such as southern Brazil and the United States. In this work it is proposed to adjust the desired speeds and the parameters of the behavioral models used by the simulator to emulate the effects caused by rainfall in traffic. The desired velocity distributions are made by fitting traffic data to the Weibull distribution and the behavioral parameters are calibrated with a genetic algorithm. The results indicate that the applied methodology is able to identify influences of rain on traffic and can be used for the construction of traffic simulation models under rainfall.

**Keywords:** rain, inclemente weather, microsimulation, VISSIM, breakdown, calibration

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Média anual de períodos com tempestades severas (1970-1999).....	15
Figura 2 - Estrutura da metodologia .....	35
Figura 3 - Região estudada .....	36
Figura 4 - Perfil de fluxo típico do segmento. As cores se referem a dias distintos. ....	37
Figura 5 - Perfis de velocidade e fluxo típicos da faixa à esquerda. As cores se referem a dias distintos.....	39
Figura 6 - Gargalos 1 a 3 .....	42
Figura 7 - Detalhe da região dos detectores .....	45
Figura 8 - Fitness x Distância de Hausdorff Modificada.....	46
Figura 9 - Estrutura do algoritmo genético.....	48
Figura 10 - Crossover uniforme e de 1 ponto .....	50
Figura 11 - Comparação entre os métodos de identificação de breakdown .....	53
Figura 12 - Dados de velocidade-fluxo e método PLM .....	54
Figura 13 – Probabilidade de breakdown com distribuição de Weibull. As linhas tracejadas correspondem à diferença entre a probabilidade observada em cada um dos cenários chuvosos e o tempo seco. ....	55
Figura 14 - Probabilidade de <i>breakdown</i> x Intensidade da chuva. Volumes de tráfego constantes .....	56
Figura 15 - Distribuições de velocidade desejada .....	58
Figura 16 - Velocidade desejada x Cenários climáticos.....	60
Figura 17 - Algoritmo genético aplicado ao cenário sem chuva .....	62

Figura 18 – Fitness de todos os indivíduos da calibração do cenário sem chuva.....	63
Figura 19 - Valores dos parâmetros comportamentais na calibração do cenário de tempo seco. A linha vermelha representa o valor utilizado pelo melhor indivíduo. ....	65
Figura 20 - Nuvens de fluxo-velocidade do melhor indivíduo da primeira e da última geração do Cenário 0. A figura a) corresponde à primeira e a b) à última geração.....	66
Figura 21 - Comparação entre os cenários simulados. As marcações vermelhas representam o valor correspondente ao melhor indivíduo. As linhas tracejadas representam os limites de busca de cada um dos parâmetros.....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Síntese da estrutura da dissertação .....	17
Tabela 2 - Cenários a serem calibrados .....	40
Tabela 3 - Parâmetros de calibração do VISSIM .....	47
Tabela 4 - Redução de velocidade desejada em relação ao Cenário 0 (seco).....	61
Tabela 5 - Parâmetros comportamentais calibrados e padrão .....	68

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	COMENTÁRIOS INICIAIS .....	14
1.2	TEMA E OBJETIVOS.....	14
1.3	JUSTIFICATIVA DO TEMA E DOS OBJETIVOS .....	15
1.4	MÉTODO.....	16
1.5	DELIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	16
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
2.1	INFLUÊNCIA DA CHUVA NO TRÁFEGO .....	18
2.1.1	<i>Redução da Capacidade</i> .....	19
2.1.2	<i>Influência da Chuva no Fluxo Livre</i> .....	24
2.2	SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO.....	27
2.3	CALIBRAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO .....	28
2.3.1	<i>Metodologias de calibração utilizadas por outros autores</i> .....	28
2.3.2	<i>Algoritmo genético</i> .....	29
2.3.3	<i>Fitness</i> .....	30
2.3.4	<i>Distância modificada de Hausdorff</i> .....	33
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>35</b>
3.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	36
3.2	OBTENÇÃO DOS DADOS.....	37
3.2.1	<i>Dados de tráfego</i> .....	37
3.2.2	<i>Dados pluviométricos</i> .....	38
3.3	DEFINIÇÃO DO PERÍODO DE ESTUDO .....	38
3.4	DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS DE ESTUDO .....	39
3.5	INFLUÊNCIA DA CHUVA NA CAPACIDADE DA VIA .....	40
3.6	CONSTRUÇÃO DO MODELO NO VISSIM .....	41
3.6.1	<i>Modelagem da rede viária</i> .....	41
3.6.2	<i>Representação do congestionamento</i> .....	41
3.7	SELEÇÃO DOS PARÂMETROS PARA CALIBRAÇÃO.....	43
3.8	CALIBRAÇÃO DA VELOCIDADE DESEJADA .....	43
3.9	CALIBRAÇÃO DOS MODELOS COMPORTAMENTAIS – ALGORITMO GENÉTICO.....	44
3.9.1	<i>Medida de fitness</i> .....	44



3.9.2	<i>Geração dos alelos</i> .....	47
3.9.3	<i>Estrutura do algoritmo genético</i> .....	48
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>52</b>
4.1	INFLUÊNCIA DA CHUVA NA CAPACIDADE DA VIA .....	52
4.1.1	<i>Escolha da metodologia de identificação de breakdowns</i> .....	52
4.2	VELOCIDADE DESEJADA .....	57
4.3	CAR-FOLLOWING E TROCA DE FAIXAS .....	62
4.3.1	<i>Comparação entre os cenários</i> .....	67
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>70</b>
5.1	INFLUÊNCIA DA CHUVA NA CAPACIDADE DA VIA .....	70
5.2	CALIBRAÇÃO DA VELOCIDADE DESEJADA .....	71
5.3	CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS COMPORTAMENTAIS .....	71
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>73</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo discute-se as motivações desta dissertação, introduz-se o leitor ao tema percorrido e explana-se acerca dos objetivos deste estudo.

## 1.1 COMENTÁRIOS INICIAIS

As metodologias clássicas de Engenharia de Tráfego fornecem ferramentas para a resolução de grande parte dos problemas do trânsito. As formulações concebidas decorrem do profundo entendimento dos fenômenos existentes, de modo que são aplicáveis em diversas situações (HCM, 2016). Recentemente tem se concentrado esforços na concepção e operação de simuladores de tráfego computacionais, que propiciam um controle personalizado das problemáticas, permitindo que sejam construídos cenários virtuais que representam situações reais com precisão (CALEFFI, 2018). Estes simuladores permitem que, a partir de um cenário calibrado, sejam feitos estudos de impacto e benefício de alterações na rede viária. Contudo, simuladores de tráfego precisam ser calibrados para que representem uma região de estudo, uma vez que as características veiculares e comportamentais variam em todo o mundo. A calibração destes cenários, por sua vez, é bastante dispendiosa em termos de tempo e trabalho, muitas vezes inviabilizando que estudos sejam feitos. Além disso, simuladores de tráfego como o PTV VISSIM, objeto deste estudo, não contam com modelos de tráfego específicos que permitam a realização de simulações levando em conta condições climáticas e a influência que a chuva teria sobre os parâmetros de calibração do simulador é pouco documentada. Como a região estudada apresenta alta incidência de fortes chuvas (BROOKS, 2008), também apresenta real interesse na possibilidade de se realizar esse tipo de simulação. Por conta disso, neste trabalho foi estudada a influência da chuva nos parâmetros comumente utilizados na calibração, a fim de se compreender como a chuva pode ser abordada no simulador.

## 1.2 TEMA E OBJETIVOS

Diante do exposto, o objetivo principal deste trabalho é identificar a influência da chuva sob os parâmetros comumente utilizados para calibração do VISSIM na representação de tráfego rodoviário. Os objetivos específicos são (i) avaliar o impacto da chuva na velocidade desejada e (ii) nos parâmetros comportamentais e veiculares.

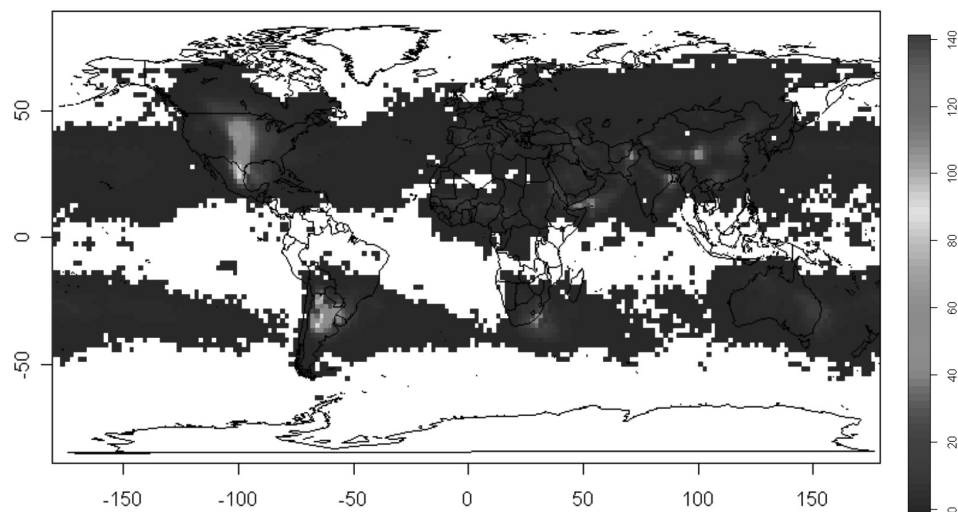
### 1.3 JUSTIFICATIVA DO TEMA E DOS OBJETIVOS

Estudos de Engenharia de Tráfego tem feito uso de microssimuladores de tráfego para representar cenários reais com maior confiabilidade. Estes softwares são calibrados para representarem o comportamento de motoristas e as características veiculares europeias como padrão, de modo que se faz necessário o ajuste de parâmetros específicos para que ele seja empregado em outras localidades.

Existem diversos esforços em relação ao uso de heurísticas para a realização de calibrações desse tipo, de modo que a maioria dos estudos se foca na utilização de algoritmos genéticos para encontrar o modelo que melhor representa a realidade. Essa heurística é eficaz e eficiente para a otimização de problemas, contudo é sensível ao formato do espaço de soluções, podendo convergir para máximos locais que estejam distantes do máximo global se mal estruturado. O algoritmo genético é, portanto, a heurística escolhida para a realização das calibrações pertinentes a este trabalho (BETHONICO, 2016; MENNENI; SUN; VORTISCH, 2008; SIDDHARTH; RAMADURAI, 2013).

O Brasil, e em especial a região sul do país, objetivo desse estudo, é colocado como um dos lugares no mundo com chuvas de maior intensidade e frequência. Enquanto isso, em países onde o VISSIM é desenvolvido e comumente utilizado, como os europeus, a frequência de chuvas intensas é menor do que a observada no Brasil, como observado na figura a seguir.

Figura 1 - Média anual de períodos com tempestades severas (1970-1999)



Fonte: adaptado de Brooks, 2008.

Isso denota um interesse específico da região estudada em se conseguir realizar simulações de tráfego sob chuva. Embora a influência da chuva sobre o tráfego esteja bem documentada, como será apresentado nas seções a seguir, a influência nos parâmetros de calibração comumente usados no VISSIM é pouco ainda carece de estudos. Por conta disso, almeja-se estudar a influência da chuva nos parâmetros utilizados para calibração do simulador VISSIM.

## 1.4 MÉTODO

Esta é uma pesquisa de natureza aplicada, com abordagem quantitativa. Os objetivos são descritivos e exploratórios, uma vez que se busca compreender o impacto de chuva, com diferentes intensidades, nos parâmetros comumente utilizados para se calibrar o simulador.

O desenvolvimento deste trabalho é dividido em 6 etapas. A **primeira** etapa é a revisão da bibliografia em relação ao impacto da chuva no tráfego, e as principais metodologias utilizadas para a realização das calibrações. A **segunda** etapa é a obtenção e filtragem dos dados de tráfego e consolidação com os dados de chuva. A **terceira** etapa é a seleção dos parâmetros significativos para a calibração dos cenários. A **quarta** é calibração da velocidade desejada. A **quinta** é a calibração dos parâmetros comportamentais e veiculares por meio de algoritmo genético e a **sexta** é a análise dos resultados obtidos.

Os parâmetros a serem utilizados para a calibração do simulador referem-se a características do tráfego específicas de cada região estudada. A velocidade desejada e a distância entre veículos parados, por exemplo, são dois desses parâmetros e estão relacionadas à percepção dos motoristas. Assim como esses parâmetros variam de local para local, utiliza-se como premissa que eles também variam com a presença de chuva e, em última análise, de acordo com a intensidade da chuva.

## 1.5 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

A principal delimitação deste trabalho é que só será possível realizar a calibração de uma localidade. Isso implica que a metodologia apresentada não poderá ser diretamente replicada em outros cenários, contudo almeja-se que a discussão realizada e os resultados encontrados contribuam para o norteamento de estudos futuros.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O quadro a seguir apresenta uma síntese de como é estruturado o trabalho:

Tabela 1 - Síntese da estrutura da dissertação

<b>Capítulo</b>	<b>Conteúdo</b>
1. Introdução	(i) Caracterização das limitações dos simuladores de tráfego quanto à chuva. (ii) Explicação sobre a importância de se poder simular cenários com chuva.
2. Referencial teórico	(i) Influência da chuva no tráfego. (ii) Metodologias para aferição da capacidade de rodovias. (iii) Metodologias para determinação de velocidade desejada em rodovias. (iv) Metodologias aplicadas para calibração de modelos de microssimulação de tráfego.
3. Metodologia	(i) Obtenção de dados (ii) Definição dos cenários a serem estudados quanto à chuva (iii) Metodologia para avaliação da capacidade sob chuva. (iv) Metodologia para avaliação de velocidade sob chuva. (v) Metodologia para calibração dos parâmetros dos modelos comportamentais sob chuva.
4. Resultados	(i) Resultados da avaliação da capacidade sob chuva. (ii) Resultados da avaliação de velocidade sob chuva. (iii) Resultados da calibração dos parâmetros dos modelos comportamentais sob chuva.
5. Conclusão	Explicação dos resultados obtidos e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentado o referencial teórico que embasa o trabalho. Primeiramente é apresentada uma discussão sobre a influência da chuva no tráfego rodoviário no que tange a capacidade da via. Nesta seção busca-se apresentar uma metodologia que permita motivar o estudo como um todo, identificando impactos da chuva na via como um todo.

A influência da chuva no tráfego é abordada sob a ótica da velocidade desejada, a qual também é um dos parâmetros calibráveis do VISSIM. Uma análise quantitativa é feita, de modo a se perceber a influência da chuva ao mesmo tempo que se prepara os dados a serem inseridos no simulador.

Finalmente, a calibração dos parâmetros comportamentais é abordada. São apresentadas as metodologias utilizadas por outros pesquisadores, bem como os parâmetros geralmente utilizados no processo de calibração.

### 2.1 INFLUÊNCIA DA CHUVA NO TRÁFEGO

Muitos autores têm criado modelos que descrevem as relações fundamentais do tráfego em função de velocidade, fluxo e densidade. A partir desses modelos pode-se inferir com facilidade algumas características do tráfego, como a velocidade desejada e a capacidade da via. Além disso, o formato das curvas decorrentes dos modelos também indica algumas características do tráfego. Com base nisso, busca-se nesse trabalho calibrar um modelo de microsimulação de tráfego no VISSIM para diferentes intensidades de chuva comparando-se as nuvens de fluxo-velocidade de dados obtidos em campo com as simuladas. Entende-se, para isso, que as relações fundamentais, quando apresentadas como nuvens de dados, permitirão que se capture as diferenças nos parâmetros de calibração do VISSIM a partir da alteração do formato das nuvens.

As principais motivações para esta abordagem são estudos que dão conta da influência da chuva na velocidade desejada, na capacidade da via e na ocorrência de conflitos. Estes estudos são apresentados e discutidos nas subseções a seguir.

### 2.1.1 Redução da Capacidade

O termo capacidade tem sido utilizado para descrever um valor determinístico que representa o volume máximo suportado por uma rodovia. Embora esse conceito tenha evoluído ao longo do tempo, a praticidade que a utilização de um único valor representa para tal fim acaba se sobrepondo aos problemas que essa definição apresenta (BRILON et al, 2005).

O HCM (2016), tem tratado a capacidade de uma rodovia como sendo “a taxa máxima de fluxo horário sustentável na qual pessoas ou veículos podem razoavelmente atravessar um ponto ou uma seção uniforme de uma faixa ou estrada durante um determinado período de tempo, sob condições predominantes de faixa, ambiente, tráfego e controle”. Essa definição é bastante vaga, desconsiderando a influência que condições externas à rodovias e inconstantes provocam na capacidade. Além disso, o HCM não traz orientações sobre como a capacidade deve ser medida em uma rodovia (ELEFTERIADOU, 2014). Em sua versão mais recente, de 2016, foram acrescentadas a esta definição noções de capacidade que a relacionam com a ocorrência de *breakdown*.

As primeiras sugestões que dizem respeito à importância de não se utilizar um único valor para a capacidade foram feitas por Ponzlet (1996, apud BRILON et al, 2005). Nesse estudo foi sugerido o uso de valores de capacidade distintos para diferentes condições climáticas, períodos do dia e propósitos das rodovias. Em outros trabalhos foram observados diferentes valores de capacidade sob condições constantes (ELEFTERIADOU et al., 1995; LORENZ e ELEFTERIADOU, 2000; PERSAUD et al., 1998), os quais motivaram o estudo de Brilon et al. (2005), o qual introduziu uma análise probabilística da capacidade.

A definição mais atual de capacidade está diretamente ligada ao fenômeno do *breakdown*. Esse fenômeno pode ser entendido, em uma rodovia, como a queda de velocidade e volume resultante de um excesso de demanda que leva à transição do regime da rodovia de não-congestionado para congestionado. Uma vez que esse fenômeno ocorre em diferentes volumes, a capacidade passa a ser tratada como uma variável aleatória e seu valor a ser definido probabilisticamente. Ela pode ser relacionada a três períodos de interesse: (i) fluxo antes do *breakdown*, (ii) imediatamente antes do *breakdown* e (iii) fluxo observado durante o congestionamento. A escolha do período a ser avaliado depende dos propósitos de cada estudo (ELEFTERIADOU et al, 2006, apud ELEFTERIADOU, 2014).

### 2.1.1.1 Métodos de identificação de *breakdown*

Um método adequado para identificação da ocorrência de *breakdown* é decisivo para o sucesso de um estudo. Nessa seção são apresentadas as duas metodologias empregadas no estudo, dentre as quais a mais apropriada às características específicas do tráfego sob análise é escolhida.

