

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Yan Tonin Galvan

**UTILIZAÇÃO DO MÉTODO KAPLAN-MEIER NA
ESTIMATIVA DAS DISTRIBUIÇÕES DE
VELOCIDADE DESEJADA**

Porto Alegre
Julho de 2009

YAN TONIN GALVAN

**UTILIZAÇÃO DO MÉTODO KAPLAN-MEIER NA
ESTIMATIVA DAS DISTRIBUIÇÕES DE
VELOCIDADE DESEJADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Helena Beatriz Bettella Cybis
Coorientador: Douglas Zechin
Coorientadora: Laísa Braga Kappler

Porto Alegre
julho de 2019

YAN TONIN GALVAN

**UTILIZAÇÃO DO MÉTODO KAPLAN-MEIER NA
ESTIMATIVA DAS DISTRIBUIÇÕES DE
VELOCIDADE DESEJADA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pela Professora Orientadora e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2019

BANCA EXAMINADORA

Profa. Helena Beatriz Bettella Cybis (UFRGS)
PhD. pela University of Leeds
Orientadora

Douglas Zechin (UFRGS)
Me. em Sistemas de Transporte pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Coorientador

Láisa Braga Kappler (UFRGS)
Eng. Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Coorientadora

Prof. Daniel Sérgio Presta Garcia (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Fernando Dutra Michel (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO

Este artigo aborda a calibração do parâmetro velocidade desejada do microssimulador de tráfego VISSIM para ambiente rodoviário. O estudo foi conduzido utilizando-se dados de um trecho da rodovia BR-290 situado na região metropolitana de Porto Alegre. Para a construção das distribuições, cada veículo da base dados foi categorizado como impedido ou desimpedido com base em diferentes medições de *headway*. As distribuições de velocidade desejada foram criadas a partir da função não-paramétrica de Kaplan-Meier e do ajuste a outras funções paramétricas para inserção no simulador. A otimização foi feita por meio de um projeto de experimentos, em que os fatores controláveis foram os *headways* utilizados na categorização dos veículos. A metodologia utilizada permitiu identificar os fatores controláveis e as interações com efeito significativo, bem como os níveis que geram as melhores distribuições de velocidade desejada. Seus resultados têm a capacidade de reproduzir com maior precisão o desempenho do tráfego em condições não congestionadas.

Palavras-chave: Velocidade Desejada. VISSIM. Tráfego Rodoviário. Calibração.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquematização da Metodologia seguida	15
Figura 2: Localização da área de estudo	16
Figura 3: Perfil de fluxo típico	16
Figura 4: Parametrizações da distribuição D_015_2	17
Figura 5: Gráficos Q-Q para as distribuições analisadas	18
Figura 6: Representação gráfica dos critérios de identificação de followers	19
Figura 7: Codificação dos Experimentos	21
Figura 8: Velocidade x volume agregado por faixa para o experimento E_141.....	23
Figura 9: Comparação volume x velocidade agregado nas 4 faixas.....	24
Figura 10: Distribuições de velocidade desejada para os níveis ótimos do PE	27

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	7
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	8
2.1	Distribuição de velocidade desejada.....	8
2.2	Identificação de <i>Followers</i>	10
2.3	Análise de sobrevivência.....	11
2.4	Dados censurados.....	12
2.5	Função de sobrevivência.....	12
2.6	Product Limit Method.....	13
2.7	Distância de Hausdorff Modificada.....	14
3	METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS.....	15
3.1	Área de estudo e Coleta de dados.....	15
3.2	Dados de tráfego.....	16
3.3	Estimativa das distribuições de velocidade desejada.....	17
3.4	Projeto de experimentos.....	18
3.4.1	Variáveis de Entrada do Projeto de Experimentos.....	19
3.4.2	Variável Resposta.....	21
3.5	Microssimulação de Tráfego.....	21
4	RESULTADOS.....	22
4.1	Análise da Variância e Comparação Múltipla de Médias.....	24
5	CONCLUSÕES.....	28
6	REFERÊNCIAS.....	29

UTILIZAÇÃO DO MÉTODO KAPLAN-MEIER NA ESTIMATIVA DAS DISTRIBUIÇÕES DE VELOCIDADE DESEJADA

Yan Tonin Galvan

Escola de Engenharia

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO

Este artigo aborda a calibração do parâmetro velocidade desejada do microssimulador de tráfego VISSIM para ambiente rodoviário. O estudo foi conduzido utilizando-se dados de um trecho da rodovia BR-290 situado na região metropolitana de Porto Alegre. Para a construção das distribuições, cada veículo da base dados foi categorizado como impedido ou desimpedido com base em diferentes medições de *headway*. As distribuições de velocidade desejada foram criadas a partir da função não-paramétrica de Kaplan-Meier e do ajuste a outras funções paramétricas para inserção no simulador. A otimização foi feita por meio de um projeto de experimentos, em que os fatores controláveis foram os *headways* utilizados na categorização dos veículos. A metodologia utilizada permitiu identificar os fatores controláveis e as interações com efeito significativo, bem como os níveis que geram as melhores distribuições de velocidade desejada. Seus resultados têm a capacidade de reproduzir com maior precisão o desempenho do tráfego em condições não congestionadas.