#### **Brilon (2005)**

Como eventos de *breakdown* estão relacionados a uma redução significativa da velocidade, muitos estudos identificam eventos de *breakdown* por meio do estabelecimento de uma velocidade limite (ELEFTERIADOU, 2014). Considera-se que ocorreu *breakdown* em um período  $i$  quando a velocidade cai para um patamar abaixo desta velocidade limite no período  $i+1$ . Esse patamar pode ser estabelecido observando-se séries temporais de velocidade e volume da via e identificando-se quedas abruptas da velocidade a um patamar característico de fluxo congestionado. Utiliza-se como velocidade limite um valor que não é verificado durante situações de fluxo não-congestionado e que geralmente caracteriza a transição para um regime congestionado.

Para a realização dessa metodologia, dados de tráfego são agrupados em intervalos de tempo, dispostos em ordem cronológica e cada intervalo recebe uma classificação segundo a condição de tráfego de *breakdown* {B}, fluxo livre {F} ou estado de congestionamento {C}, de acordo com os seguintes critérios (BRILON et al., 2005):

{B}: o tráfego flui bem no intervalo de tempo  $i$ , mas a velocidade média cai para baixo da velocidade limite no período  $i+1$ , ou seja, ocorre o *breakdown*;

{F}: o tráfego flui bem nos intervalos de tempo  $i$  e  $i+1$ , indicando que a capacidade é maior que o volume observado em  $i$ .

{C}: o tráfego (i) está congestionado no intervalo de tempo  $i$ , ou seja, a velocidade está abaixo da velocidade limite ou; (ii) flui bem no intervalo  $i$  mas observa-se um *breakdown* no intervalo  $i$  e um detector a jusante registra congestionamento no intervalo  $i$  ou  $i-1$ . Nesse caso se considera que o *breakdown* decorreu da fila gerada pelo outro congestionamento, e não das condições de tráfego do detector analisado. Esses dados devem ser descartados pois não carregam informações sobre a capacidade.



Os dados de tráfego devem ser agrupados em intervalos de tempo pequenos, geralmente 1 a 5 minutos, para que seja possível perceber as flutuações do tráfego (BRILON et al., 2005). Brilon e Zurlinden (2003) concluíram que os dados de tráfego devem ser agregados em intervalos de 5 min para que essa metodologia produza bons resultados.

### **Lu e Elefteriadou (2013)**

Nessa metodologia o *breakdown* é definido como cinco ou mais intervalos consecutivos de 1 min com uma queda média de velocidade maior que 16 km/h (LU e ELEFTERIADOU, 2013). Dessa forma, dispensa-se o uso de uma velocidade limite, imposto pela metodologia anterior. Embora esses critérios tenham sido elaborados para o estudo da capacidade de rodovias antes e durante acidentes, propõe-se utilizá-los para o cálculo da probabilidade de *breakdown*. Três critérios são adotados para identificar corretamente esse fenômeno:

- (i) A diferença de velocidade entre dois minutos consecutivos é negativa;

$$\Delta S_i = S_i - S_{i-1} < 0$$

- (ii) A velocidade média durante os 5 minutos anteriores é maior que a velocidade média nos 5 minutos seguintes por ao menos 16 km/h;

$$\text{Média } \{S_{i-5}, \dots, S_{i-1}\} > \text{Média } \{S_i, \dots, S_{i+4}\} + 16\text{km/h}$$

- (iii) A máxima velocidade durante os 10 minutos seguintes é menor que a velocidade antes da queda de velocidade.

$$\text{Máx } \{S_i, \dots, S_{i+9}\} < S_{i-1}$$

Em comparação com o método anterior, esse método não visa classificar os intervalos de tempo em {F} ou {C}, apresentando apenas ferramentas para a classificação do intervalo *i* quando ocorre do *breakdown*, {B}. Intervalos com fluxos inferiores a 1000 veic/h/faixa foram excluídos dessa parte da análise por se considerar que não estariam representando eventos de *breakdown*, mas sim flutuações decorrentes da variabilidade de velocidades em momentos de fluxo livre.

### 2.1.1.2 Métodos de cálculo da probabilidade de *breakdown*

Embora possa parecer razoável, a frequência com que eventos de *breakdown* ocorrem não pode ser utilizada para o cálculo da probabilidade de *breakdown*. É preciso levar em conta a probabilidade de que um certo volume seja observado, o que demanda tratamento matemático mais avançado (ELEFTERIADOU *et al.*, 2011; GEISTEFELD e BRILON, 2009). Com base nisso, objetiva-se com esses métodos construir uma função de distribuição acumulada de capacidade,  $F_c(q)$ , a qual permita que se calcule a probabilidade de *breakdown* a partir do volume observado na via no intervalo  $i$ . Os métodos mais usuais utilizados para a construção dessa função são o Estimador Limite-Produto, ou Estimador de Kaplan-Meier, e o ajuste a uma distribuição acumulada de Weibull através do método de máxima verossimilhança. Existem poucos estudos em português tratando desse assunto, portanto nesse estudo será adotada a nomenclatura usada internacionalmente para designar esses métodos, quais sejam PLM (*Product Limit Method*) e Weibull, respectivamente.

#### **Product Limit Method**

O PLM é um método estatístico de estimativa de sobrevivência (Kaplan e Meier, 1958). Suas principais aplicações estão associadas à duração de componentes mecânicos e à medicina, onde são avaliadas as taxas de sobrevivência de pessoas apresentando quadros clínicos específicos ou quando submetidas a novos tratamentos. Analogamente, o interesse da Engenharia de Transportes nesse método se refere à formulação de uma curva de probabilidade de não ocorrência de *breakdowns* (*sobrevivência* do tráfego) em função do volume na via,  $S(q)$ , ou de sua complementar curva de probabilidade de ocorrência do *breakdown* (*morte* do tráfego),  $F_c(q) = 1 - S(q)$  (BRILON *et al.*, 2005; ELEFTERIADOU *et al.*, 2011).

Esse método se mostra bastante preciso para volumes baixos, sendo especialmente útil, por exemplo, para o cálculo da probabilidade de *breakdown* em uma rodovia sujeita a diferentes fluxos nos acessos (ELEFTERIADOU *et al.*, 2011). Nesses casos procura-se manter a probabilidade de *breakdown* em torno de 20% por meio de *ramp-metering*, técnica que visa controlar os volumes dos acessos com semáforos.

A função de sobrevivência descrita pelo PLM é dada por:

$$S(q) = \prod_{i:q_i \leq q} \frac{k_i - d_i}{k_i}, i \in \{B, F\} \quad (1)$$

em que  $q$ : fluxo (veic/h);

$q_i$ : fluxo no intervalo de tempo  $i$ (veic/h);

$k_i$ : número de intervalos de tempo com um volume  $q \geq q_i$ ;

$d_i$ : número de *breakdowns* com um fluxo  $q_i$ ;

$\{B, F\}$ : conjunto de intervalos onde ocorreu *breakdown* ou onde o fluxo era não-congestionado.

A função de distribuição acumulada de capacidade é então dada por:

$$F_c(q) = 1 - S(q) = 1 - \prod_{i:q_i \leq q} \frac{k_i - d_i}{k_i}, i \in \{B, F\} \quad (2)$$

Essa função acumula em um valor entre 0 e 1. Ela somente atingirá o valor 1 quando o maior volume da amostra,  $q_{\text{máx}}$ , corresponder a um evento pertencente ao conjunto  $\{B\}$ , acumulando em  $F_c(q_{\text{máx}}) < 1$ , caso contrário (BRILON; GEISTEFELDT; REGLER, 2005).

O desvio padrão da função de sobrevivência  $S(q)$  do PLM pode ser calculado pela fórmula (GREENWOOD, 1926):

$$\sigma_S(q) = S(q) \sqrt{\sum_{i:q_i \leq q} \frac{d_i}{n_i(n_i - d_i)}} \quad (3)$$

A partir do desvio padrão pode-se calcular o intervalo de confiança da função com:

$$F_c(q) - z_{\alpha/2} \cdot \sigma_S(q) \leq F_c(q) \leq SF_c(q) + z_{\alpha/2} \cdot \sigma_S(q) \quad (4)$$

em que  $z_{\alpha}$ : quantil de ordem  $\alpha$  da distribuição normal;

$\gamma$ : nível de confiança desejado.

### **Máxima Verossimilhança - Weibull**

Como a probabilidade de *breakdown* nem sempre acumula em 100% segundo o PLM, é impossível verificá-la para alguns volumes. Para dar conta deste problema, utiliza-se o método da máxima verossimilhança para ajustar uma distribuição acumulada de Weibull aos dados (BRILON *et al.*, 2005). A formulação deste método é a mesma apresentada na seção 2.1.2.

### **2.1.2 Influência da Chuva no Fluxo Livre**

As influências da chuva apontadas por outros autores, apresentadas nessa seção, evidenciam a importância de sua consideração em análises que visem utilizar as relações de velocidade e fluxo para calibração do simulador VISSIM. Além disso, a velocidade desejada é um dos parâmetros de entrada deste simulador, o qual não permite que se faça considerações com base em condições climáticas. Portanto, é de interesse prático e científico que sejam desenvolvidas metodologias que viabilizem a representação da chuva através da alteração da velocidade desejada.

O estudo de Brilon (1996) buscou identificar os fatores que influenciam a velocidade desejada de rodovias alemãs. Os principais fatores apontados foram luz do dia/noite e pavimento molhado, os quais representaram redução de 5 e 12 km/h na velocidade desejada e 500veic/h na capacidade em rodovias de três faixas, respectivamente. Nesse estudo, as estações meteorológicas se localizavam a distâncias entre 5 e 50km dos detectores de tráfego.

Chung *et al.* (2006) estudaram o efeito da chuva em rodovias da região metropolitana de Tóquio, Japão. Os dados meteorológicos foram coletados a partir de satélites e os dados de tráfego foram obtidos por meio de detectores instalados nas vias. Foram utilizados 2 anos de dados agregados a cada 5 minutos. Foram observadas reduções de 4 a 7% na capacidade com intensidade de chuva de 1mm/h e 14% com intensidade superior a 20mm/h. A redução da velocidade desejada variou entre 4,5 e 8,2% em relação a momentos de clima seco.

Kyte *et al.* (2001) estudaram as características da velocidade de uma rodovia em perímetro rural norte-americana. Foram avaliados os efeitos decorrentes de neve, chuva, pavimento úmido, vento e visibilidade. As maiores reduções de velocidade foram observadas sob neve intensa, variando entre 42 e 50km/h. A chuva intensa foi responsável pela redução de 7 a 10km/h da velocidade.

Caleffi *et al.* (2016) utilizaram um processo de clusterização para identificar a influência de condições climáticas na rodovia BR-290 na região metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, em segmento próximo do presente estudo. Foram apontadas reduções de 9 e 10km/h da velocidade desejada para chuvas fracas e fortes, respectivamente.

Yuan-Qing (2017) estudou a influência de condições meteorológicas adversas no tráfego de uma rodovia chinesa. Os dados de tráfego e chuva foram cruzados e ajustados ao modelo de Greenshields (1935). Foram constatadas reduções do fluxo máximo de 15,7%, 19,1% e 32,5% e na velocidade desejada de 4,4%, 7,3% e 10,6%, respectivamente, por conta de chuva leve, moderada e forte.

O método apresentado por Geistefeldt (2015) permite que a distribuição de velocidade desejada seja aferida a partir de dados coletados por meio de laços indutivos. Nesta metodologia utiliza-se um *headway* limite para classificar veículos como líder e seguidor e então construir as curvas de distribuição. O método foi testado no microssimulador VISSIM e apresentou resultados satisfatórios.

Para uma correta representação desta distribuição é importante que a velocidade desejada dos veículos seguidores também seja levada em conta. Contudo, a velocidade desenvolvida por eles não representa necessariamente sua velocidade desejada. Ao mesmo tempo, o simples uso das velocidades desenvolvidas pelos veículos líderes para a construção de uma distribuição a partir da frequência com que suas velocidades são observadas também não representa a velocidade desejada do tráfego como um todo. Por conta disso, o autor ressalta a importância de se utilizar uma abordagem matemática mais robusta do que simplesmente construir distribuições com base na frequência de observação e propõe o uso do ajuste à distribuição de Weibull para tal abordagem. A distribuição de Weibull é dada por

$$F_c(q) = 1 - e^{-\left(\frac{q}{\beta}\right)^\alpha} \quad (5)$$

em que  $F_c(q)$ : função de distribuição da capacidade;

$q$ : fluxo (veic/h);

$\alpha$ : parâmetro de forma;

$\beta$ : parâmetro de escala (veic/h).

Está função deve ser ajustada por meio de uma função de máxima-verossimilhança que leva em conta dados censurados (veículos desenvolvendo sua velocidade desejada) e não-censurados (veículos seguidores). A função de máxima-verossimilhança é dada por

$$L = \prod_{i=1}^n f_c(q_i)^{\delta_i} \cdot [1 - F_c(q_i)]^{1-\delta_i} \quad (6)$$

em que  $f_c(q_i)$ : função de densidade estatística da capacidade;

$F_c(q_i)$ : função de distribuição cumulativa da capacidade;

$n$ : número de intervalos de tempo;

$\delta_i$ : 1, se o intervalo contém um valor censurado;

$\delta_i$ : 0, se o intervalo contém um valor não-censurado.

Para fazer o ajuste, contudo, costuma-se utilizar a função de log-verossimilhança,  $L^*$ , uma vez que ela tem seu máximo com os mesmos parâmetros que a de máxima verossimilhança, mas é computacionalmente mais leve. Essa função é dada por:

$$L^* = \ln(L) = \sum_{i=1}^n \{\delta_i \cdot \ln[f_c(q_i)] + (1 - \delta_i) \cdot \ln[1 - F_c(q_i)]\} \quad (7)$$

No trabalho referenciado são apresentados 3 critérios para identificar os veículos censurados:

- (iv) Possuir um *headway* maior que  $t1$  em relação ao veículo imediatamente à jusante na mesma faixa;
- (v) Possuir um *headway* maior que  $t1$  em relação ao veículo imediatamente à jusante na faixa à esquerda, se existente;
- (vi) Possuir um *headway* maior que  $t2$  em relação ao veículo imediatamente a montante na faixa à esquerda, se existente.

Com o critério (i) busca-se identificar a ocorrência de fluxo livre a partir do *headway*, enquanto que os demais critérios visam dar conta da possibilidade de ultrapassagem nessa análise. Os valores utilizados por Geistefeldt (2015) são  $t1 = 2s$  e  $t2 = 4s$  para veículos leves e  $t1 = 3s$  para veículos pesados. O critério (iii) não foi utilizado para veículos pesados.

## 2.2 SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

Os avanços na tecnologia e a crescente complexidade das redes viárias urbanas e rurais criaram o ambiente propício para que simuladores de tráfego se tornassem ferramentas úteis e eficientes para a engenharia de tráfego. Esta ferramenta permite que se preveja o impacto de alterações na rede antes de elas serem realizadas, de modo que efeitos não previstos podem ser detectados e mitigados sem prejuízo (GOMES; MAY; HOROWITZ, 2004; PARK, B.; SCHNEEBERGER, 2003).

Simuladores são pré-calibrados para representar as características de uma localidade padrão, geralmente as do país ou continente onde foi produzido (PTV AG, 2011). Essas características são expressas por meio de parâmetros que representam as diversas características que os veículos, os motoristas e a própria infraestrutura possuem. Isso implica que modelos de simulação de tráfego precisam passar por um processo de calibração para que estes parâmetros reproduzam com fidelidade as características do local simulado (PARK, 2003; GOMES, 2004).

Simuladores de tráfego operam em 3 esferas: micro, meso e macro. (i) Microsimuladores se prestam a representar o comportamento individual de veículos, sendo amplamente utilizados para a análise de interseções isoladas com design diferenciado como rotatórias e acessos (ZECHIN; CYBIS; CALEFFI, 2016), medidas de gerenciamento ativo de tráfego (CALEFFI; CYBIS, 2013), rodovias de pista simples com possibilidade de ultrapassagens e transporte público. (ii) Mesossimuladores buscam representar pelotões de veículos, de modo que são bastante utilizados para otimização semaforica. Assim como os microsimuladores, esses simuladores são essencialmente voltados para fins de Engenharia de Tráfego. (iii) Macrossimuladores fazem uso de características macroscópicas do tráfego como fluxo, capacidade e densidade para a simulação de redes extensas, onde o desempenho individual dos veículos não é avaliado. Estes simuladores são bastante utilizados em planejamento de transportes, possuindo ferramentas e modelos de geração, distribuição e alocação de viagens embarcados.

O software VISSIM, microsimulador de tráfego, tem a capacidade de reproduzir o fenômeno *breakdown* (ELEFTERIADOU et al., 2011). Essa característica é fundamental para o estudo em questão, uma vez que os parâmetros de *car following* e *lane changing* também são sensíveis em situações de congestionamento. O regime congestionado de um segmento sucede o *breakdown*, portanto sua correta representação se faz crucial.

## 2.3 CALIBRAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

A correta representação do tráfego em um microssimulador sucede uma calibração devidamente feita. Por calibração entende-se a alteração de parâmetros chave que permitem que o *software* represente características como agressividade, velocidade desejada e *headway*. O VISSIM, microssimulador utilizado neste estudo, por exemplo, é distribuído a seus usuários com uma calibração padrão que representa razoavelmente o tráfego alemão. Contudo, até mesmo para a representação deste tráfego existem ressalvas, uma vez que alguns dos parâmetros, como as distribuições de aceleração desejada, foram elaboradas na década de 1980 e não necessariamente ainda possuem validade (PTV, 2017).

O VISSIM é um microssimulador com base estocástica, o que permite simular os comportamentos aleatórios observados no tráfego real. Por conta disso, métodos de otimização que utilizem as regras do Cálculo não podem ser aplicados, sendo necessário o uso de heurísticas que façam múltiplas avaliações da função objetivo para que se encontre uma solução ótima (MENNENI; SUN; VORTISCH, 2008). A heurística mais utilizada para isso é o algoritmo genético, o qual foi aplicado nesse estudo. A função objetivo escolhida foi a adequação da relação fluxo-velocidade simulada à observada em campo, medidas utilizando-se a distância de Hausdorff modificada, apresentada na seção 2.3.4.

### 2.3.1 Metodologias de calibração utilizadas por outros autores

Simuladores de trânsito como VISSIM geralmente são distribuídos com parâmetros de calibração padrão, condizentes com características de trânsito específicas da região onde são desenvolvidos. Sua calibração é necessária para que se atinja os objetivos específicos de um estudo, podendo implicar no uso de parâmetros diferentes dos parâmetros padrão.

Caleffi (2018) aponta que os simuladores de tráfego devem ser especialmente calibrados em cenários brasileiros por conta da agressividade dos motoristas. Em seu estudo, foi utilizada a métrica de erro percentual absoluto médio (MAPE) para encontrar uma combinação de parâmetros que melhor ajustasse as relações fluxo-velocidade observadas na rodovia com as simuladas. O MAPE também foi aplicado para uma calibração por meio de conflitos de trânsito.

Bethonico et al. (2016) propuseram uma metodologia para calibração do microssimulador VISSIM por meio de algoritmo genético. O cenário escolhido foi a rodovia SP-201 e se fez uso



de dados coletados por estações de monitoramento para a geração de modelo base. No estudo foi feita a calibração conjunta dos parâmetros de *car-following* e *lane-change*, as distribuições de velocidade desejada dos veículos e um processo para geração do congestionamento. A comparação dos dados coletados na via com os dados gerados pelo algoritmo genético indicou erros dentro uma margem satisfatória, validando o modelo.

Siddharth (2013) utilizou algoritmo genético para a calibração de um modelo de interseção em perímetro urbano no software VISSIM. A interseção está localizada em Chennai, Índia, de modo que se fazem necessárias modificações nos parâmetros padrão do simulador para que as características de heterogeneidade do tráfego indiano sejam corretamente representadas. O autor cita que a calibração automatizada permitiu que muitos esforços manuais fossem poupados.

Menneni et al. (2008) desenvolveram uma metodologia de calibração para o VISSIM com base na correspondência entre gráficos de velocidade-fluxo obtidos com dados de campo e de simulações. Medidas de dissimilaridade foram usadas como função objetivo de um algoritmo genético e comparadas com funções objetivos mais simples, como fluxo máximo e fluxo máximo sustentado por 15 minutos.

Zhizhou et al. (2005) utilizaram algoritmo genético para a otimização de um modelo da autoestrada chinesa Norte-Sul, em Shanghai. Os autores concluíram que a metodologia empregada produziu resultados semelhantes aos obtidos em campo e que os motoristas chineses possuem comportamento mais agressivo que o apresentado por padrão pelo simulador.

Com base nos estudos apresentados, optou-se por utilizar o algoritmo genético como mecanismo de busca por uma solução que permita simular corretamente o tráfego. Este método tem como vantagens ser bastante ajustável às necessidades de cada estudo, possuir rápida convergência quando comparado a outros métodos e ter sido utilizado com sucesso por outros autores.

### **2.3.2 Algoritmo genético**

Algoritmo genético é um algoritmo de busca de soluções para problemas matemáticos baseado na teoria da evolução (GOLDBERG, 1989). A lógica do algoritmo é estabelecer analogias entre os sujeitos e agentes presentes na teoria da evolução, e o problema que se busca solucionar.

Por meio do algoritmo genético busca-se encontrar uma solução para o problema através do decorrer de um número especificado de gerações. As características dos indivíduos que integram a solução são representadas, por exemplo, por uma lista que contenha os valores de parâmetros que se deseja avaliar, o que equivale a um cromossomo na teoria da evolução. Os indivíduos são avaliados com base nesses parâmetros para que se saiba o quão bom cada um é frente aos demais. O valor resultante da função que descreve quão bom um indivíduo é se chama *fitness*. Além disso, um bom *fitness* pode ser tanto um *fitness* alto quanto um baixo, a depender se o problema em questão é de maximização ou minimização.

Assim como na teoria da evolução, espera-se que os melhores indivíduos de cada geração sobrevivam e reproduzam. A sobrevivência de um indivíduo pode ser determinística – apenas os  $n$  melhores indivíduos sobrevivem – ou probabilística – quanto melhor o *fitness* de um indivíduo, maior a probabilidade de que seja escolhido. A reprodução é a geração de novos indivíduos com base na combinação dos cromossomos de indivíduos diferentes. Este processo, por sua vez, é chamado de *crossover*. Além disso, novos indivíduos podem sofrer mutação, a qual visa alterar alguns dos parâmetros dos indivíduos. A alteração dos parâmetros por meio de mutação tem como objetivo inserir novas características aos indivíduos, as quais dificilmente seriam alcançadas através da recombinação dos indivíduos existentes.

Existem muitas maneiras de abordar e representar cada uma dessas etapas, uma vez que cada problema demanda operações específicas. O livro de Goldberg (1989) apresenta de forma detalhada diversas formas de se abordar esse problema, de modo que a apresentação desse detalhamento será suprimida deste trabalho. A metodologia utilizada neste trabalho é detalhada na seção 3.9.3. A discussão da medida de *fitness*, contudo, é bastante pertinente para o problema e é apresentada na seguinte subseção.

### **2.3.3 Fitness**

Medidas de *fitness* são utilizadas para mensurar o quão bem um modelo representa um objetivo específico. Dentro do contexto de simulações de tráfego, ele representa quanto uma simulação representa o tráfego real. Essa medida varia em função dos valores dos parâmetros de calibração utilizados pelo simulador, podendo ser mais sensível a alguns deles. Quando se simula uma região congestionada, por exemplo, é natural esperar-se que parâmetros como agressividade e distância média entre veículos parados sejam mais influentes.

O *fitness* pode ser apresentado de diversas formas, variando de acordo com o cenário a ser calibrado e os objetivos específicos que se possui com o estudo. A seguir são apresentadas as principais medidas de *fitness* utilizadas no contexto de calibração de modelos de microsimulação de tráfego.

### 2.3.3.1 GEH

O teste GEH, cuja sigla advém do nome de seu criador, Geoffrey E. Havers, é um teste semelhante ao qui-quadrado, porém de natureza empírica. É utilizado para comparar duas amostras de volumes, uma real (medida em campo) e outra simulada, se mostrando aplicável a uma grande variedade de situações (UK Department of Transport, 1996 apud MORIDPOUR et al., 2012). A expressão do GEH é dada por:

$$GEH = \sqrt{\frac{2(E - O)^2}{(E + O)}} \quad (8)$$

Onde:

E = Volume de tráfego estimado a partir do modelo;

O = Volume de tráfego observado em campo.

Como o teste GEH não é um teste verdadeiramente estatístico, possui sua própria escala de aceitação. Para a avaliação dos fluxos de segmentos individuais, considera-se válido o modelo com  $GEH < 5$  para ao menos 85% dos casos. Além disso, a soma dos fluxos de todos os segmentos deve apresentar  $GEH < 4$  (FHWA, 2007).

Yu (2017) utilizou o teste GEH como medida de *fitness* para a calibração de um modelo de microsimulação construído no VISSIM. O cenário escolhido foi a rodovia I-F, Los Angeles, Califórnia, e a otimização foi feita por meio de algoritmos metaheurísticos. Houve convergência nos resultados obtidos por meio do GEH e das demais funções de *fitness* utilizadas.

Karakikes (2017) realizou a calibração de um modelo de microsimulação no VISSIM que representou uma rede de rodovias da região do estado da Bavária, Alemanha. O uso combinado de GEH e algoritmo genético foi essencial, uma vez que a rede representada era bastante extensa. Isso se deve ao fato de que o teste GEH apresenta um critério de aceitação tanto para

rede como para segmentos individuais. A metodologia utilizada se mostrou efetiva, atingindo bons resultados em 96,5% dos intervalos criados.

#### 2.3.3.2 Tempo de Viagem

Em engenharia de tráfego tempo de viagem se refere ao tempo necessário para que um veículo percorra o caminho compreendido entre dois pontos pré-determinados de uma rede viária, sendo uma medida bastante utilizada para aferições diversas nessa área. Sua utilização não se restringe à simulação de tráfego, sendo amplamente utilizada para avaliar o impacto de intervenções diretas no tráfego como medidas de gerenciamento ativo de tráfego (CALEFFI et al., 2013; CARLSON; PAPAMICHAIL; PAPAGEORGIOU, 2010; PAPAGEORGIOU; BLOSSEVILLE; HAJ-SALEM, 1990; ZECHIN; CYBIS; CALEFFI, 2016).

Esse critério é bastante difundido, uma vez que é de fácil e barata obtenção, e confere alto grau de precisão. Em rodovias essas características são ainda mais evidentes, uma vez que as trajetórias dos veículos não possuem a variabilidade observada no ambiente urbano. Sua aplicação na calibração de modelos de rodovias de múltiplas faixas tem sido apenas complementar, visto que tempos de viagem equivalentes podem ser obtidos a partir de combinações diferentes de valores dos parâmetros de calibração. Por conta disso, utiliza-se o tempo de viagem como medida de *fitness* auxiliar, de modo a aumentar a robustez das análises.

#### 2.3.3.3 Relação fluxo-velocidade

A relação fluxo-velocidade é comumente utilizada para a calibração de simulações de tráfego rodoviário e permite que sejam avaliados aspectos como os regimes de fluxo livre e congestionado, bem como o regime de transição entre eles. Além disso, a capacidade e a velocidade desejada também podem ser aferidas. Dessa forma espera-se que os parâmetros de calibração obtidos por meio dessa medida sejam mais próximos aos valores reais do que os encontrados com medidas mais simples, como o tempo de viagem, que inferem poucas características do tráfego.

A comparação entre a relação fluxo-velocidade simulada e a real tem sido abordada de diferentes maneiras. A maneiras mais usuais se iniciam com a agregação dos dados de fluxo e velocidade em intervalos fixos e geralmente iguais a 5 minutos. A partir desse ponto, as abordagens passam a se diferenciar. Em alguns estudos os dados são coletados por vários dias e cada intervalo de 5 minutos é plotado de modo a se criar uma nuvem de dados. Essa nuvem é

então comparada à mesma nuvem obtida no simulador de tráfego através de medidas como a Distância Modificada de Hausdorff (BETHONICO, 2016; MENNENI; SUN; VORTISCH, 2008) ou dividida em quadrantes e comparada por medidas como a média dos valores médios de cada quadrante (CALEFFI, 2018).

Uma vez que a região estudada possui características de tráfego rodoviário e se possui dados de fluxo e velocidade, optou-se por utilizar a relação fluxo-velocidade nesse estudo. A comparação com os dados reais foi feita por meio da Distância de Hausdorff Modificada.

### 2.3.4 Distância modificada de Hausdorff

A distância de Hausdorff fornece a máxima mínima distância entre os pontos de dois conjuntos de dados em um plano bidimensional. É uma medida bastante utilizada no reconhecimento de imagens, também sendo aplicável à comparação de gráficos de nuvens de pontos (BETHONICO, 2016; HUTTENLOCHER; RUCKLIDGE; KLANDERMAN, 1992).

Em sua formulação original, a distância de Hausdorff é bastante sensível a *outliers*, que podem distorcer os resultados e inviabilizar sua utilização (ZHAO et al., 2005 apud BETHONICO, 2016). Dubuisson e Jain (1994) propuseram a distância de Hausdorff modificada (MHD), a qual se refere à média das mínimas distâncias entre os dois conjuntos de pontos. Dessa forma, os efeitos negativos decorrentes da existência de *outliers* são minimizados ao passo que a amostra aumenta.

Dados dois conjuntos de pontos  $A = a_1 + a_2, \dots, a_n$  e  $B = b_1 + b_2, \dots, b_n$ , os quais se queriam comparar a disposição dos pontos, a média das mínimas distâncias dos pontos do conjunto A em relação aos pontos de um conjunto B é dada por:

$$h_{MHD}(A, B) = \frac{1}{n_a} \sum_{i=1}^{n_a} d(a_i, B) \quad (9)$$

Analogamente, a média das mínimas distâncias dos pontos do conjunto B em relação aos pontos de um conjunto A é dada por:

$$h_{MHD}(B,A) = \frac{1}{n_b} \sum_{i=1}^{n_b} d(b_i, A) \quad (10)$$

Note-se que as formulações apresentadas não necessariamente retornam o mesmo valor, uma vez que um mesmo ponto pode ser o ponto mais próximo a mais de um ponto do conjunto comparado. A distância de Hausdorff modificada é, então, o máximo entre as duas médias apresentadas, de modo que:

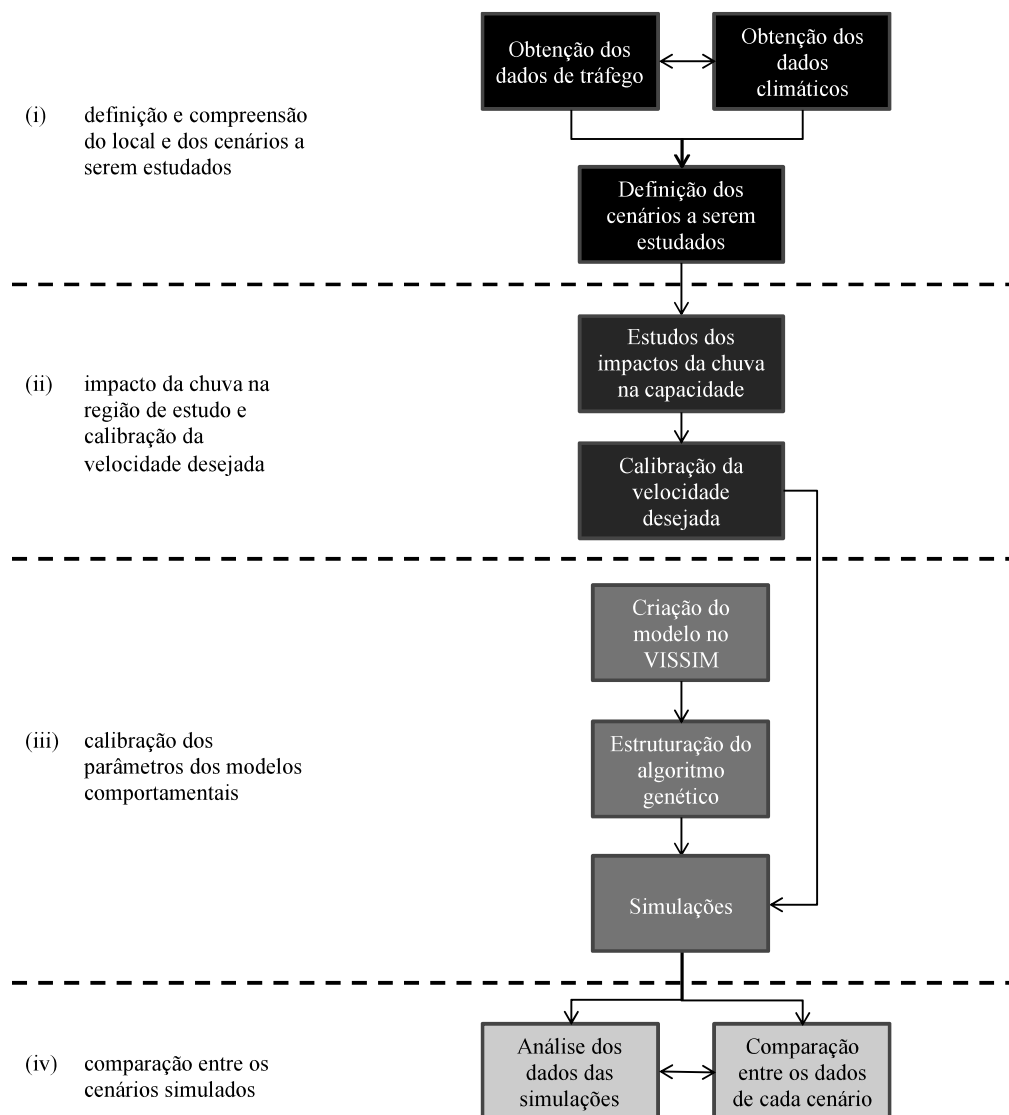
$$H_{MHD}(A, B) = \max [h_{MHD}(A, B), h_{MHD}(B, A)] \quad (11)$$

Bethonico (2016) utilizou a distância de Hausdorff modificada para comparar nuvens de fluxo-velocidade de veículos a fim de realizar a calibração de um modelo de microsimulação no software VISSIM.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho segue a seguinte estrutura: (i) definição e compreensão do local e dos cenários a serem estudados, (ii) impacto da chuva na região de estudo e calibração da velocidade desejada, (iii) calibração dos parâmetros dos modelos comportamentais, (iv) comparação entre os cenários simulados. A estrutura metodológica é apresentada na seguinte figura:

Figura 2 - Estrutura da metodologia



Fonte: elaborado pelo autor.

### 3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O estudo foi realizado a partir de dados pluviométricos e dados de tráfego do km 94 da rodovia BR-290, distante 5km do centro de Porto Alegre – RS, de 2016 e 2017. A região estudada se encontra próxima à ponte que liga Porto Alegre a Guaíba e é a principal via de ligação entre Porto Alegre e as cidades periféricas que compõem sua região metropolitana.

Figura 3 - Região estudada

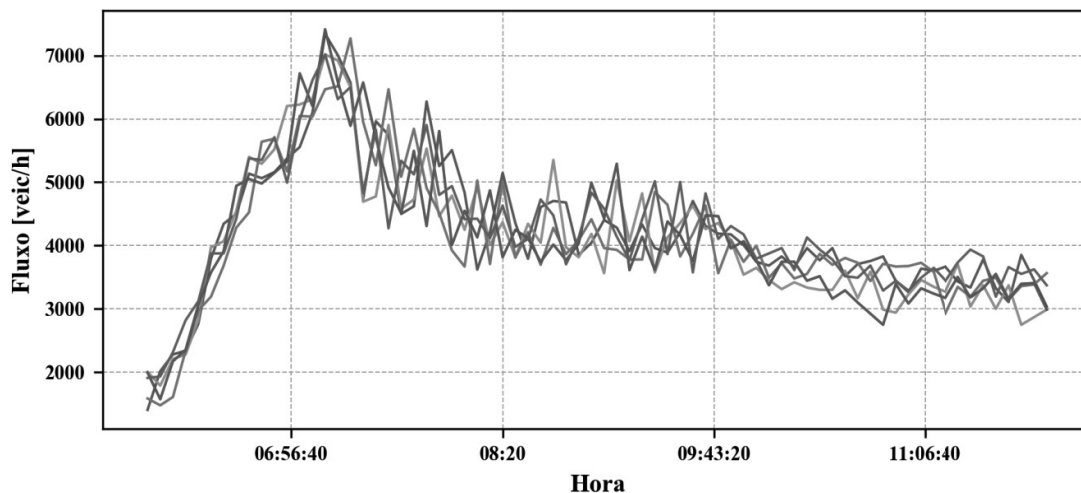


Fonte: editado de Google Earth.

O sentido da via estudado foi o Interior – Capital (Região Metropolitana para Porto Alegre), no qual se observa concentração do fluxo de veículos no período da manhã em função do descolamento dos moradores da região metropolitana para trabalhar em Porto Alegre e Guaíba. A região apresenta congestionamentos diários relacionados aos gargalos existentes nas aproximações do centro de Porto Alegre e ao içamento da ponte do Guaíba. A Figura 4 ilustra o perfil de fluxo da manhã de alguns dias típicos.