ABSTRACT

This paper addresses the calibration of the desired speed parameter of the VISSIM traffic simulator for road environment. The study was conducted using data from a section of the BR-290 highway located in the metropolitan area of Porto Alegre. For the construction of the distributions each vehicle of the database was categorized as in *following* or in free flow based on different *headway* measurements. The desired speed distributions were created from the Kaplan-Meier non-parametric function and adjusted to other parametric functions for implementation into the simulator. The optimization was done through a design of experiments and the controllable factors were the *headways* used in vehicle categorization. The used methodology allowed to identify the controllable factors and the interactions with significant effect, as well as the levels that generate the best desired speed distributions. The results have the ability to more accurately reproduce traffic performance under non-congested conditions.

1 INTRODUÇÃO

O uso da tecnologia em sistemas de transportes não é recente, mas com o passar dos anos as experiências se tornaram mais realistas. A engenharia de tráfego, especialmente, beneficia-se de softwares de simulação para analisar a operação do

ambiente viário. Esses programas auxiliam na tomada de decisão de planejadores de transportes, envolvendo o uso mais eficiente de recursos e, inclusive, reduzindo os custos de projetos. O VISSIM é um *software* alemão de microsimulação de tráfego que realiza a análise de impactos em rodovias e ambientes urbanos de forma robusta. Porém, ele ainda não é capaz de modelar consistentemente o perfil de distribuição de velocidades, sendo que esse deve ser conhecido ou estimado previamente.

Conhecer a distribuição de velocidade livre em diferentes cenários é importante por diversas razões. Essa distribuição é utilizada em modelos de simulação microscópica de tráfego como base para a determinação da velocidade desejada de cada veículo. Além disso, tem grande importância do ponto de vista do projeto e das normas de tráfego das rodovias, de modo a gerar um ambiente seguro e confortável para os motoristas. Dessa forma, é interessante saber como esse parâmetro varia em função da rodovia, do clima e do perfil de veículos e de motoristas de uma determinada região.

O objetivo deste artigo é apresentar uma abordagem da estimativa da distribuição de velocidade desejada utilizando dados de *headway* e velocidade de veículos na BR-290 e o estimador Kaplan-Meier. A seção 2 contém o referencial teórico sobre a distribuição de velocidade desejada, além de apresentar o *Product Limit Method*. A seção 3 apresenta a metodologia e procedimentos utilizados. As seções 4 e 5 apresentam, respectivamente, a análise dos resultados e os comentários finais sobre o estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Essa seção aborda a revisão da literatura para a distribuição da velocidade desejada, modelos de identificação de *followers*, bem como conceitos de análise de sobrevivência, *Product Limit Method* e Distância de Hausdorff Modificada.

2.1 Distribuição de velocidade desejada

A velocidade desejada da combinação motorista-veículo é definida como a velocidade em que o motorista está dirigindo quando não sofre influência de outros

usuários da rodovia (Hoogendoorn, 2005). Esse parâmetro é influenciado por características do veículo, da rodovia e do comportamento do motorista.

As primeiras tentativas de estimativa foram feitas por Botma (1999), que apresentou uma descrição de como motoristas escolhem a velocidade desejada, discutindo um modelo comportamental relacionando à ela. Estimar esse parâmetro não é tarefa trivial, visto que em condições normais há tanto veículos trafegando em sua velocidade desejada quanto em *following*. Isso sugere que apenas veículos líderes poderiam dar uma estimativa sem viés na distribuição. Porém como já previsto por Botma (1999) não é isso que ocorre, uma vez que veículos com velocidade desejada mais elevada têm maior probabilidade de estar em *following* do que os com velocidade desejada relativamente mais baixa.

Botma descreve uma série de abordagens para determinação da velocidade livre, dentre as quais podem ser citadas:

- (i) estimativa da velocidade livre considerando velocidade a pequenos volumes de tráfego. Esse método baseia-se no pressuposto de que em volumes de fluxo baixo os motoristas não estão em *following* e, portanto, estão dirigindo com a velocidade desejada. Esses volumes ocorrem em períodos fora do pico (por exemplo, à noite) e não representam a realidade dos horários de pico devido às diferentes condições ambientais e à população que usa a rodovia;
- (ii) extrapolação para baixos fluxos. Esse método permite a utilização de toda a população relevante, mas sabe-se que ele é propenso a erros;
- (iii) aplicação de modelos de simulação. Esse método envolve o uso de um modelo de simulação microscópico para estabelecer relações entre variáveis observáveis e a distribuição de velocidade livre (Hoban, 1980);
- (iv) método baseado no modelo de Erlander. Nesse método uma equação integral é desenvolvida para operações de tráfego em estradas de duas pistas com a distribuição de velocidade livre como um de seus componentes (Erlander, 1971).

Em Botma (1999), conclui-se que todos os métodos citados têm desvantagens severas, razão pela qual outra abordagem de estimação é proposta. Esta é baseada no conceito de observações censuradas, usando uma abordagem de estimativa paramétrica para estimar os parâmetros da distribuição de velocidade livre. As observações de velocidade são marcadas como censuradas (restritas) ou não censuradas (fluxo livre), usando critérios subjetivos (avanço e velocidade relativa).

A literatura reporta métodos elaborados com o objetivo de aproveitar as informações de veículos “censurados” — definidos como veículos que trafegam abaixo da velocidade desejada — para o cálculo da distribuição dessa velocidade. Nesse sentido, pode ser destacado o método Kaplan-Meier (Kaplan e Meier, 1958), que usa análise de sobrevivência para definir distribuições de velocidade desejada a partir de dados de velocidade e *headway* entre veículos. Esse método utiliza três parâmetros para definir se um veículo está em fluxo livre ou em *following*. *Headway* pode ser definido como a distância entre o veículo analisado e o veículo imediatamente à frente, determinando se o motorista é impedido de trafegar na velocidade desejada; e veículos trafegando na faixa à esquerda, impedindo o motorista de fazer uma ultrapassagem.

2.2 Identificação de *Followers*

O *Highway Capacity Manual* (HCM) recomenda o valor de 3 segundos como o *headway* limite para identificação de veículos em *following* (National Research Council, 2010). Isso tem desvantagens óbvias, pois atribuir um único valor de *headway* para classificar veículos em *following* pressupõe que todos os veículos se comportam exatamente da mesma maneira em diferentes condições (de tráfego, geometria, clima), e não leva em consideração a aleatoriedade do comportamento do motorista (Catbagan e Nakamura, 2009).

O uso de *headway* como critério único, portanto, não é suficiente para classificar se um veículo está em *following* ou em fluxo livre. Um seguidor pode, assim, logicamente ser definido como um veículo que se desloca abaixo da sua velocidade desejada devido à presença de um veículo líder relativamente mais lento. Essa definição de veículo seguidor leva em conta a percepção do nível de serviço pelo utilizador, uma vez que pode ser seguramente assumido que o tempo gasto viajando

a uma velocidade reduzida (inferior à velocidade desejada) é diretamente relacionado à satisfação do condutor (Catbagan e Nakamura, 2009).

O problema surge do fato de que as velocidades desejadas de diferentes motoristas variam significativamente, dificultando a avaliação se um veículo é restrito ou não restrito com base em acesso direto a dados isolados (como tempo, velocidade etc.). Um veículo geralmente se torna um seguidor quando sua velocidade atual cai abaixo da velocidade livre (ou desejada) do motorista devido à presença de um veículo líder e à falta de oportunidades de ultrapassagem (Catbagan e Nakamura, 2009).

Se a distribuição de velocidade desejada dos motoristas for conhecida para uma determinada rodovia, é possível replicar razoavelmente as condições existentes, incluindo o comportamento de *following* a ser seguido em um ambiente de simulação. Também pode ser possível calcular a probabilidade de cada veículo estar em *following*, uma vez que essas distribuições de velocidade desejadas sejam conhecidas.

2.3 Análise de sobrevivência

A análise de sobrevivência é uma análise de *time-to-event*, ou seja, quando o resultado de interesse é o tempo até que um evento ocorra. Exemplos de *time-to-event* são: o tempo até uma infecção, a recorrência de uma doença, a duração do desemprego na economia, o tempo até a falha de uma peça ou a vida útil de um produto. É uma parte dos estudos de confiabilidade em engenharia. Nesse caso, geralmente é usado para estudar o tempo de vida de componentes industriais. Em análises de confiabilidade, os tempos de sobrevivência são geralmente chamados de tempos de falha, pois a variável de interesse é quanto tempo um componente funciona corretamente antes de falhar.

A análise de sobrevivência consiste em métodos paramétricos, semiparamétricos e não paramétricos usados para estimar as medidas mais comumente utilizadas em estudos de sobrevivência, compará-las para diferentes grupos e avaliar a relação entre as variáveis preditoras e o tempo de sobrevivência. Algumas distribuições estatísticas de probabilidade descrevem bem os tempos de sobrevivência. As

distribuições comumente usadas são as distribuições exponenciais, Weibull, Normal, Lognormal, Logística e Birnbaum-Saunders.

2.4 Dados censurados

Um conceito importante na análise de sobrevivência é a censura. Os tempos de sobrevivência de alguns indivíduos podem não ser totalmente observados devido a diferentes razões. Em ciências biológicas, isso pode acontecer quando o estudo de sobrevivência (por exemplo, o ensaio clínico) parar antes que os tempos completos de sobrevivência de todos os indivíduos possam ser observados, ou um paciente desiste do acompanhamento.

No contexto industrial, nem todos os componentes podem ter falhado antes do final do estudo de confiabilidade. Em tais casos, o indivíduo sobrevive além do tempo do estudo, e o tempo exato de sobrevivência é desconhecido. Isso é chamado de censura à direita. No que se aplica ao cálculo da distribuição de velocidade desejada, veículos censurados trafegam com velocidade menor que a desejada, logo tem-se uma censura à esquerda.

2.5 Função de sobrevivência

A função de sobrevivência é uma probabilidade de sobrevivência em função do tempo. Ela informa a probabilidade de que o tempo de sobrevivência de um indivíduo exceda um certo valor. Uma vez que a função de distribuição cumulativa, $C(t)$, é a probabilidade de que o tempo de sobrevivência seja inferior ou igual a um determinado ponto no tempo, a função para uma distribuição contínua, $S(t)$, é o complemento da função de distribuição cumulativa, apresentados nas Equações 1 e 2.

$$S(t) = P(\{T > t\}) = \int_t^{\infty} P(u) du = 1 - C(t) \quad (1)$$

No caso de probabilidade de variáveis discretas, o mesmo se verifica:

$$S(t) = P(\{T > t\}) = \sum_{T>t} P(u) = 1 - C(t) \quad (2)$$

2.6 Product Limit Method

O *Product Limit Method* (PLM) é um dos métodos estatísticos de análise de sobrevivência (Kaplan e Meier, 1958) bastante usado na engenharia e na medicina. No que tange a engenharia de transportes, esse método já foi utilizado na formulação de uma curva de probabilidade de não ocorrência de *breakdown* (Elefteriadou *et al.*, 1995; Zechin *et al.*, 2018) e como método para estimar distribuições de velocidade desejada com dados de veículos censurados (Geistefeldt, 2015). Em sua formulação original, o estimador é definido pela Equação 3.

$$S(t) = \prod_{i: t_i \leq t} \left(\frac{n_i - d_i}{n_i} \right) \quad (3)$$

Onde: n_i : número de sobreviventes antes do tempo t_i , caso não haja dados censurados. Na presença de dados censurados, é número de sobreviventes menos o número de casos censurados;

d_i : número de indivíduos.