Figura 4 - Perfil de fluxo típico do segmento. As cores se referem a dias distintos.



Fonte: elaborado pelo autor.

## 3.2 OBTENÇÃO DOS DADOS

### 3.2.1 Dados de tráfego

A BR-290 possui mais de 700km de extensão, ligando as cidades Osório, próxima ao litoral do Rio Grande do Sul, e Uruguaiana, cidade fronteiriça entre Brasil e Argentina. No km94, localidade do estudo, a rodovia possui 5 faixas.

Os dados de tráfego utilizados no estudo foram concedidos pela Triunfo Concepa, concessionária deste trecho da rodovia à época do estudo. Foram disponibilizados dados referentes a 2 anos de tráfego, coletados por meio de laços indutivos nas 5 faixas de rolamento do sentido Interior – Capital. Os dados são desagregados, apresentando data e horário da passagem de cada veículo com precisão de décimo de segundo, velocidade com precisão unitária, comprimento do veículo, classificação do veículo (leve e pesado) e faixa de rolagem.

Os detectores estão localizados 200m a montante de uma bifurcação da rodovia; as 3 faixas à esquerda passam a se chamar Avenida Castello Branco e seguem em direção ao centro de Porto Alegre e as 2 faixas à direita dão origem ao acesso a Ponte do Guaíba com duas faixas e a uma saída lateral, que é comumente utilizada como um desvio em momentos de congestionamento. Existem 3 acessos à rodovia a jusante dos detectores: um deles na alça de acesso à ponte e os demais a 1,1 e 1,4km na Avenida Castello Branco.

### 3.2.2 Dados pluviométricos

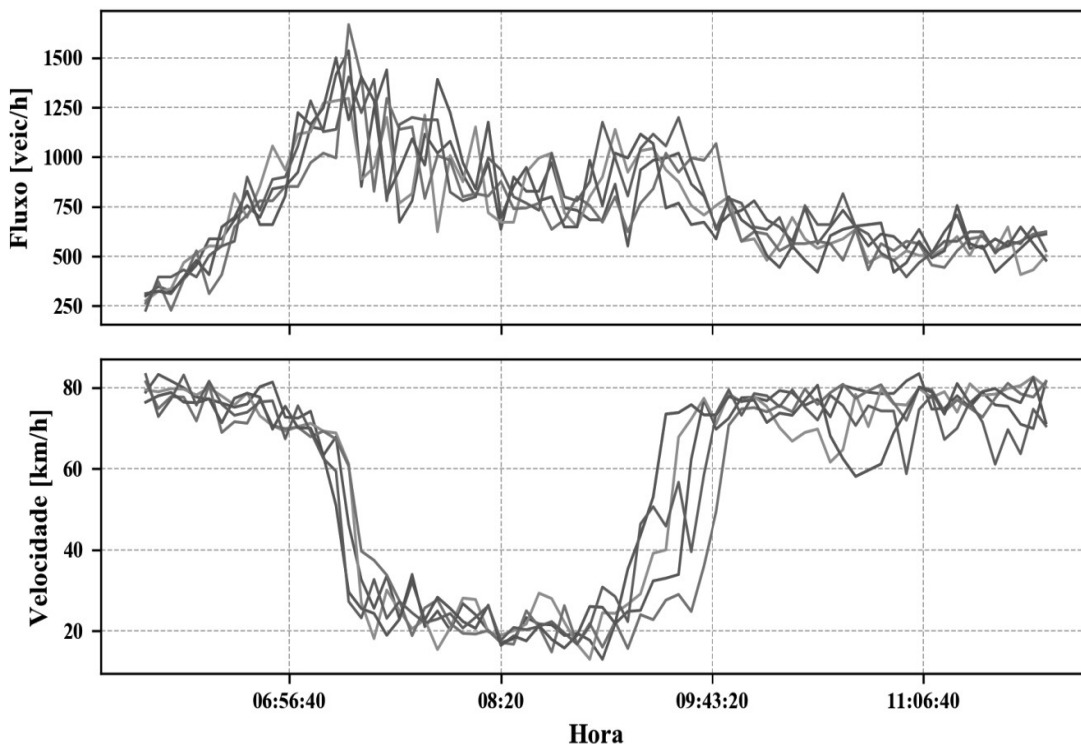
Os dados pluviométricos foram obtidos a partir do banco de dados do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). O pluviômetro utilizado se localiza a 1,5km de distância dos detectores de tráfego. Brilon e Ponzlet (1996) utilizaram pluviômetros localizados de 5 a 50km de distância dos detectores em estudo semelhante e obtiveram resultados satisfatórios.

Os dados foram obtidos a partir da plataforma online do CEMADEN. Na plataforma, seleciona-se uma cidade e um mês para obtenção dos dados e se recebe via *e-mail* um arquivo *.csv* com dados de todos os pluviômetros disponíveis na cidade no período selecionado. A frequência de leitura varia de 10min a 1h, conforme as condições climáticas presentes. Foram requeridos dados referentes aos anos de 2016 e 2017.

### 3.3 DEFINIÇÃO DO PERÍODO DE ESTUDO

A região estudada apresenta congestionamentos recorrentes em função dos altos volumes decorrentes de viagens iniciadas na região metropolitana de Porto Alegre com direção ao centro da cidade. Como neste estudo se objetiva calibrar o simulador a partir da nuvem de velocidade-fluxo, o perfil de velocidades e fluxos ao longo do dia foi analisado com o intuito de se selecionar um espaço de tempo adequado para as análises. Observou-se congestionamentos com duração próxima a 3h pela manhã (entre 7h e 10h, aproximadamente), portanto utilizou-se o período entre 5h e 12h para que os regimes de fluxo livre e congestionado possuíssem duração equivalente, minimizando a diferença de peso que um deles apresentaria nos resultados. São apresentados na Figura 5 os perfis de velocidade e fluxo ao longo de manhãs típicas do trecho.

Figura 5 - Perfis de velocidade e fluxo típicos da faixa à esquerda. As cores se referem a dias distintos.



Fonte: elaborado pelo autor.

Além da escolha do período do dia, foi feita uma seleção do período da semana desejável para o estudo. Utilizou-se apenas os dias de meio de semana, uma vez que grande parte dos fluxos de fim de semana se referem a viagens realizadas com origem no litoral do estado do Rio Grande do Sul (CALEFFI, 2018), cujos motoristas não necessariamente representam o tráfego cotidiano do trecho sob análise. Não foram utilizados filtros com relação ao período do ano, contudo foram removidos períodos onde se observou mal funcionamento dos detectores, representando cerca de 20% do período de análise.

### 3.4 DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS DE ESTUDO

Usualmente o simulador VISSIM é calibrado com dados de tráfego obtidos sob condições climáticas ideais. Dados obtidos à noite e sob chuva usualmente são descartados por serem considerados atípicos para a determinação do comportamento geral da rodovia. O objetivo deste trabalho se concentra justamente em calibrar o simulador VISSIM para diferentes intensidades

de chuva sob a premissa de que o comportamento geral do trânsito é alterado sob estas condições.

Os dados de tráfego foram concatenados aos dados pluviométricos e então foram criados grupos de dados com base em intervalos de intensidade de chuva. Foram utilizados intervalos menores para intensidade de chuva menores, uma vez que se espera que as maiores diferenças ocorram com baixa intensidade de chuva. Os intervalos resultantes desse processo são apresentados na seguinte tabela.

Tabela 2 - Cenários a serem calibrados

Cenário	Intensidade de Chuva
0	0mm/h
1	0,5-1,3mm/h
2	1,3-4mm/h
3	4-20mm/h

Dados referentes a intensidades de chuva entre 0 e 0,5mm/h foram descartados, uma vez que nesse intervalo observou-se comportamento semelhante ao sob tempo seco. Além disso, o pluviômetro utilizado possui discretização mínima de 10 minutos e chuvas nessa faixa de intensidade estão relacionadas ao início e ao fim da chuva. Dessa forma, utilizando-se este intervalo, pode-se estar avaliando uma situação que apresente chuva e tempo seco simultaneamente.

O estudo de Brilon e Ponzlet (1996) indica influência de pavimento úmido sobre o tráfego, contudo não se dispunha dessa informação e esse efeito não foi considerado. Para mitigar os efeitos negativos de pavimento úmido, utilizou-se apenas dados de tráfego com clima seco que não sucedessem chuvas no Cenário 0.

### 3.5 INFLUÊNCIA DA CHUVA NA CAPACIDADE DA VIA

A influência da chuva sob a capacidade, a qual está intimamente ligada à probabilidade de ocorrência de *breakdown*, foi avaliada conforme elaborado na seção 2.1.1 como forma de se constatar a influência da chuva no tráfego da região de estudo. Primeiramente foram avaliados

os métodos de Brilon (2005) e Lu e Elefteriadou (2013) para identificação do *breakdown*. O método mais adequado para a realização do estudo foi escolhido e então foram geradas curvas de probabilidade de ocorrência de *breakdown* com os métodos PLM e ajuste à distribuição de Weibull.

### 3.6 CONSTRUÇÃO DO MODELO NO VISSIM

De posse dos dados de tráfego e clima, foi criado um modelo no software VISSIM do local onde os detectores se localizam. O modelo compreende toda a rede que circunda os detectores, de modo que seja possível representar os congestionamentos decorrentes do aumento do fluxo de veículos e das inserções existentes na rodovia.

#### 3.6.1 Modelagem da rede viária

A modelagem abrangeu os trechos 2km a montante e 4km a jusante dos detectores utilizados na calibração e as entradas e saídas da simulação se localizam em trechos homogêneos. Isso permite que os efeitos indesejados decorrentes da acomodação do trânsito nas entradas e saídas da simulação não sejam percebidos na região dos detectores e que as peculiaridades do cenário decorrentes da geometria do trecho sejam bem contempladas.

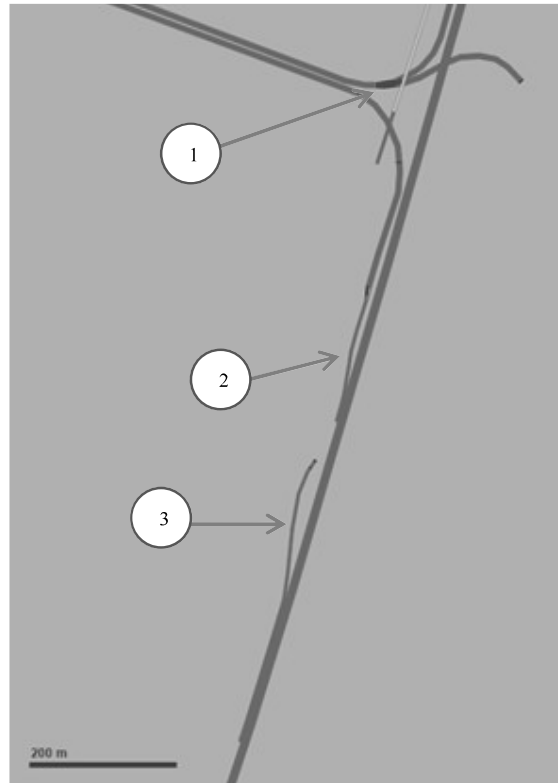
Os volumes de tráfego utilizados nas simulações foram obtidos a partir dos volumes médios observados nos detectores em intervalos de 5min. Embora os *inputs* da simulação estejam localizados 2km a montante dos detectores, os volumes observados no detector foram utilizados para que características do trânsito, como a formação de filas, fossem preservadas. As rotas puderam ser inferidas a partir de detectores instalados recentemente na região a jusante dos detectores utilizados no estudo onde ocorre a segregação do tráfego em 6 faixas.

#### 3.6.2 Representação do congestionamento

Os congestionamentos observáveis na via decorrem da existência de 4 gargalos a jusante dos detectores. A correta representação destes gargalos é fundamental para que se reproduza no simulador as condições congestionadas, às quais estão relacionadas com alguns dos parâmetros de calibração do modelo de *car-following* de Wiedemann 99, utilizado nas simulações deste estudo.

Três desses gargalos são rampas de acesso à rodovia e puderam ser corretamente representados em função da disponibilidade dos volumes observados nestas rampas. Estes gargalos foram numerados e apresentados na Figura 6.

Figura 6 - Gargalos 1 a 3



Fonte: elaborado pelo autor.

O outro gargalo se localiza na inserção da rodovia ao perímetro urbano do centro de Porto Alegre, idealmente demandando que interações complexas como cruzamentos e semáforos sejam simuladas. Contudo, esse gargalo se encontra a 4km de distância dos detectores e, como essa é uma distância grande para os padrões da microssimulação tráfego, optou-se por simplificá-lo. Para isso, foram inseridos redutores de velocidade que emulassem a velocidade desenvolvida pelos veículos durante os horários de pico.

Estas considerações permitiram que os congestionamentos fossem representados de forma coerente frente aos observados em campo. Esta validação é feita visualmente, uma vez que o simulador não está, *a priori*, calibrado.

### 3.7 SELEÇÃO DOS PARÂMETROS PARA CALIBRAÇÃO

Existem diversos parâmetros no software VISSIM que alteram o comportamento dos veículos simulados, alterando a nuvem de fluxo-velocidade resultante da simulação. O software é comercializado com valores padrão para todos esses parâmetros, resultando em uma representação aproximada das características de tráfego europeias. Como as características de tráfego brasileiras diferem das europeias, se faz necessária a calibração do modelo. No entanto, para que a calibração seja feita correta e eficientemente, é necessário que os parâmetros mais influentes no modelo sejam identificados, e isso é feito por meio de uma análise de sensibilidade.

O manual do software VISSIM (PTV, 2017) sugere que modelos de microsimulação que visam representar o comportamento de rodovias usem o modelo de *car following* de Wiedemann 99. Juntamente com o parâmetro *safe distance for lane changing* (distância segura para troca de faixa) do modelo de troca de faixas utilizado pelo simulador e velocidade desejada, esses parâmetros são notoriamente os mais utilizados para determinar as características de tráfego. Portanto o processo de calibração apresentado se concentra em duas frentes: (i) calibração da velocidade desejada para cada um dos cenários climáticos, utilizando a metodologia de Geistefeldt (2015) e (ii) calibração dos parâmetros de *car-following* e troca de faixas, também para cada um dos cenários, por meio de algoritmo genético. Estes processos são descritos nas duas próximas seções.

### 3.8 CALIBRAÇÃO DA VELOCIDADE DESEJADA

A velocidade desejada é um parâmetro de calibração fundamental para o microsimulador VISSIM, embora não seja componente dos modelos de *car-following* e troca de faixas. A partir de uma distribuição de probabilidade acumulada fornecida, o VISSIM atribui valores de velocidade desejada a cada um dos veículos, emulando a variabilidade observada em uma rodovia real.

A distribuições de velocidade desejada foram elaboradas com base no trabalho de Geistefeldt (2015), conforme exposto na seção 2.1.2. Foram elaboradas distribuições diferentes para veículos leves e pesados, bem como para cada uma das faixas da rodovia e grupo de intensidade de chuva.

A metodologia de Geistefeldt foi testada e algumas adaptações precisaram ser feitas. Os valores utilizados por ele foram testados e alterados, submetendo-se as distribuições resultantes a simulações até que se encontrasse uma configuração adequada. Uma configuração adequada foi obtida utilizando-se valores de *headway* limite  $t_l = 3s$  para veículos leves e  $t_l = 4s$  para veículos pesados. As avaliações que levam em conta as faixas ao lado se mostraram malélicas em todos os testes utilizados e esta abordagem foi descartada, mantendo-se apenas a classificação de estado fluxo livre com base no veículo a frente na mesma faixa. Os dados foram então ajustados à distribuição de Weibull, gerando as distribuições que foram inseridas no VISSIM.

### 3.9 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS COMPORTAMENTAIS – ALGORITMO GENÉTICO

A calibração do simulador foi feita por meio de um algoritmo genético. O algoritmo genético é uma heurística que utiliza os mecanismos da seleção natural darwiniana para encontrar soluções para problemas diversos.

O algoritmo se inicia a partir da criação de uma geração de indivíduos aleatórios, os quais se reproduzem, sofrem mutações e são predados por um número determinado de gerações. Quanto melhor for o indivíduo, maiores as chances de que suas características genéticas sejam transmitidas para as próximas gerações. O índice que mede o quão bem adaptado um indivíduo é chamado *fitness*.

Neste estudo, um indivíduo é um conjunto de *multi-runs* (simulações do mesmo cenário com sementes aleatórias diferentes) e suas características genéticas são os valores dos parâmetros de calibração utilizados pelo simulador nessas simulações. Este indivíduo precisa apresentar *fitness* elevado para que suas características sejam transmitidas. O *fitness* é representado pelo valor de um índice que mede o quão bem ajustada a nuvem velocidade-fluxo resultante da simulação está em relação à nuvem velocidade-fluxo dados coletados em campo.

#### 3.9.1 Medida de fitness

A medida de *fitness* define o quão bem adaptado um indivíduo está. A Distância de Hausdorff Modificada é uma das principais medidas de *fitness* utilizadas para a calibração de modelos de autoestradas com múltiplas faixas utilizando algoritmo genético. Esta medida busca



quantificar o quanto duas nuvens de dados estão bem ajustadas a partir do máximo entre a distância média dos pontos de uma em relação aos da outra. A demonstração deste método é apresentada na seção 2.3.4.

Para as calibrações feitas neste estudo, foram utilizados os dados de laços indutivos para a geração de nuvens de velocidade-fluxo para cada uma das faixas da via agregando-se os dados a cada 5min. Laços indutivos virtuais foram inseridos nos modelos de simulação na mesma posição, de modo que as mesmas nuvens fossem geradas.

O trecho onde se encontram os detectores possui 5 faixas e fica próximo à alça de acesso a uma ponte. A jusante dos detectores, as 3 faixas à esquerda dão sequência à rodovia, enquanto que as duas à direita contemplam a alça de acesso à ponte e uma saída lateral bastante utilizada nos horários de pico. Por conta dessa configuração, observou-se que os detectores das faixas 4 e 5 apresentam características de fluxo interrompido, de modo que o uso da nuvem de velocidade-fluxo gerada por eles prejudica a composição de um *fitness* para a simulação e não foram analisadas. A Figura 7 ilustra esta configuração.

Figura 7 - Detalhe da região dos detectores



Fonte: Google Earth.