Como a estimativa da velocidade desejada emprega análise de sobrevivência com censura à esquerda, o estimador Kaplan-Meier modificado oferece uma estimativa melhor da distribuição (Hoogendoorn, 2005). Em resumo, a distribuição acumulada da velocidade desejada é complementar ao estimador PLM. A Equação 4 apresenta o cálculo para a função de distribuição da velocidade desejada $F_{d,\text{mod}}(v)$.

$$F_{d,\text{mod}}(v) = 1 - \prod_{i: v_i \leq v} \frac{n_i - d_i}{n_i} \quad (4)$$

Onde: v : velocidade (km/h);

v_i : velocidade do veículo i ;

n_i : número de veículos com velocidade $v \geq v_i$;

d_i : número de veículos em velocidade livre $v = v_i$.

Para obter a distribuição completa, essa função deve ser ajustada por meio de uma função de máxima-verossimilhança que leva em conta os veículos censurados. Essa função é dada pela Equação 5.

$$L = \prod_{i=1}^n f_d(v_i)^{\delta_i} \cdot [1 - F_d(v_i)]^{1-\delta_i} \quad (5)$$

Onde: $f_d(v_i)$: função de densidade estatística da velocidade;

$F_d(v_i)$: função de distribuição cumulativa da velocidade;

n : número de veículos na amostra;

δ_i : 1, caso veículo esteja em *free-following* (não censurado);

δ_i : 0, caso veículo esteja impedido (censurado).

2.7 Distância de Hausdorff Modificada

A Distância de Hausdorff (DH) (também conhecida como métrica de Hausdorff), em sua formulação original, mede o quão distante dois subconjuntos do espaço de métrica estão um do outro. Essa medida representa a máxima distância mínima entre pontos de conjuntos distintos. Porém, na comparação entre nuvens de velocidade x volume essa métrica não é indicada, pois é muito sensível a presença de *outliers*. Por conta disso, utiliza-se nesse estudo a Distância de Hausdorff Modificada (DHM), uma adaptação da original que leva em consideração a média das distancias mínimas entre as nuvens de pontos, reduzindo o efeito dos *outliers* conforme a amostra aumenta.

Por definição, a DH entre as nuvens de pontos A e B não são necessariamente iguais, devido ao fato de um mesmo ponto poder ser mais próximo a mais de um ponto de um conjunto comparado. Sendo assim, a DHM é o máximo entre as duas médias. Essa medida tem sido utilizada para comparar dados de tráfego coletados em campo com dados simulados para fins de calibração de microssimuladores de tráfego. Nesses casos, costuma-se aplicar ao DMH uma função exponencial negativa, de modo a torná-lo do tipo maior-é-melhor, requisito para o correto funcionamento de algumas heurísticas de otimização, como algoritmo genético (Bethonico *et al.*, 2016; Zechin *et al.*, 2018).

3 METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS

A metodologia utilizada para este estudo foi baseada na estrutura definida pela Figura 1. As subdivisões a seguir apresentam a descrição detalhada do que fora feito em cada etapa.