A medida de *fitness* de cada indivíduo utilizada no algoritmo genético foi inicialmente adotada como sendo a média entre a Distância de Hausdorff Modificada das faixas 1, 2 e 3. Contudo, a diferença entre o *fitness* dos indivíduos é pequena em relação à magnitude dessa medida, e as etapas do algoritmo que utilizam o peso relativo dos indivíduos frente à geração que o compõe são prejudicadas. Portanto foi utilizada a metodologia apresentada por Bethonico (2016) para que a importância dos indivíduos com melhor *fitness* fosse maior. Este método consiste aplicar uma função exponencial ao valor da medida, o que também permite transformar

o problema em um problema de maximização. Finalmente, a fórmula utilizada para compor o *fitness* do indivíduo fica

$$fitness = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Ae^{-MHD_i B} \quad (12)$$

em que *fitness*: *fitness* do indivíduo;

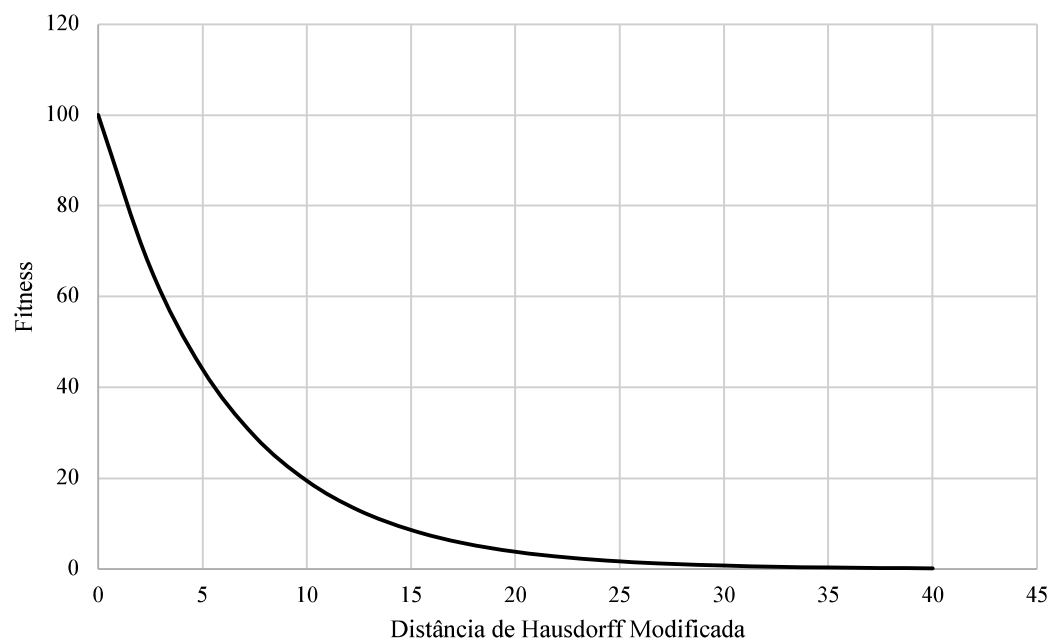
*n*: número de faixas;

*MHD<sub>i</sub>*: Distância de Hausdorff Modificada da faixa *i*;

A e B: parâmetros de forma da função.

Neste estudo tem-se que *n*=3 e foram adotados A=100 e B=1,683. Valores típicos de MHD variaram entre 10 e 30. Na Figura 8 é apresentada a forma da função de *fitness* adotada.

Figura 8 - Fitness x Distância de Hausdorff Modificada



Fonte: elaborado pelo autor.

### 3.9.2 Geração dos alelos

Os cromossomos são as estruturas que carregam todo o material genético dos indivíduos. Eles possuem segmentos chamados alelos, que carregam um conjunto de informações que inferem características específicas ao indivíduo. Além disso, cromossomos podem possuir um ou dois braços dependendo do ser que compõem.

Neste estudo o cromossomo de cada indivíduo, ou simulação, possui apenas um braço e 6 alelos. O cromossomo é representado por um objeto do tipo *lista* em linguagem de programação *Python* e os alelos são os valores dos parâmetros de calibração do simulador VISSIM utilizados por esta simulação.

O microssimulador VISSIM utiliza como padrão parâmetros de calibração aferidos em estudos realizados na Alemanha. Por conta das diferenças comportamentais e entre os veículos existentes entre Brasil e Alemanha, é necessário que alguns parâmetros sejam calibrados para que cenários brasileiros sejam corretamente simulados (BETHONICO, 2016; CALEFFI, 2018).

Os principais parâmetros a serem calibrados se referem aos utilizados pelos modelos de *car-following* e de troca de faixas utilizados pelo simulador. O modelo de *car-following* de Wiedemann 99 foi utilizado deste estudo, sendo aconselhado pelo manual do VISSIM para a simulação de autoestradas. Os parâmetros de calibração utilizados, bem como o modelo que compõem, seus valores limites e o tipo de variável são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 3 - Parâmetros de calibração do VISSIM

	Valor padrão	Limite Inferior	Limite Superior	Tipo de Variável
<i>Modelo de car-following</i>				
CC0	1,5	0,5	3,0	Contínua
CC1	0,9	0,1	1,4	Discreta (variada com passos de 0,1)
CC2	4,0	1,5	8,0	Contínua
CC3	-8,0	-15,0	-2,0	Contínua
CC5 (= -CC4)	0,35	0,1	1,0	Contínua
<i>Troca de faixas</i>				

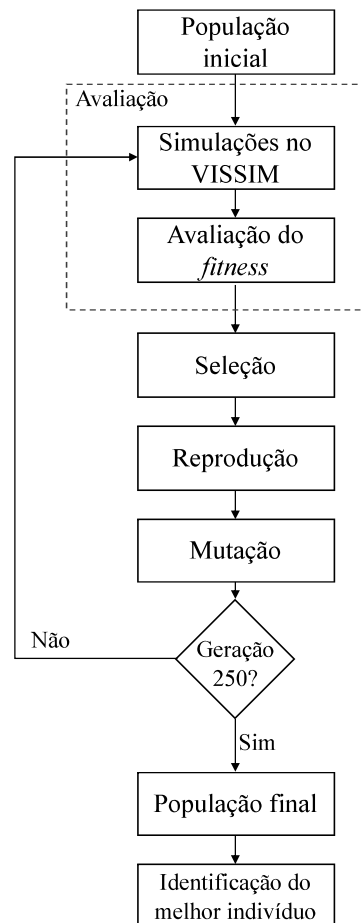
	Valor padrão	Limite Inferior	Limite Superior	Tipo de Variável
Safety Distance for Lane Changing (SDLT)	0,6	0,1	0,6	Contínua

Fonte: elaborado pelo autor.

### 3.9.3 Estrutura do algoritmo genético

A estrutura do algoritmo genético é apresentada na Figura 9 e cada uma das etapas é descrita a seguir.

Figura 9 - Estrutura do algoritmo genético



Fonte: elaborado pelo autor.

### 3.9.3.1 População inicial

A população inicial compõe o grupo de indivíduos que dá início ao algoritmo. Nesta etapa objetiva-se criar uma geração bastante diversa, de modo que o algoritmo faça uma varredura inicial abrangente no espaço de soluções do problema e se aproxime de uma solução ótima mais rapidamente.

Para compor a geração inicial foram criados 30 indivíduos. Os valores associados a seus alelos foram sorteados aleatoriamente dentro do espaço de busca de cada um deles.

### 3.9.3.2 Avaliação

Os indivíduos foram então avaliados, dando início ao processo de evolução. A avaliação compõe a simulação dos indivíduos no VISSIM, leitura dos resultados da simulação pelo programa desenvolvido e aferição do *fitness* do indivíduo, descrito na seção 3.9.1. Considerou-se que os melhores indivíduos são os com *fitness* mais alto, configurando um problema de maximização.

### 3.9.3.3 Seleção

Depois de serem avaliados, foram selecionados os indivíduos que deram início a uma nova geração. A técnica de seleção utilizada foi a seleção por torneio (MILLER et al., 1995)

A seleção por torneio é composta por  $n$  rodadas nas quais são sorteados  $k$  indivíduos e o melhor dentre eles é selecionado. A ideia deste método de seleção é introduzir indivíduos bem adaptados nas gerações seguintes sem abrir mão de características positivas que os indivíduos menos adaptados possam apresentar. Neste estudo foram utilizadas  $n=9$  rodadas, nas quais  $k=3$  indivíduos foram sorteados e o melhor foi selecionado. Estes valores foram empiricamente definidos com base em testes realizados durante o estudo.

O número de indivíduos por geração deste estudo é muito menor que o número utilizado na resolução de problemas puramente numéricos. Por conta disso, a perda de um indivíduo bem adaptado por conta dos mecanismos evolutivos utilizados não compensa os benefícios que estas técnicas apresentam. Portanto o indivíduo com maior *fitness* foi adicionado ao final da seleção, mesmo que já houvesse sido selecionado (MENNENI; SUN; VORTISCH, 2008).

### 3.9.3.4 Reprodução

A etapa de reprodução tem como objetivo criar novos indivíduos – filhos – a partir dos indivíduos escolhidos na etapa de seleção – pais. Entende-se que a probabilidade de que um pai reproduza é proporcional ao seu *fitness* frente aos demais possíveis pais. Dessa forma, tem-se que a probabilidade,  $Prep_i$ , de que o pai  $i$  reproduza é dada por

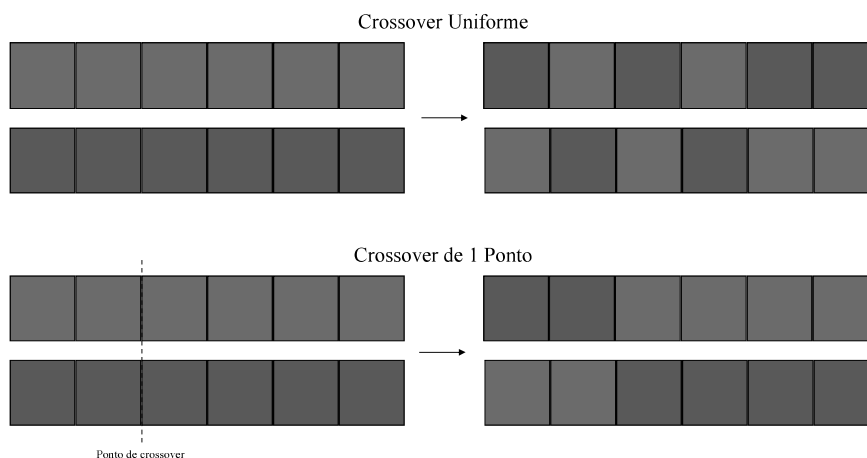
$$Prep_i = \frac{fitness_i}{\sum_{i=1}^n fitness_i} \quad (13)$$

em que  $Prep_i$ : probabilidade de que o indivíduo  $i$  reproduza;

*fitness*: *fitness* do indivíduo  $i$ .

Nesta etapa 2 pais foram selecionados por vez para reprodução, gerando 2 filhos cada, até que o número de filhos desejado seja obtido. Inicialmente são criados 2 clones idênticos aos pais, os quais tem sua informação genética trocada através de um *crossover* uniforme. Nesse método de *crossover* existe uma probabilidade de 50% de que cada alelo seja trocado, independentemente dos demais. Muitos autores utilizam o *crossover* de 1 ponto, o qual prevê que um trecho do cromossomo seja fixado e toda a porção anterior/posterior a ele seja trocada. Embora seja bastante útil para casos específicos, esse método não possui interesse para este estudo, uma vez que é interessante que todas as combinações de parâmetros possam ser testadas. A figura a seguir ilustra estes dois tipos de *crossover*.

Figura 10 - Crossover uniforme e de 1 ponto



Utilizou-se como critério que o mesmo pai não pudesse gerar filhos por meio da recombinação de seu próprio cromossomo nem a partir de outro pai idêntico a ele. Foram feitos 6 cruzamentos por geração, gerando 12 novos filhos.

#### 3.9.3.5 Mutação

O uso da mutação tem como objetivo expandir e acelerar a busca por resultados ótimos. Esse processo é importante para inserir características que não seriam obtidas através do curso natural da evolução sem sua presença, embora também possa introduzir características que prejudicam os indivíduos.

Considerou-se que cada indivíduo possui uma chance de 80% de sofrer mutação. Os alelos dos indivíduos selecionados para mutação possuem, por sua vez, 60% de chance de serem mutados cada um. O indivíduo com maior *fitness* foi mantido fora da etapa de mutação para garantir que a melhor solução não fosse perdida.

O método utilizado foi o de mutação uniforme. Neste método, o valor do alelo selecionado para mutação é alterado para um valor aleatório entre os limites de busca inferior e superior. O refinamento dos resultados pode ser feito por meio da restrição gradual do espaço de busca dos alelos, afim de que os indivíduos fiquem cada mais parecidos com o melhor indivíduo da população. Contudo, foram realizados testes neste sentido e observou-se a convergência dos valores dos alelos para os limites inferior ou superior do espaço de busca. Finalmente, essa abordagem foi descartada, embora sua utilização aliada à mutação uniforme seja recomendada para trabalhos futuros.

Ao final da mutação os indivíduos são reencaminhados para a etapa de avaliação, dando início ao ciclo da próxima geração.

## 4 RESULTADOS

Nessa sessão discute-se os resultados do trabalho. São apresentados os resultados da identificação da influência da chuva na capacidade da via, da calibração da velocidade desejada e da calibração dos parâmetros de *car-following* e troca de faixa.

### 4.1 INFLUÊNCIA DA CHUVA NA CAPACIDADE DA VIA

Nesta seção são apresentados os resultados referentes a identificação da influência da chuva na região estudada quanto à capacidade da via. A escolha do método de identificação de *breakdown* mais adequada é inicialmente abordada e então são construídas as distribuições de probabilidade de ocorrência de *breakdown*, intimamente ligadas à capacidade da via.

#### 4.1.1 Escolha da metodologia de identificação de *breakdowns*

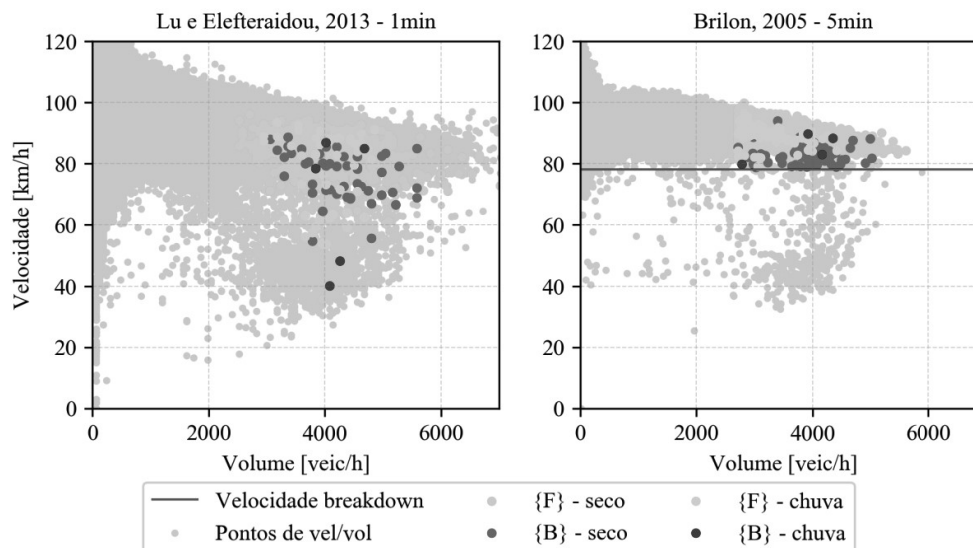
As duas metodologias apresentadas foram aplicadas para que se pudesse escolher a mais adequada para a sequência do estudo.

O método de Lu e Elefteriadou foi aplicado de modo que todos os intervalos de tempo  $i$  que precedem *breakdowns* fossem identificados. Estes pontos foram inseridos no conjunto de pontos  $\{B\}$ , enquanto os 10 pontos anteriores a eles foram inseridos no conjunto de pontos  $\{F\}$  (ELEFTERIADOU, 2014).

O método de Brilon *et al* foi aplicado estabelecendo-se primeiramente a velocidade limite. Alguns autores utilizam técnicas mais aprimoradas para definição desse patamar, como a clusterização (RIENTE e SETTI, 2014); contudo, como foram analisados poucos detectores, optou-se por defini-lo visualmente. Nesse caso, o valor utilizado foi 78 km/h.

Os pontos pertencentes aos conjuntos  $\{B\}$  e  $\{F\}$  foram então classificados como “seco” ou “chuva” de acordo com a condição climática no intervalo de tempo correspondente. A Figura 11 mostra o resultado da aplicação de ambas as metodologias.



Figura 11 - Comparação entre os métodos de identificação de *breakdown*

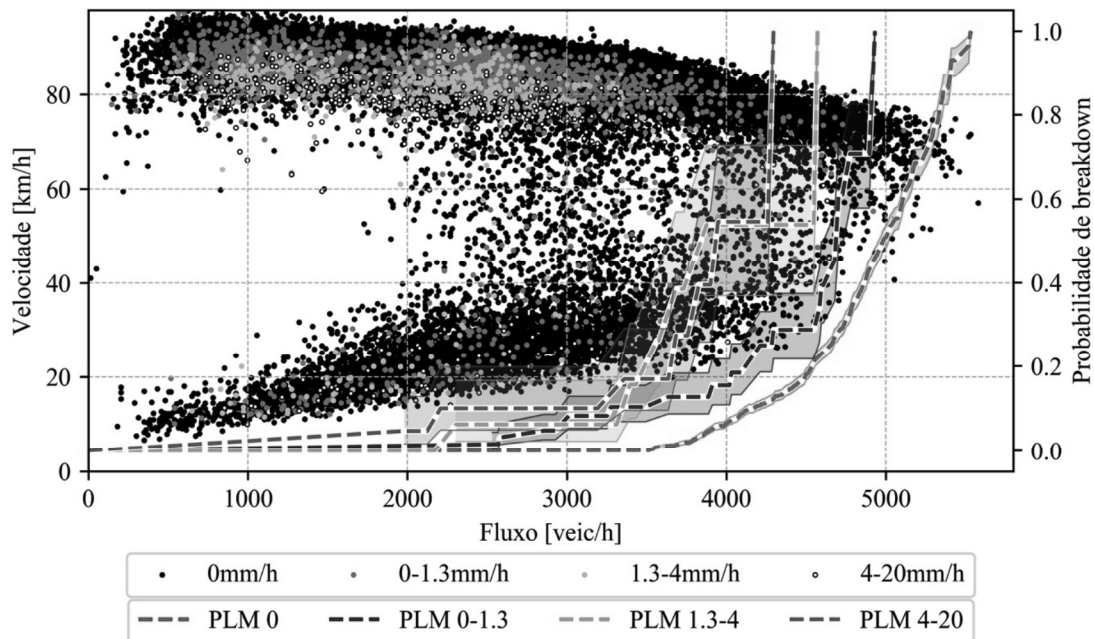
Fonte: elaborado pelo autor.