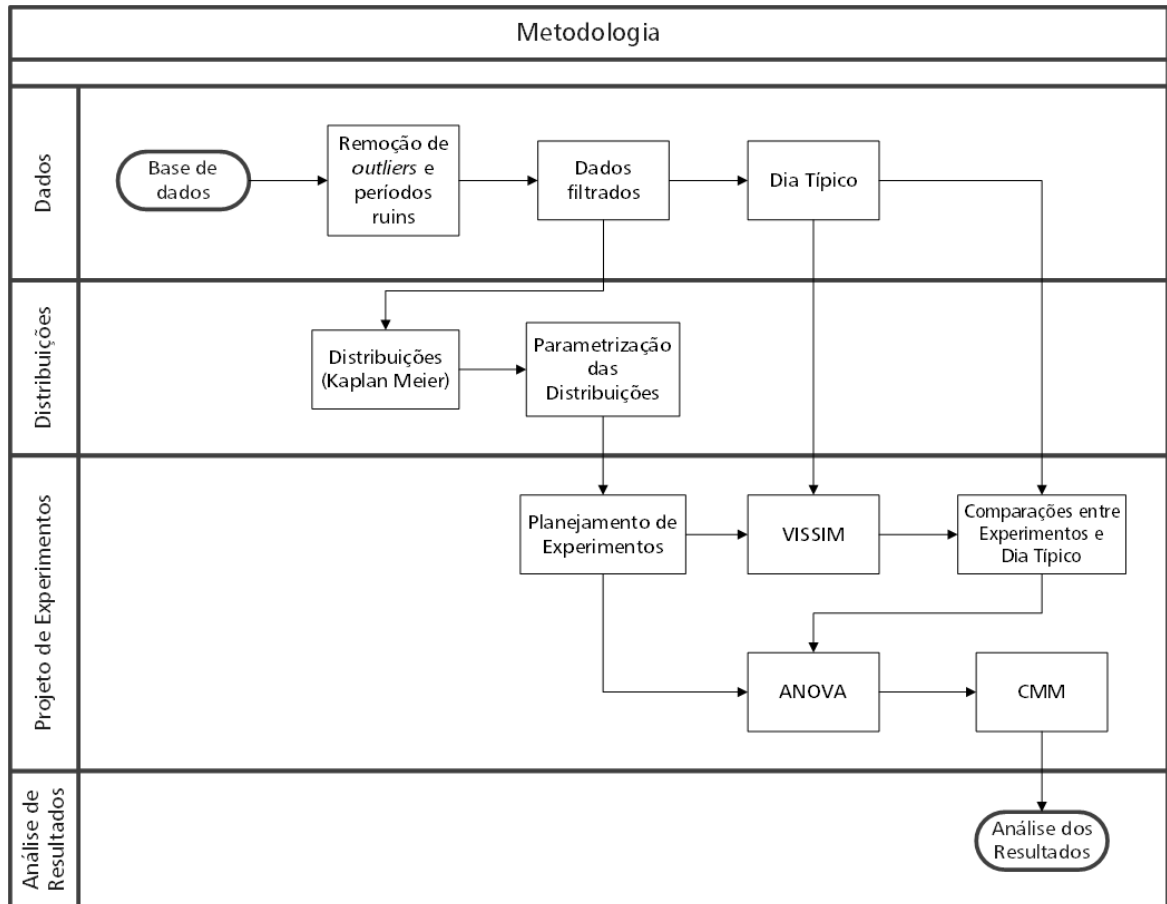


Figura 1: Esquemática da Metodologia seguida

3.1 Área de estudo e Coleta de dados

A área de estudo localiza-se no km 87 da BR-290. Caracteriza-se por ser um trecho de *freeway* retilíneo e homogêneo, com 4 faixas, e é uma das principais vias de ligação entre Porto Alegre e a região metropolitana. O sentido da via estudado foi capital-interior (Porto Alegre para região metropolitana).

O trecho apresenta um grande fluxo de veículos, acentuado em dois momentos do dia: um pico no período da manhã e outro, um pouco menor, no final da tarde. A localização da área de estudo está indicada na Figura 2 e o perfil de fluxo para alguns dias típicos (cores representam diferentes dias) é apresentado na Figura 3.