A metodologia de Lu e Elefteriadou identificou 5 ocorrências de *breakdown* sob chuva e 50 sob tempo seco. A metodologia de Brilon *et al* identificou 4 ocorrências de *breakdown* sob chuva e 74 sob tempo seco. Embora a quantidade de ocorrência seja próxima, observa-se que as condições nas quais ocorreram são diferentes. Enquanto que na metodologia de Brilon *et al* as ocorrências ficam limitadas ao patamar de velocidade estabelecido e por conta disso partem obrigatoriamente de uma condição de fluxo não-congestionado, na metodologia de Lu e Elefteriadou são identificados *breakdowns* na região de transição entre o regime de fluxo livre e o congestionado, e até mesmo na região congestionada. Por conta disso optou-se por utilizar o método de Brilon *et al* nas etapas posteriores do estudo.

#### 4.1.1.1 Probabilidade de *breakdown* pelo PLM

A probabilidade de *breakdown* pode ser verificada a partir dos métodos PLM e Weibull, descritos na metodologia desse estudo. Os bancos foram então separados segundo a presença de chuva, gerando dois bancos diferentes, um “seco” e um “chuva”. Prosseguiu-se com os conjuntos {B} e {F} resultantes dessa metodologia e os dados pertencentes ao conjunto {C} foram excluídos. Os bancos de dados gerados foram submetidos ao método de Brilon *et al* (2005), escolhido como mais eficiente na seção anterior. O PLM foi então aplicado em cada um dos bancos e os resultados são apresentados na Figura 12, com um intervalo de confiança de 85%.

Figura 12 - Dados de velocidade-fluxo e método PLM



Fonte: elaborado pelo autor.

Os intervalos de confiança das curvas de chuva e de tempo seco indicam que, de modo geral, existe diferença estatisticamente significativa entre elas. As sobreposições dos intervalos de confiança em volumes baixos indica que esses volumes não são suficientes para que exista diferença na probabilidade de *breakdown*. As sobreposições em volumes maiores é esperada e decorre do tamanho dos intervalos de confiança, os quais estão relacionados à frequência de pontos disponíveis e não invalida o estudo.

A partir do gráfico apresentados pode-se comparar as probabilidades de *breakdown* para um mesmo volume ou o volume relacionado a uma probabilidade de *breakdown* fixa. Observa-se que a probabilidade de *breakdown* sob chuva foi maior que a com tempo seco para todos os volumes registrados. As curvas indicam probabilidades similares para volumes baixos e divergem conforme os volumes aumentam.

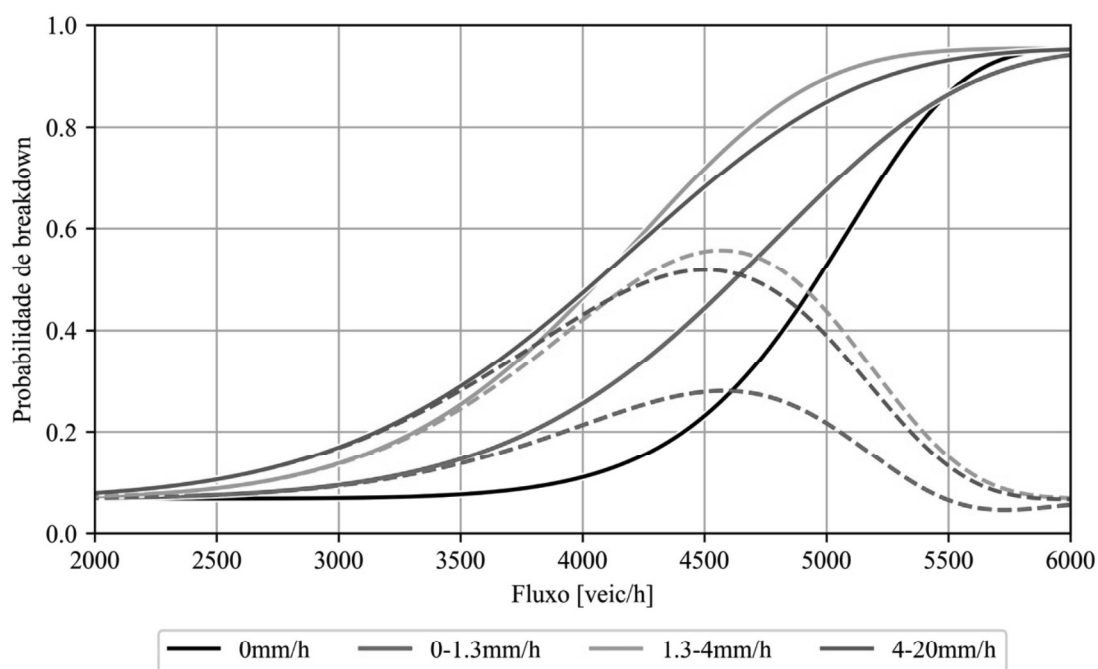
O método PLM, portanto, não permite que sejam feitas aferições precisas em relação à probabilidade de *breakdown* em volumes muito altos, e essa é uma das principais críticas feitas a esse método. A aferição das probabilidades de *breakdown* para volumes mais altos pode ser feita através do ajuste dos dados a uma distribuição como a de Weibull.

#### 4.1.1.2 Probabilidade de *breakdown* pela distribuição de Weibull

Como esperado, as distribuições sob análise rejeitam a hipótese nula de que venham de uma distribuição normal e são melhor ajustadas à distribuição de Weibull (Modi *et al.*, 2005; Brilon *et al.*, 2005). O ajuste à distribuição de Weibull permite que as probabilidades sejam extrapoladas e que se calcule analiticamente o volume correspondente a qualquer probabilidade. Na Figura 13 são apresentadas as distribuições de Weibull encontradas.

As diferenças observadas pelo PLM ficam ainda mais evidentes pela distribuição de Weibull. Mesmo que alguns dos detectores não estejam localizados no local ideal para identificação de *breakdown*, observa-se que as probabilidades envolvidas com a chuva são sempre superiores às com tempo seco.

Figura 13 – Probabilidade de *breakdown* com distribuição de Weibull. As linhas tracejadas correspondem à diferença entre a probabilidade observada em cada um dos cenários chuvosos e o tempo seco.

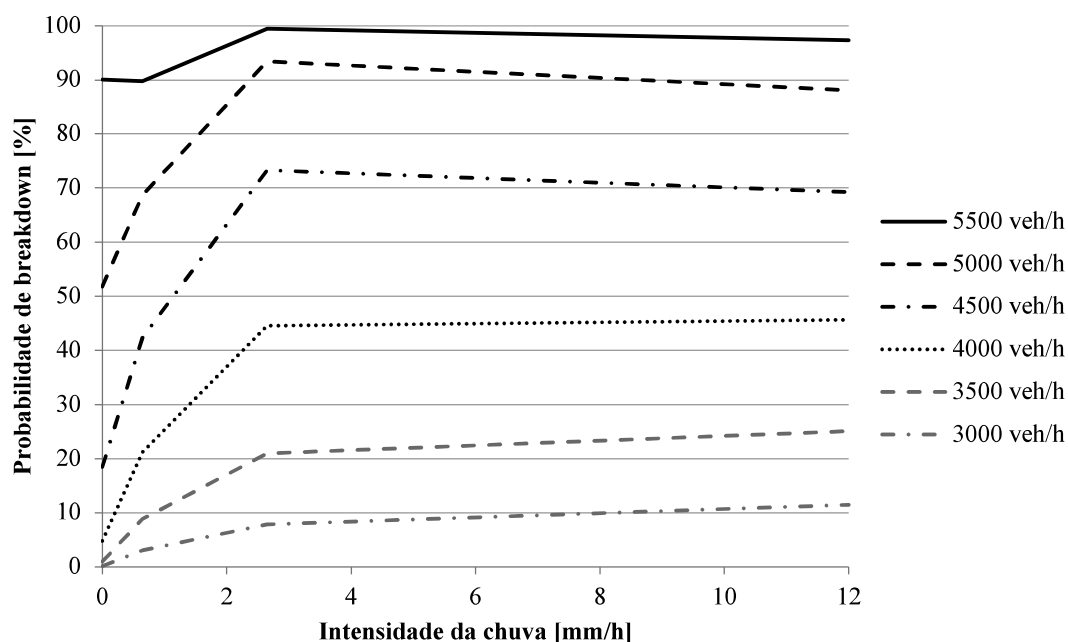


Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se uma diferença crescente em relação à probabilidade de *breakdown* para um mesmo volume conforme aumenta a intensidade. O cenário de chuva mais branda apresenta uma diferença máxima de 27 pontos percentuais, enquanto os demais cenários superam 50 pontos percentuais.

Outra interpretação que pode ser dada ao gráfico é análise dos dados a partir de volumes de tráfego constantes, variando-se a intensidade da chuva e a probabilidade de *breakdown*. Isso permite que se perceba melhor o impacto causado pela chuva em uma mesma situação, como apresentado na Figura 14. Os dados foram colocados utilizando-se o valor médio de intensidade de cada conjunto de dados.

Figura 14 - Probabilidade de *breakdown* x Intensidade da chuva. Volumes de tráfego constantes



Fonte: elaborado pelo autor.

O gráfico indica que as maiores probabilidades de *breakdown* são observadas com menores intensidades de chuva para o mesmo fluxo de tráfego. Uma convergência assintótica da probabilidade de ruptura também é observada para maiores intensidades de chuva.

Fluxos de tráfego mais baixos, como 3.000 veic/h, são menos sujeitos para apresentar falhas porque o estado do tráfego está mais próximo de uma condição de fluxo livre. Portanto, a chance de que a chuva colapse o tráfego é menor. Por outro lado, fluxos com tráfego acentuado, como 5.500 veic/h, são tão prováveis de apresentar uma quebra que a chuva não afeta significativamente a probabilidade de quebra. No entanto, fluxos de tráfego intermediário, variando de 4.000 a 4.500 veic/h, apresentam o maior aumento marginal, aumentando de 18% a probabilidade de quebra sem chuva para 73% com intensidade de chuva variando entre 1,3 e 4,0 mm / h.

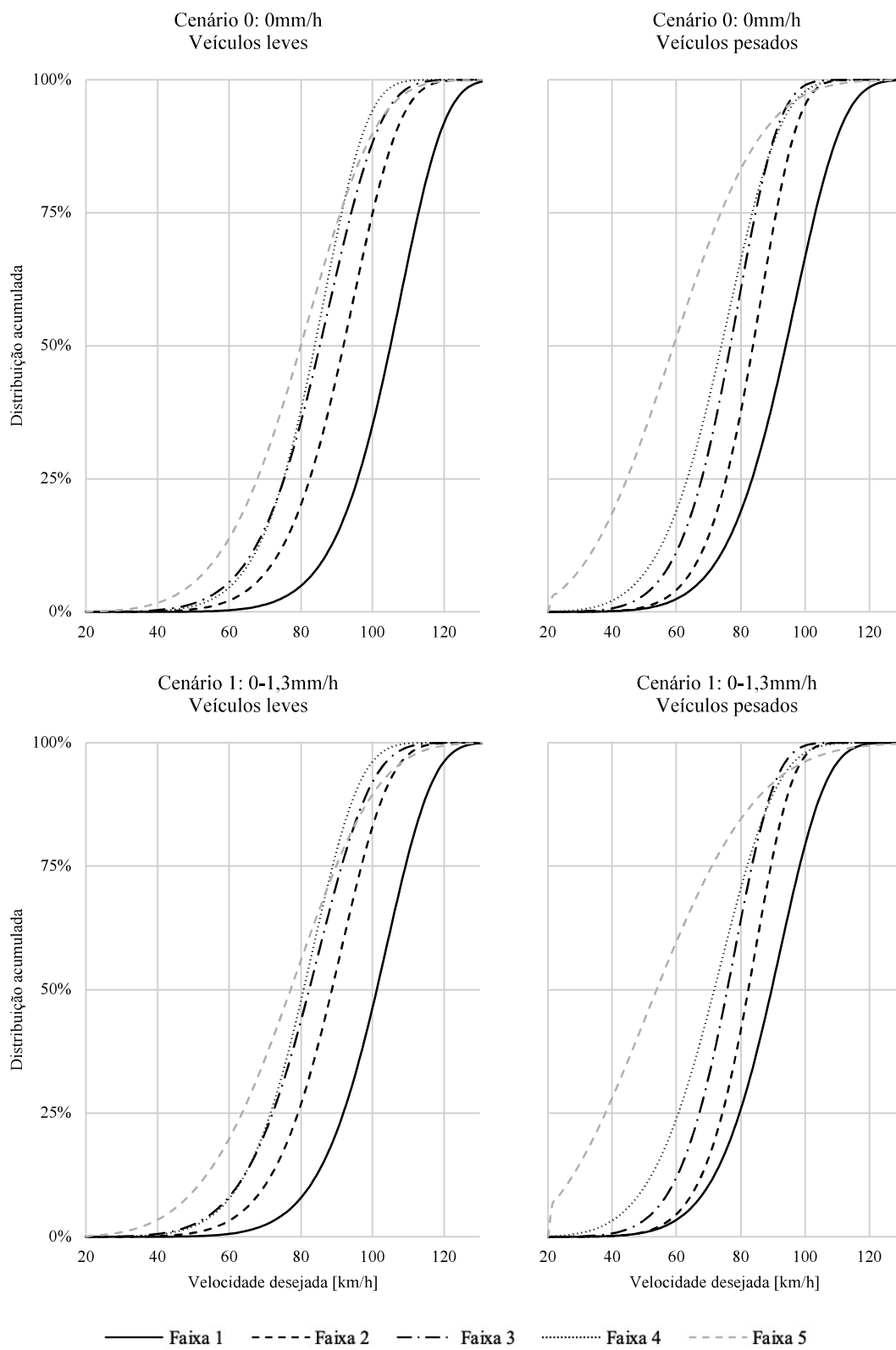
Por meio do exposto nesta seção, contata-se a influência da chuva no tráfego da região e procede-se com a calibração do simulador.

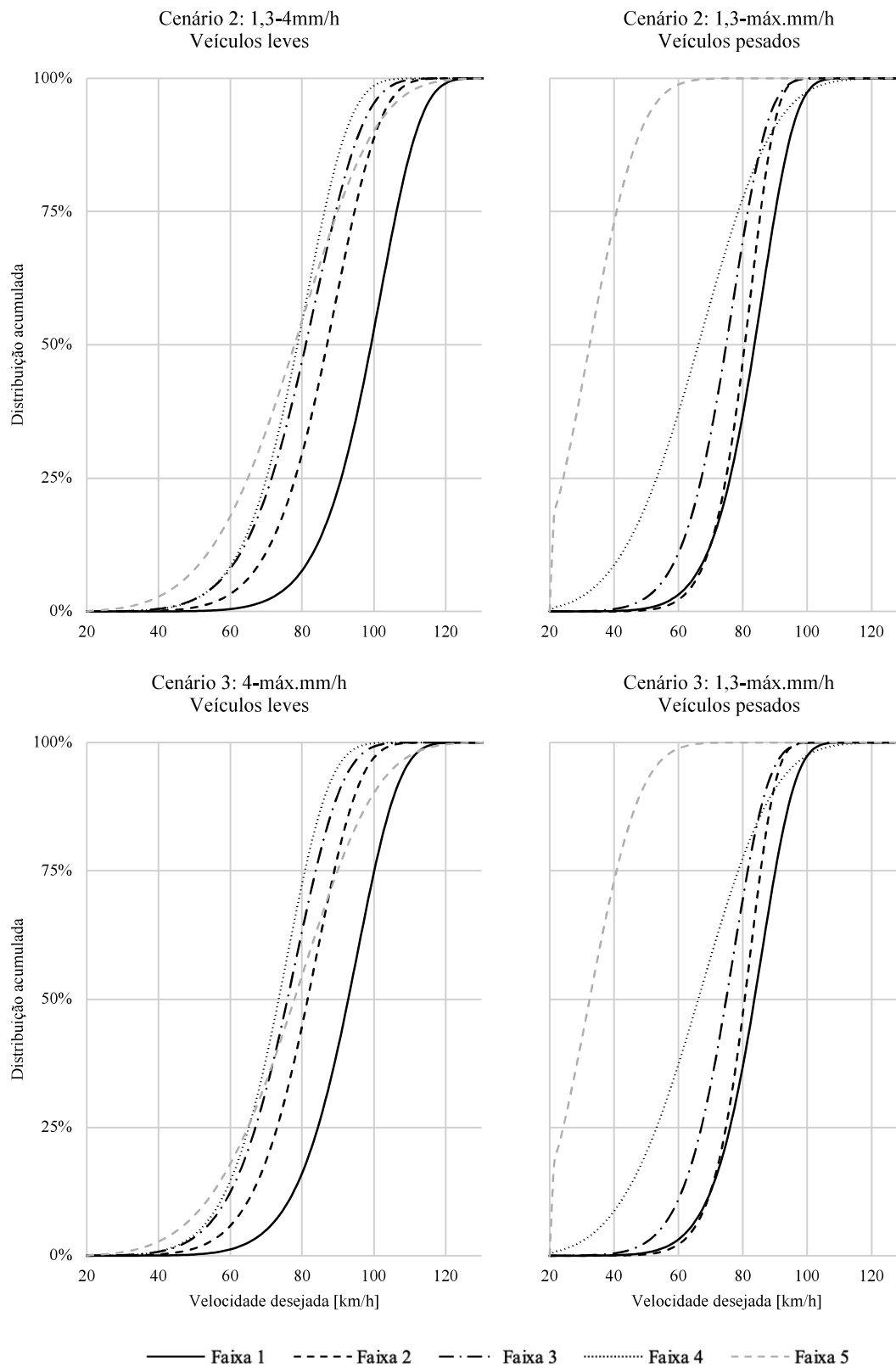
## 4.2 VELOCIDADE DESEJADA

As distribuições de velocidades desejadas obtidas por meio do método apresentado por Geistefeldt (2015) foram construídas para cada um dos cenários analisados. Como as distribuições foram construídas a partir de dados desagregados, demandando certo poder computacional, a metodologia apresentada na seção 3.8 foi empregada utilizando programação em linguagem *Python*.

Distribuições de velocidade desejada distintas foram criadas para veículos leves e pesados, bem como para cada um dos cenários climáticos analisados. Os cenários 2 e 3 com veículos pesados, contudo, apresentaram dados insuficientes para se criar uma distribuição consistente. Por conta disso, os dados de veículos pesados destes cenários foram reunidos, dando origem a um único conjunto de distribuições. As distribuições encontradas para cada um dos cenários são apresentadas na figura a seguir. Estas são as distribuições inseridas no VISSIM para a representação da velocidade desejada. Foram inseridas distribuições distintas para veículos leves e pesados, bem como para cada uma das faixas de cada cenário.