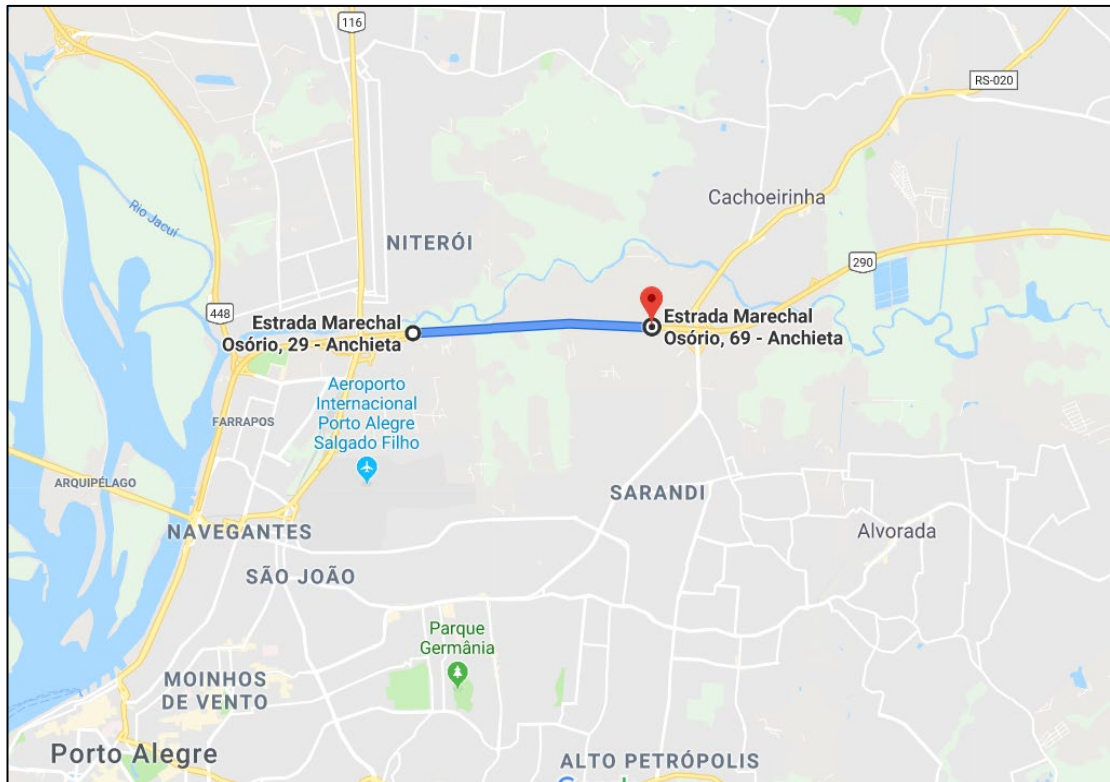


Figura 2: Localização da área de estudo

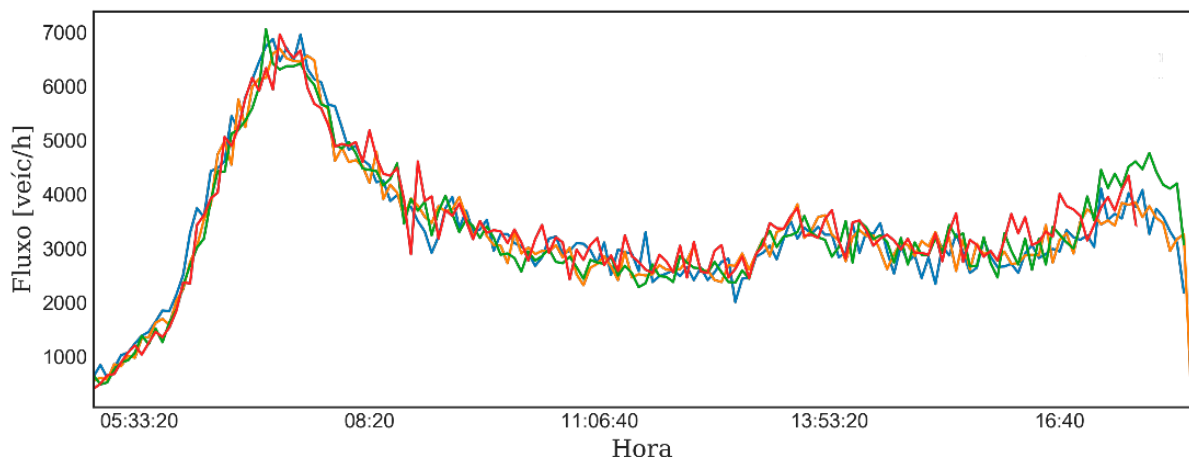


Figura 3: Perfil de fluxo típico

3.2 Dados de tráfego

Os dados de tráfego utilizados no estudo foram concedidos pela Triunfo Concepa, concessionária que operava a BR-290 durante a coleta de dados. Foram disponibilizados dados referentes a dois anos de tráfego (2017 e 2018), coletados por um sensor do tipo laço indutivo nas 4 faixas do sentido capital-interior. Os

dados são desagregados e representam o horário de passagem de cada veículo com precisão de um décimo de segundo, sua velocidade com precisão unitária e o comprimento de cada veículo, suficiente para classificar como veículo leve ou pesado e a faixa de rolamento.

Por meio de uma rotina em Python, foi feita uma análise dos dados recebidos com objetivo de identificar períodos em que os sensores apresentaram problemas, sendo esses excluídos do estudo. Foram removidos também períodos em que ocorreram acidentes e períodos de chuva, obtidos a partir de dados pluviométricos do banco de dados do Centro Nacional de Monitoramento de Desastres Naturais (CEMADEN), referentes a um pluviômetro que dista 8 km da área dos detectores de tráfego.

3.3 Estimativa das distribuições de velocidade desejada

Para estimar as distribuições de velocidade desejada foi criada uma rotina em Python que classifica os veículos do banco de dados em censurados ou não, de acordo com os parâmetros de cada experimento do projeto de experimentos. Em seguida, aplicou-se o método PLM para estimar as distribuições. Como o PLM é um método não paramétrico, sua distribuição não é contínua. Por esse motivo, foram testadas outras funções de distribuição de probabilidade para conhecer a que melhor se adaptava aos resultados obtidos pelo PLM. Para o ajuste das distribuições paramétricas foi utilizado o método de maximização da verossimilhança entre as distribuições Normal (LNF), Logística (LLF) e Weibull (WBF). As parametrizações podem ser observadas na Figura 4.

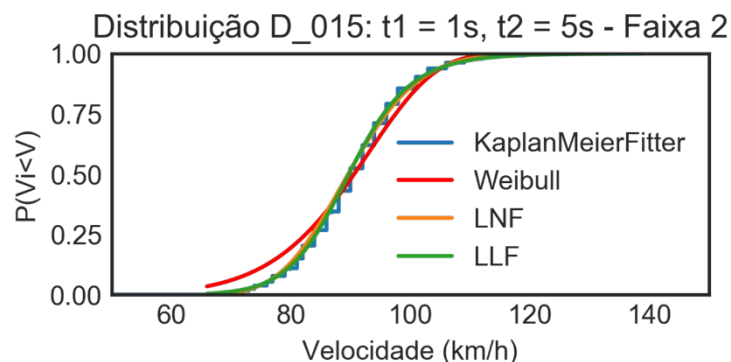


Figura 4: Parametrizações da distribuição D_015_2

Com base na análise visual, a distribuição de Weibull foi a que menos representou os dados empíricos. O critério para escolha da melhor parametrização foi o gráfico Q-Q (quantil-quantil), que é um método gráfico para comparar duas distribuições de probabilidade, traçando seus quantis uns contra os outros. Quanto mais os pontos se aproximam da reta $x=y$, maior é a semelhança entre as distribuições. De acordo com os gráficos Q-Q, a distribuição de probabilidade acumulada da Logística foi a que melhor se adaptou aos dados empíricos. A Figura 5 apresenta o gráfico Q-Q de cada uma das parametrizações.