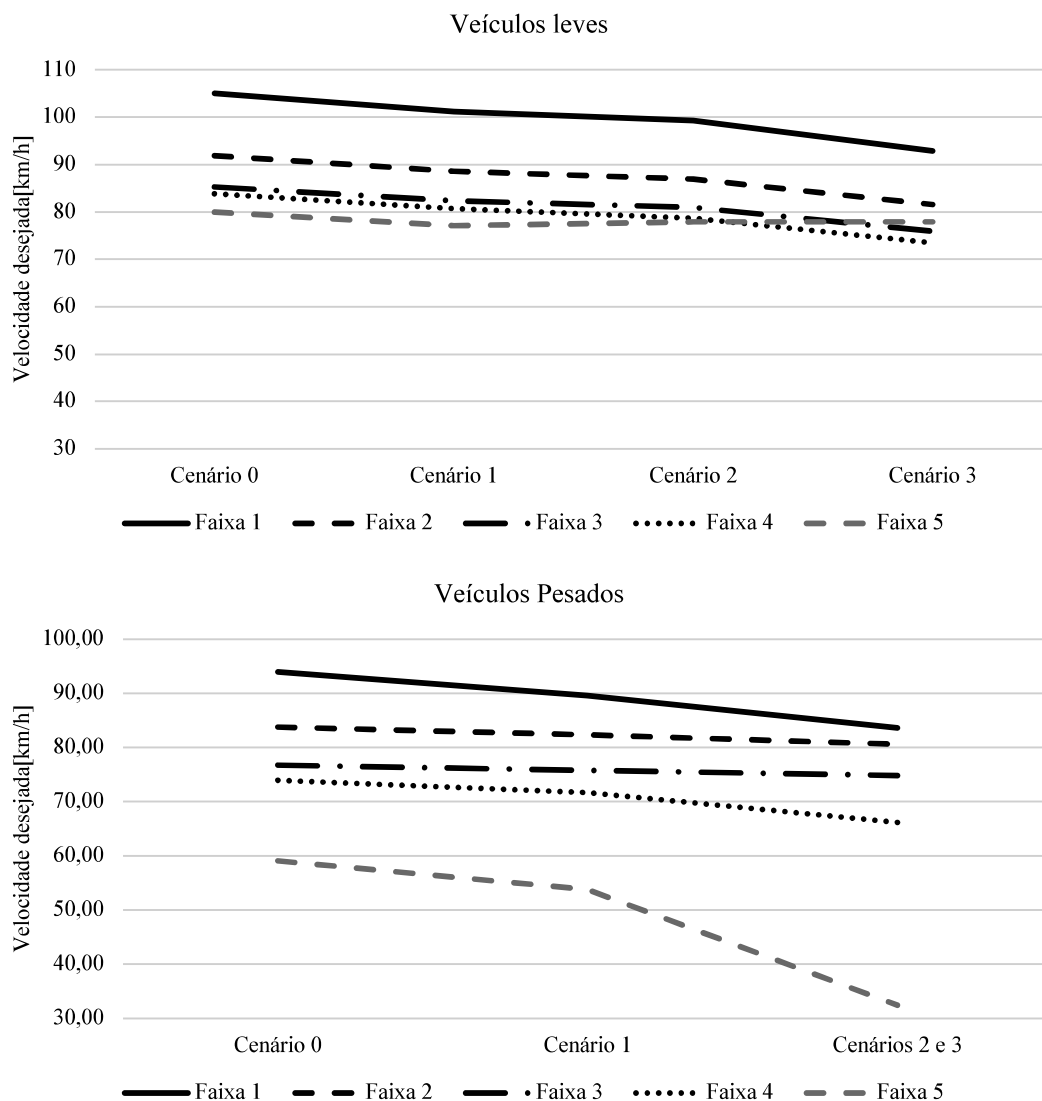
Figura 15 - Distribuições de velocidade desejada





Como esperado, observa-se que quanto mais à esquerda (Faixa 1) os veículos estejam na pista e quanto menor a intensidade de chuva, maiores as velocidades desejadas. Essas diferenças ficam mais evidentes comparando-se as médias das distribuições, como apresentado na figura a seguir.

Figura 16 - Velocidade desejada x Cenários climáticos



Fonte: elaborado pelo autor.

Calibrações usuais seriam feitas apenas com dados referentes ao Cenário 0, sem chuva, e os demais dados seriam tratados como ruídos e descartados. Quando se analisa os dados de velocidade sob chuva a fim de que também sejam levados em conta na calibração, contudo, percebe-se que as diferenças não podem ser negligenciadas. Por conta disso, as distribuições de



velocidade desejada com tempo seco não devem ser usadas em todos os cenários. Na tabela a seguir são apresentadas as diferenças percentuais de velocidade desejada para cada um dos cenários com chuva comparados ao Cenário 0, sem chuva.

Tabela 4 - Redução de velocidade desejada em relação ao Cenário 0 (seco)

		Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4	Faixa 5	Média	
<b>Diferença absoluta [km/h]</b>	<b>Leves</b>	<b>Cenário 1</b>	3,83	3,24	2,97	3,11	2,85	3,20
		<b>Cenário 2</b>	5,78	4,95	4,27	5,15	2,09	4,45
		<b>Cenário 3</b>	12,14	10,32	9,35	10,36	2,09	8,85
	<b>Pesados</b>	<b>Cenário 1</b>	4,42	1,42	0,96	2,22	5,27	2,86
		<b>Cenário 2/3</b>	10,38	3,17	1,91	7,78	26,66	9,98
<b>Diferença percentual</b>	<b>Leves</b>	<b>Cenário 1</b>	3,6%	3,5%	3,5%	3,7%	3,6%	3,6%
		<b>Cenário 2</b>	5,5%	5,4%	5,0%	6,1%	2,6%	4,9%
		<b>Cenário 3</b>	11,6%	11,2%	11,0%	12,4%	2,6%	9,7%
	<b>Pesados</b>	<b>Cenário 1</b>	4,7%	1,7%	1,2%	3,0%	8,9%	3,9%
		<b>Cenário 2/3</b>	11,0%	3,8%	2,5%	10,5%	45,1%	14,6%

Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados indicam, para veículos leves, uma diferença absoluta máxima de 12,14 km/h na faixa 1 entre a velocidade desejada do Cenário 3, com chuva mais intensa, e o Cenário 0, sem chuva. Desconsiderando-se a faixa 5, que possui comportamento atípico, a redução de velocidade de veículos pesados chega a um máximo de 10,38 km/h na faixa 1 do Cenário 2/3. Observa-se também uma diminuição gradual da velocidade desejada conforme aumenta a intensidade da chuva, o que indica uma correlação entre elas.

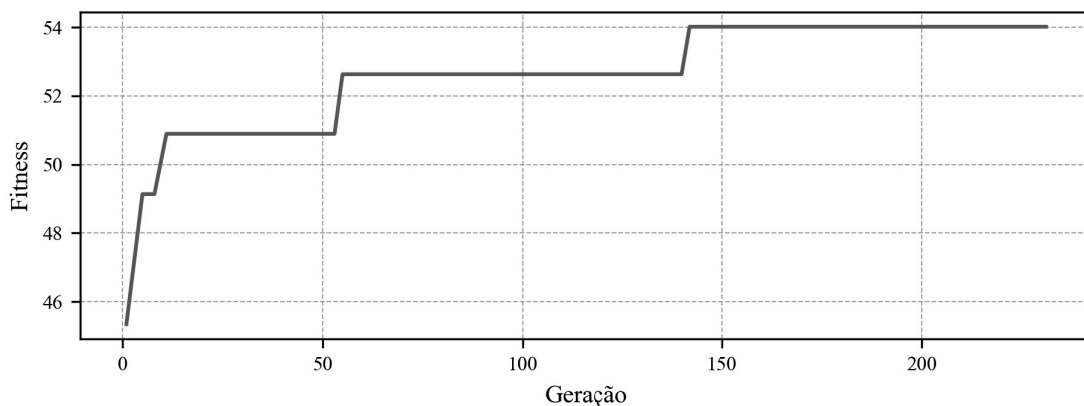
As reduções de velocidade desejada são semelhantes às encontradas na literatura apresentada na seção 2.1.2. Caleffi et al. (2016) utilizou métodos de clusterização para identificar a influência da chuva em localidade próxima à desse trabalho e observou uma queda média de 10 km/h na velocidade de fluxo livre, enquanto nesse trabalho observou-se queda média de 8,85km/h para veículos leves e 9,98 km/h para veículos pesados. A proximidade dos valores indica convergência entre os resultados encontrados em ambos os trabalhos.

### 4.3 CAR-FOLLOWING E TROCA DE FAIXAS

Os parâmetros de *car-following* e troca de faixas foram calibrados utilizando-se um algoritmo genético. O algoritmo foi construído para os fins específicos deste estudo em linguagem Python 3, utilizando-se como acessórias algumas das ferramentas disponibilizadas na biblioteca DEAP (Distributed Evolutionary Algorithms in Python). As simulações foram realizadas em um computador com Windows 10 64 bits, com processador Intel i5-3570 de 3,4GHz e 24GB de memória RAM. A calibração de cada um dos 4 cenários durou cerca de 120h.

O algoritmo genético possui parâmetros que também precisam ser calibrados. Esses ajustes foram feitos manualmente para a calibração do cenário sem chuva, até que o funcionamento do algoritmo fosse coerente com o que é apresentado na literatura. O resultado desta calibração é apresentado na figura a seguir.

Figura 17 - Algoritmo genético aplicado ao cenário sem chuva

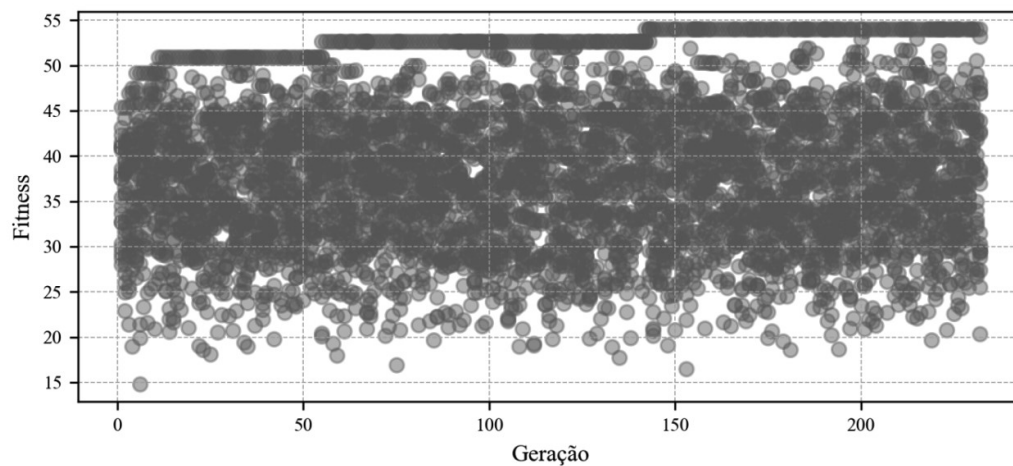


Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se um rápido crescimento do valor da função *fitness* nas primeiras gerações e a convergência para um resultado ótimo a partir da 139ª geração. Outros autores apresentam gráficos onde se observa um número maior de incrementos da função *fitness*, contudo, como foi utilizado um número grande de indivíduos compondo a primeira geração, espera-se que a evolução seja iniciada bastante próxima da solução ótima e menos melhoras sejam observadas. A convergência observada atesta a funcionalidade da abordagem adotada.

No processo evolutivo com algoritmo genético espera-se que indivíduos semelhantes ao melhor indivíduo de cada geração também apresentem melhora em seu *fitness*. Isso pode ser observado na Figura 18, onde o *fitness* de cada indivíduo de cada geração é apresentado.

Figura 18 – Fitness de todos os indivíduos da calibração do cenário sem chuva



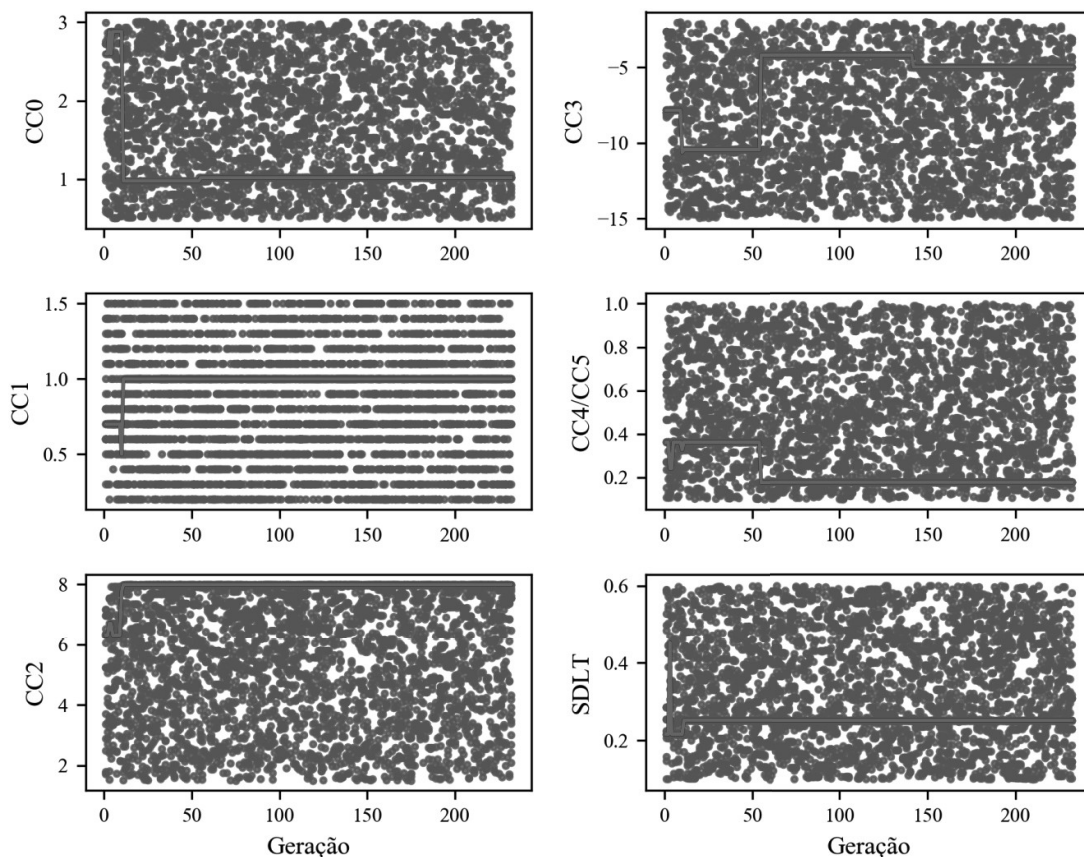
Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se no gráfico que conforme o *fitness* do melhor indivíduo apresenta melhora, outros bons candidatos também são gerados com *fitness* melhor que o do melhor indivíduo da primeira geração.

A evolução dos parâmetros de calibração também foi controlada. Buscou-se garantir que todo o espaço de soluções fosse percorrido dentro dos limites estabelecidos na metodologia. Na

Figura 19 são apresentados os valores de cada parâmetro testados para cada indivíduo de cada geração. A linha vermelha representa o valor utilizado pelo melhor indivíduo de cada geração.

Figura 19 - Valores dos parâmetros comportamentais na calibração do cenário de tempo seco. A linha vermelha representa o valor utilizado pelo melhor indivíduo.

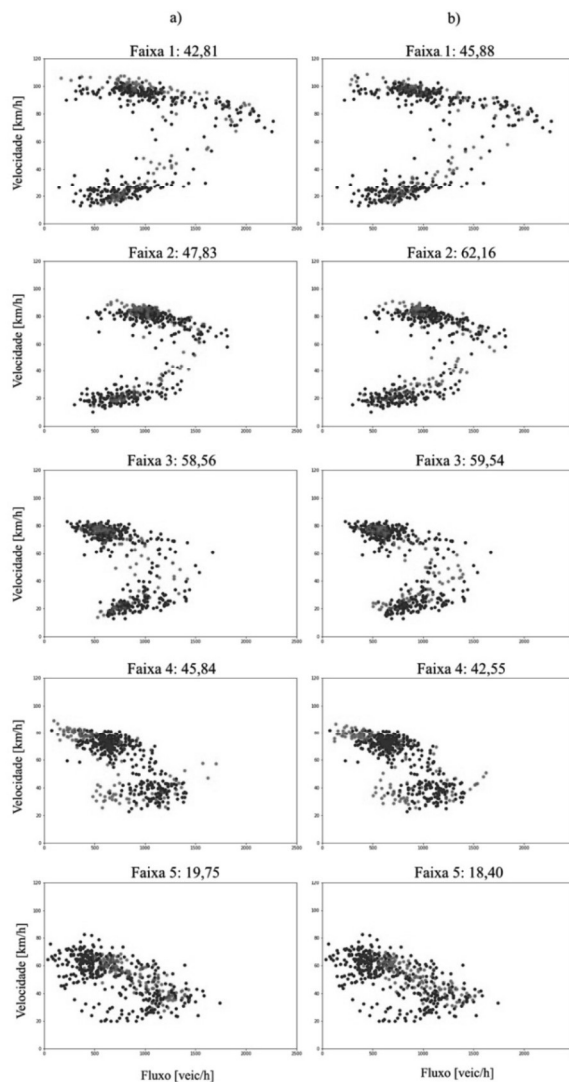


Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se uma maior variação nos parâmetros nas primeiras gerações e convergência gradual. Com exceção do parâmetro CC2, todos os parâmetros mantiveram-se distantes dos limites de busca estabelecidos na metodologia, o que indica que os limites estabelecidos são adequados. A distribuição uniforme dos pontos indica que o espaço de soluções foi devidamente buscado, sem concentração em localidades específicas.

A função *fitness* tinha como objetivo aproximar as nuvens de fluxo-velocidade resultantes da simulação às observadas em campo. A aferição do quão bem estas nuvens estão ajustadas pode ser feita de modo visual a fim de constatar o correto funcionamento da metodologia adotada. Para tal, são apresentadas as nuvens de fluxo-velocidade para cada uma das faixas do melhor indivíduo da primeira geração e do melhor indivíduo da última geração.

Figura 20 - Nuvens de fluxo-velocidade do melhor indivíduo da primeira e da última geração do Cenário 0. A figura a) corresponde à primeira e a b) à última geração.



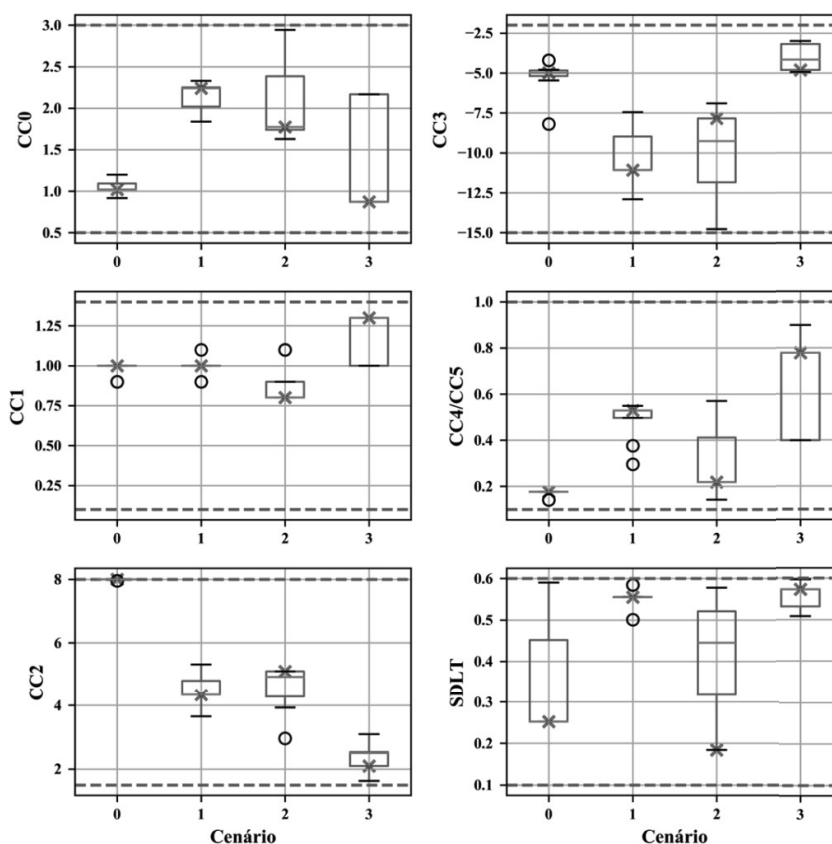
Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se que durante o processo de calibração ocorreu especialmente um ajuste da nuvem na região de fluxo livre. A forma da nuvem também foi alterada, ficando mais próxima da forma observada em campo. Embora apenas as faixas 1 e 2 tenham sido utilizadas no processo de calibração, observa-se que as demais faixas também apresentaram comportamento satisfatório. Isso valida tanto a metodologia empregada como a modelagem feita no simulador.

### 4.3.1 Comparação entre os cenários

A metodologia utilizada na calibração do cenário seco foi replicada para os demais cenários com chuva. A consistência dos resultados obtidos foi verificada a partir da comparação dos 15 melhores indivíduos de cada cenário. Para isso foram gerados com gráficos *boxplot*, onde se pode comparar os valores de cada parâmetro de cada cenário e a variância destes resultados.

Figura 21 - Comparação entre os cenários simulados. As marcações vermelhas representam o valor correspondente ao melhor indivíduo. As linhas tracejadas representam os limites de busca de cada um dos parâmetros.



Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se que existem diferenças nos valores obtidos em cada um dos cenários. Os parâmetros CC0 e CC3 apresentam comportamento parabólico, enquanto os parâmetros CC1, CC2 e CC4/CC5 indicam comportamento linear. O parâmetro SDLT possui comportamento oscilatório. Embora constate-se a variação dos parâmetros, sugere-se que trabalhos futuros façam uso de mais de uma calibração por cenário, aumentando o rigor da validação da

calibração. Além disso, o comportamento dos parâmetros frente a presença de chuva poderia ser validado por meio de análises microscópicas e comportamentais.

O cenário 0, sem chuva, apresenta menor variância em relação aos demais de modo geral. Os dados utilizados para a geração da nuvem fluxo-velocidade utilizados na calibração do cenário sem chuva são uma composição de períodos do dia contínuos, os quais permitem que a nuvem fluxo-velocidade simulada tenha a mesma disposição de dados da nuvem feita com dados de campo. As nuvens dos cenários com chuva, por outro lado, são uma composição de fragmentos de dados obtidos quando uma intensidade específica de chuva é observada em campo. Nesse caso, as nuvens de campo podem diferir em relação à distribuição dos pontos quando comparadas às nuvens simuladas, interferindo nos resultados. Atribui-se a maior variabilidade observadas nos cenários com chuva a este fato. Trabalhos futuros poderiam estabelecer métricas que permitissem uma comparação mais equilibrada entre os cenários chuvosos simulados e de campo.

A tabela a seguir permite a comparação dos resultados com os parâmetros padrão do simulador.

Tabela 5 - Parâmetros comportamentais calibrados e padrão

	Limite Inferior	Limite Superior	Valor padrão	Cen. 0	Cen. 1	Cen. 2	Cen. 3	Variação Percentual = (Parâmetro - Padrão)/(LS-LI)			
								Cen. 0	Cen. 1	Cen. 2	Cen. 3
CC0	0,5	3	1,5	1,0	2,2	1,8	0,9	20%	28%	12%	24%
CC1	0,1	1,4	0,9	1,0	1,0	0,8	1,3	8%	8%	8%	31%
CC2	1,5	8	4	8,0	4,3	5,1	2,1	62%	5%	17%	29%
CC3	-15	-2	-8	-5,0	-11,1	-7,8	-4,8	23%	24%	2%	25%
CC5 (= -CC4)	0,1	1	0,35	0,2	0,5	0,2	0,8	17%	17%	17%	50%
SDLT	0,1	0,6	0,6	0,3	0,6	0,2	0,6	60%	0%	80%	0%
							Média:	31%	13%	22%	26%

Fonte: elaborado pelo autor.

A tabela indica uma variação média entre 13 e 31% entre os parâmetros encontrados em cada um dos cenários e os parâmetros padrão do simulador. O estudo de Caleffi (2018) foi feito com dados obtidos na mesma localidade mas em outro período, e os parâmetros obtidos



apresentaram diferença média de 22,7% em relação aos valores padrão. No estudo citado todas as combinações de parâmetros de calibração foram testadas a fim de se encontrar a que melhor representasse a realidade. Nesse trabalho, por outro lado, utilizou-se uma heurística que tem como objetivo encontrar uma solução ótima sem que seja necessário testar todas as combinações, poupando tempo e poder computacional. A proximidade das diferenças percentuais encontradas em ambos os trabalhos, por sua vez, indica coerência nos resultados encontrados.

## 5 CONCLUSÕES

Nesse estudo discutiu-se a influência da chuva nos parâmetros de calibração do microssimulador de tráfego VISSIM em ambiente rodoviário. Foram utilizados dados de tráfego advindos de laços indutivos instalados na rodovia BR-290, na região metropolitana de Porto Alegre, e dados pluviométricos coletados com um pluviômetro automático distante 1,5km. Foram feitas as calibrações da velocidade desejada, por meio do método de Geistefeldt (2015), e dos parâmetros dos modelos comportamentais, por meio de um algoritmo genético. Foram criados 4 cenários climáticos, com tráfego sob diferentes intensidades de chuva, e os parâmetros de calibração foram ajustados para cada um deles.

A influência da chuva no tráfego é bem documentada. Diversos autores e manuais, como o HCM (2016), indicam que a velocidade de fluxo livre de rodovias sob fortes chuvas reduz em até 20km/h quando comparadas com situações de clima estável. A influência da chuva, portanto, é de especial importância para regiões onde a frequência de chuvas intensas é alta. O estudo de Brooks (2008) indica que a região sul do Brasil, abordada neste estudo, é uma das regiões de todo o mundo onde se sobressam essas características climáticas.

O microssimulador VISSIM não possui modelos específicos para a simulação de tráfego sob diferentes condições climáticas. Como a região estudada apresenta alta incidência de fortes chuvas, a possibilidade de se realizar esse tipo de simulação é de especial interesse. Por conta disso, neste trabalho foi estudada a influência da chuva nos parâmetros comumente utilizados, a fim de se compreender como a influência da chuva pode ser abordada no simulador.

### 5.1 INFLUÊNCIA DA CHUVA NA CAPACIDADE DA VIA

A influência da chuva na capacidade foi estudada a partir de análises de probabilidade de *breakdown* para se constatar seu impacto no tráfego da região de estudo. Essa metodologia, ainda emergente no cenário científico, tem como premissa as características probabilísticas da capacidade, o que significa um avanço dos conceitos clássicos de capacidade única e determinística.

Os conceitos de probabilidade de *breakdown* foram aplicados a dados de tráfego sob diferentes intensidade de chuva, de modo que se pode estudar a variação desta probabilidade em função da intensidade da chuva. A metodologia adotada indicou a chuva intensa chega a provocar um

aumento na ordem de 50 pontos percentuais na probabilidade de *breakdown*, evidenciando a influência da chuva na capacidade do trecho estudado.

## 5.2 CALIBRAÇÃO DA VELOCIDADE DESEJADA

A metodologia utilizada para calibração da velocidade desejada se mostrou eficiente e eficaz. Sua aplicação através de programação em linguagem *Python* ao banco de dados permite a obtenção das curvas em poucos instantes. Alguns ajustes na metodologia original, como a definição do *headway* mínimo, se fazem necessários para refletir as características do local a ser calibrado, contudo a simplicidade dos parâmetros facilita essa tarefa. Um ponto negativo dessa metodologia é o fato de se demandar dados de tráfego desagregados para a construção das curvas.

Observou-se redução média de 8,85km/h para veículos leves comparando-se o cenário de chuva mais intensa com o cenário de tempo seco. Veículos pesados apresentaram uma redução média de 9,98km/h. Os valores encontrados são semelhantes aos observados na literatura, especialmente ao de Caleffi (2016), realizado na mesma região.

Os resultados evidenciam a influência da chuva na velocidade desejada, como é esperado e já discutido por diversos estudos. A contribuição desse trabalho se dá no sentido de aplicar a metodologia escolhida à microssimulação de cenários com chuva e constatar o sucesso dessa aplicação.

## 5.3 CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS COMPORTAMENTAIS

Nesse estudo foi feito uso de um algoritmo genético para a calibração de quatro cenários com diferentes condições climáticas. Em cada cenário foram calibrados parâmetros do modelo comportamental de Wiedemann 99 e do modelo de troca de faixas, utilizados pelo microssimulador de tráfego VISSIM. A metodologia adotada permitiu comparar os valores e a variabilidade de cada parâmetro em cada cenário.

As variações existentes nos parâmetros entre os cenários, embora significativas, demandam que uma metodologia específica para sua interpretação seja construída. Dessa forma seria possível compreender porque os parâmetros possuem os comportamentos encontrados e construir modelos que relacionem a intensidade da chuva e os parâmetros dos modelos comportamentais.

A diferença média observada entre parâmetros encontrados e os parâmetros padrão do simulador variou entre 13 e 31%. O estudo de Caleffi (2018), realizado em localidade próxima a desse estudo mas com dados referentes a outros períodos, apresentou 22,7% de variação. As variações encontradas evidenciam a necessidade de se calibrar o simulador para a região estudada, bem como a importância de se levar e conta a presença de chuva em simulações de tráfego, objetivo principal desse estudo.

## 6 REFERÊNCIAS

BETHONICO, F. C. Calibração de microsimuladores de tráfego através de medidas macroscópicas. **XXX ANPET**, 2016.

BRILON, W.; GEISTEFELDT, J.; REGLER, M. Reliability of Freeway Traffic Flow: A stochastic Concept of Capacity. **Proceedings of the 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory**, n. July, p. 125–144, 2005.

BRILON, W.; ZURLINDEN, H. Breakdown probability and traffic efficiency as design criteria for freeways. **Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik**, v. 870, 2003.

BRILON, W.; PONZLET, M. Variability of speed-flow relationships on German autobahns. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1555, p. 91-98, 1996.

BROOKS, H. E.; DOTZEK, N. The spatial distribution of severe convective storms and an analysis of their secular changes. **Climate Extremes and Society**, v. 35, p. 53, 2008.

CALEFFI, F. Proposição de um método de harmonização da velocidade baseado em modelo de previsão de conflitos veiculares. Tese de doutorado. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**. 2018.

CALEFFI, F. et al. Influência das condições climáticas e de acidentes na caracterização do comportamento do tráfego em rodovias. **Transportes**, v. 24, n. 4, p. 57-63, 2016.

CALEFFI, F. et al. Gerenciamento ativo de tráfego: um estudo piloto na BR290. **VIII Workshop de Recursos de Desenvolvimento Tecnológico nas Concessões Rodoviárias, ANTT, Brasília, Brasil**, v. 1, p. 44–53, 2013.

CALEFFI, F.; CYBIS, H. B. B. Proposição e Análise de um Sistema de Gerenciamento Ativo de Tráfego em um Estudo de Caso de uma Autoestrada Brasileira. **XXVII ANPET, Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, n. 2007, 2013.

CARLSON, R. C.; PAPAMICHAIL, I.; PAPAGEORGIU, M. Controle realimentado local do fluxo principal em rodovias com o uso de limites de velocidade variáveis. **XXIV ANPET, Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, 2010.

CHUNG, E. et al. Does weather affect highway capacity. In: **5th international symposium on highway capacity and quality of service**, Yakoma, Japan. 2006.

DUBUISSON, M.-P.; JAIN, A. K. A modified Hausdorff distance for object matching. In: **Proceedings of 12th international conference on pattern recognition. IEEE**, 1994. p. 566-568.

ELEFTERIADOU, L. **An introduction to traffic flow theory**. New York: Springer, 2014.

ELEFTERIADOU, L. et al. Proactive ramp management under the threat of freeway-flow breakdown. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 16, p. 4–14, 2011.

ELEFTERIADOU, L. et al. Revisiting the definition and measurement of capacity. In: **5th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service Transportation Research Board**. 2006.

ELEFTERIADOU, L.; ROESS, R. P.; MCSHANE, W. R. Probabilistic nature of breakdown at freeway merge junctions. **Transportation Research Record**, n. 1484, 1995.

FHWA, F. H. A. Traffic Analysis Toolbox Volume IV: Guidelines for Applying CORSIM Microsimulation Modeling Software. **Report No. FHWA-HOP-07-079**, v. IV, n. January, p. 1–349, 2007.

GEISTEFELDT, J. Empirical Estimation of Desired Speed Distributions for Microscopic Traffic Simulation. **Transportation Research Record**, v. 2490, n. 1, p. 41-46, 2015.

GOMES, G.; MAY, A.; HOROWITZ, R. Congested Freeway Microsimulation Model Using VISSIM. **Transportation Research Record**, v. 1876, n. 1, p. 71–81, 2004.

GREENSHIELDS, B. D. et al. A study of traffic capacity. In: **Highway research board proceedings**. National Research Council (USA), Highway Research Board, 1935.

GREENWOOD, M. et al. A Report on the Natural Duration of Cancer. **A Report on the Natural Duration of Cancer.**, n. 33, 1926.

GOLBERG, D. E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. **Addion wesley**, v. 1989, n. 102, p. 36, 1989.

HUTTENLOCHER, D. P.; RUCKLIDGE, W. J.; KLANDERMAN, G. A. Comparing images

using the Hausdorff distance under translation. In: **Proceedings 1992 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**. IEEE, 1992. p. 654-656.

KARAKIKES, I.; SPANGLER, M.; MARGREITER, M.. Designing a Vissim-Model for a motorway network with systematic calibration on the basis of travel time measurements. **Transportation research procedia**, v. 24, p. 171-179, 2017.

KYTE, M. et al. Effect of weather on free-flow speed. **Transportation Research Record**, v. 1776, n. 1, p. 60-68, 2001.

LORENZ, M. R.; ELEFTERIADOU, L. **A probabilistic approach to defining freeway capacity and breakdown**. 2000. Tese de Doutorado. Pennsylvania State University.

LU, C; ELEFTERIADOU, L. An investigation of freeway capacity before and during incidents. **Transportation letters**, v. 5, n. 3, p. 144-153, 2013.

MENNENI, S.; SUN, C.; VORTISCH, P. Microsimulation Calibration Using Speed Flow Relationships. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2088, p. 1–9, 2008.

MILLER, B. L.; GOLDBERG D. E. Genetic algorithms, tournament selection, and the effects of noise. **Complex systems**, v. 9, n. 3, p. 193-212, 1995.

MORIDPOUR, S. et al. Lane-changing decision model for heavy vehicle drivers. **Journal of Intelligent Transportation Systems**, v. 16, n. 1, p. 24-35, 2012.

PAPAGEORGIU, M.; BLOSSEVILLE, J.-M.; HAJ-SALEM, H. Modelling and real-time control of traffic flow on the southern part of Boulevard Peripherique in Paris: Part I: Modelling. **Transportation Research Part A: General**, v. 24, n. 5, p. 361–370, 1990.

PARK, B.; SCHNEEBERGER, J. D. Microscopic Simulation Model Calibration and Validation: Case Study of VISSIM Simulation Model for a Coordinated Actuated Signal System. **Transportation Research Record**, v. 1856, n. 03, p. 185–192, 2003.

PERSAUD, B.; YAGAR, S.; BROWNLEE, R. Exploration of the breakdown phenomenon in freeway traffic. **Transportation Research Record**, v. 1634, n. 1, p. 64-69, 1998.

PTV AG. VISSIM 5.30-05 User Manual. 2011.

RIENTE, G. R. A.; SETTI, J. R. **Speed-Flow Relationship and Capacity for Expressways in Brazil**. 2014.

SIDDHARTH, S. M. P.; RAMADURAI, G. Calibration of VISSIM for Indian Heterogeneous Traffic Conditions. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 104, p. 380–389, 2013.

YUAN-QING, W.; JING, L.. Study of rainfall impacts on freeway traffic flow characteristics. **Transportation research procedia**, v. 25, p. 1533-1543, 2017.

YU, M.; FAN, W. D. Calibration of microscopic traffic simulation models using metaheuristic algorithms. **International Journal of Transportation Science and Technology**, v. 6, n. 1, p. 63-77, 2017.

ZECHIN, D.; CYBIS, H. B. B.; CALEFFI, F. Avaliação de Ramp Metering na BR-290/RS utilizando o algoritmo ALINEA. **XXX ANPET**, 2016.

ZHIZHOU, W.; JIAN, S.; XIAOGUANG, Y. Calibration of VISSIM for shanghai expressway using genetic algorithm. In: **Simulation Conference, 2005 Proceedings of the Winter**. IEEE, 2005. p. 4 pp.