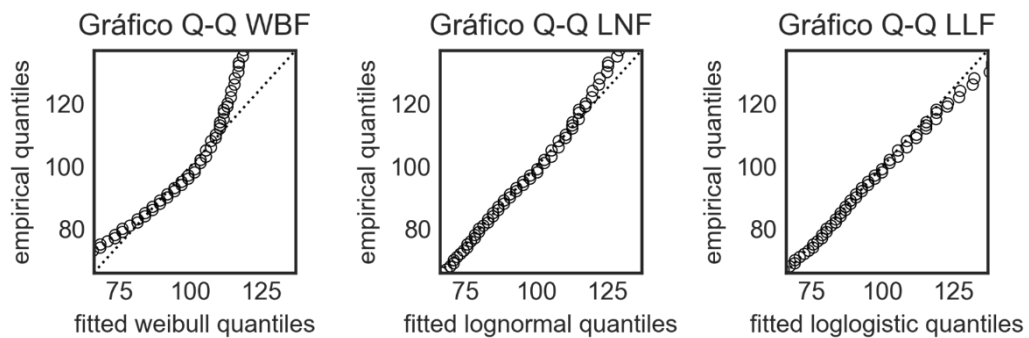


Figura 5: Gráficos Q-Q para as distribuições analisadas

3.4 Projeto de experimentos

A metodologia de projeto de experimentos tem sido aplicada virtualmente em todas as áreas de conhecimentos, destinada a otimizar o planejamento, execução e análise de um experimento. Seu uso permite que a estruturação de uma sequência de ensaios, de forma a traduzir os objetivos preestabelecidos pelo pesquisador. A eficiência do planejamento de experimentos é superior, em termos de informação, a qualquer outra sequência não estruturada de ensaios. A Tabela 1 apresenta as principais informações referentes ao PE.

Tabela 1: Síntese do Projeto de Experimentos

Termos	Definição	Valores utilizados no estudo
Fatores	variáveis que desejamos descobrir o efeito no processo	Parâmetros de definição de veículo seguidor (t1-leve, t2-leve e t1-pesado)
Níveis do fator	Valores ou estados que o fator irá assumir no experimento	5 níveis para cada um dos fatores no projeto.

Termos	Definição	Valores utilizados no estudo
Tratamentos	Diferentes combinações que podemos fazer com cada nível de cada fator.	Cada ensaio resulta da combinação de distribuições de velocidade desejada geradas pelos fatores do experimento.
Ensaio	Experimentos realizados em cada tratamento.	Simulação de tráfego no VISSIM.
Repetições	Número de vezes que um experimento é realizado. Fornecem uma base para o cálculo do erro experimental.	No presente estudo foi adotado como 5 o número de repetições de cada experimento
Variável de resposta	É alguma medida do processo que o caracterize em relação aos fatores de controle. São os dados utilizados na estatística.	Foi adotada uma adaptação da DMH como variável de resposta. Essa variável é do tipo maior-é-melhor

Fonte: Elaborado pelo autor

3.4.1 Variáveis de Entrada do Projeto de Experimentos

Os fatores estudados no projeto de experimento derivam da metodologia adotada para a classificação de veículos em fluxo livre e censurados, proposta por Geistefeldt (2015). Essa considera três critérios para identificar veículos censurados:

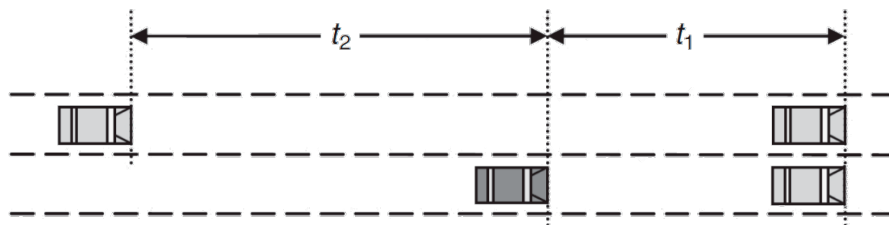


Figura 6: Representação gráfica dos critérios de identificação de followers

- (i) possuir um *headway* maior que t_1 em relação ao veículo imediatamente a jusante na mesma faixa;
- (ii) possuir um *headway* maior que t_1 em relação ao veículo imediatamente a jusante na faixa à esquerda, caso exista;
- (iii) possuir um *headway* maior que t_2 em relação ao veículo imediatamente a montante na faixa à esquerda, caso exista.

O critério (i) é usado para identificar a ocorrência de fluxo livre a partir do *headway*. Seu valor é diferente para veículos leves e pesados. Os critérios (ii) e (iii) levam em consideração a impossibilidade de ultrapassagem, partindo do pressuposto de que

veículos que não estejam trafegando na sua velocidade desejada tendem a ultrapassar ou mudar de faixa, caso isso seja possível.

Geistefeldt (2015) considera os três critérios e utiliza $t1 = 2s$ e $t2 = 4s$ para veículos leves. Para veículos pesados considera apenas os critérios (i) e (ii), e utiliza $t1 = 4s$. No caso da primeira faixa, devido a não existência de faixa à esquerda, utiliza-se apenas o critério (i) para veículos leves e pesados. A partir dessa abordagem, foi levantada a necessidade de entender como esses valores de *headways* influenciam nas distribuições de velocidade desejada obtidos a partir do PLM. Dessa forma, os fatores escolhidos para o projeto de experimentos foram $t1$ e $t2$. Porém, como o tráfego da região abriga tanto veículos leves e pesados, e os valores de $t1$ são diferentes, esse parâmetro foi dividido em dois fatores: $t1$ -leve, relativo a veículos leves; e $t1$ -pesado, relativo a veículos pesados. Os fatores utilizados no PE e seus respectivos níveis são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Fatores do PE

Fatores	Níveis	Valores [s]
t1-leve	5	{1,0s; 2,0s; 3,0s; 4,0; 5,0s}
t2-leve	5	{1,0s; 2,0s; 3,0s; 4,0; 5,0s}
t1-pesado	5	{2,0s; 3,0s; 4,0; 5,0s; 6,0s}

Pela escolha do projeto fatorial completo, cada experimento usa distribuições de velocidade oriundas da aplicação dos critérios propostos por Geistefeldt (2015) e da aplicação do método PLM nos dados de tráfego. Assim, foram gerados 125 experimentos, cada um com 8 distribuições de velocidade (uma para cada uma das 4 faixas, para veículos leves e pesados).

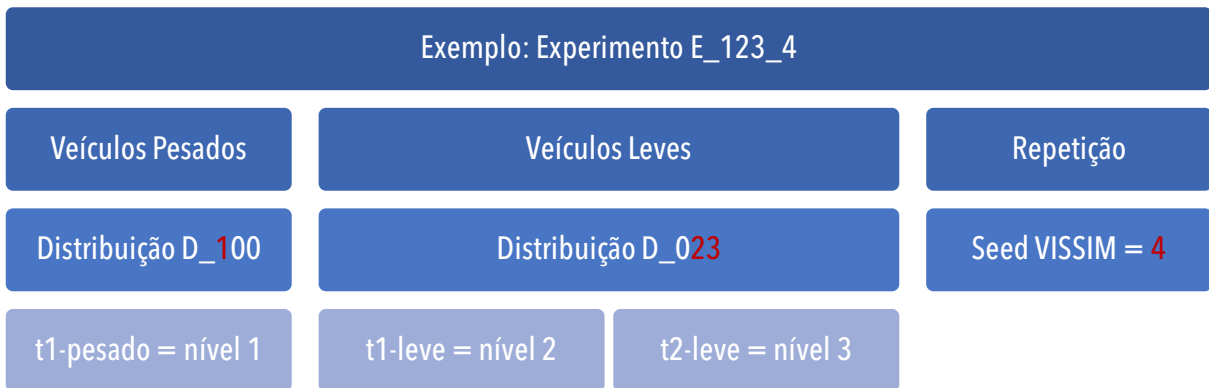


Figura 7: Codificação dos Experimentos

A aleatoriedade gerada no simulador depende do valor de uma “semente aleatoria” definida pelo usuario, de modo que simulações com a mesma semente e os mesmos parâmetros resultam idênticas. Por isso, as repetições do experimento são feitas variando-se a semente aleatoria (Seed), a qual é controlada e utilizada como bloco do PE. Dessa maneira, é possível controlar o erro gerado pela estocasticidade das simulações e reduzi-lo do termo de erro do projeto.

3.4.2 Variável Resposta

A partir dos resultados das simulações foram geradas nuvens de fluxo × velocidade, agregando-se os dados em intervalos de 5 minutos. Utilizou-se uma adaptação da Distância de Hausdorff Modificada para comparar as nuvens das simulações com as obtidas em campo a fim de se medir e comparar os efeitos dos experimentos. A adaptação feita consiste em aplicar uma função exponencial negativa para ressaltar os efeitos das melhores respostas (DMH menores) e tornar a variável resposta como sendo do tipo maior-é-melhor. A função da variável resposta é dada pela Equação 6.

$$VR = 100 \cdot e^{-1.683 \cdot DMH} \quad (6)$$

3.5 Microssimulação de Tráfego

A modelagem do trecho foi feita no microssimulador PTV VISSIM, baseada no modelo de *car-following* de Wiedemann 99. Os parâmetros utilizados foram obtidos a partir da calibração de Caleffi (2018) do km 96 da BR-290, indicados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros de *car-following*

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
CC0 (<i>Standstill distance</i>)	1,4	CC3 (<i>Threshold of entering following</i>)	-5,6
CC1 (<i>Headway time</i>)	0,9	CC4&CC5 (<i>Following thresholds</i>)	$\pm 0,5$
CC2 (<i>Following variation</i>)	4,0	<i>Safety distance reduction factor</i>	0,3

A simulação compreende o período das 5h às 17h, totalizando 12h de simulação. Como output da simulação foram obtidos dados desagregados do instante de passagem de cada veículo, sua respectiva velocidade e tipo.

4 RESULTADOS

Nessa seção são apresentados os resultados do projeto de experimentos. Eles contemplam análise da variância (ANOVA), comparação múltipla de médias (CMM) e otimização. Foram realizadas 625 simulações que levaram 20 horas para conclusão, em um computador Windows 10 com processador Intel Core i5-4430 e 8 Gb de memória.

A partir dos arquivos de saída do VISSIM, foram gerados gráficos para visualização dos resultados dos experimentos. A Figura 8 apresenta os gráficos de velocidade \times volume agregados por faixa a cada 5 minutos para as 5 repetições de um dos experimentos. A partir da análise dos gráficos, confirmou-se que conforme os níveis de t_1 e t_2 aumentam, as nuvens se deslocam para cima, indicando um aumento da velocidade média, conforme esperado. Além disso, percebe-se que as repetições geraram nuvens semelhantes, indicando um baixo erro associado ao experimento.

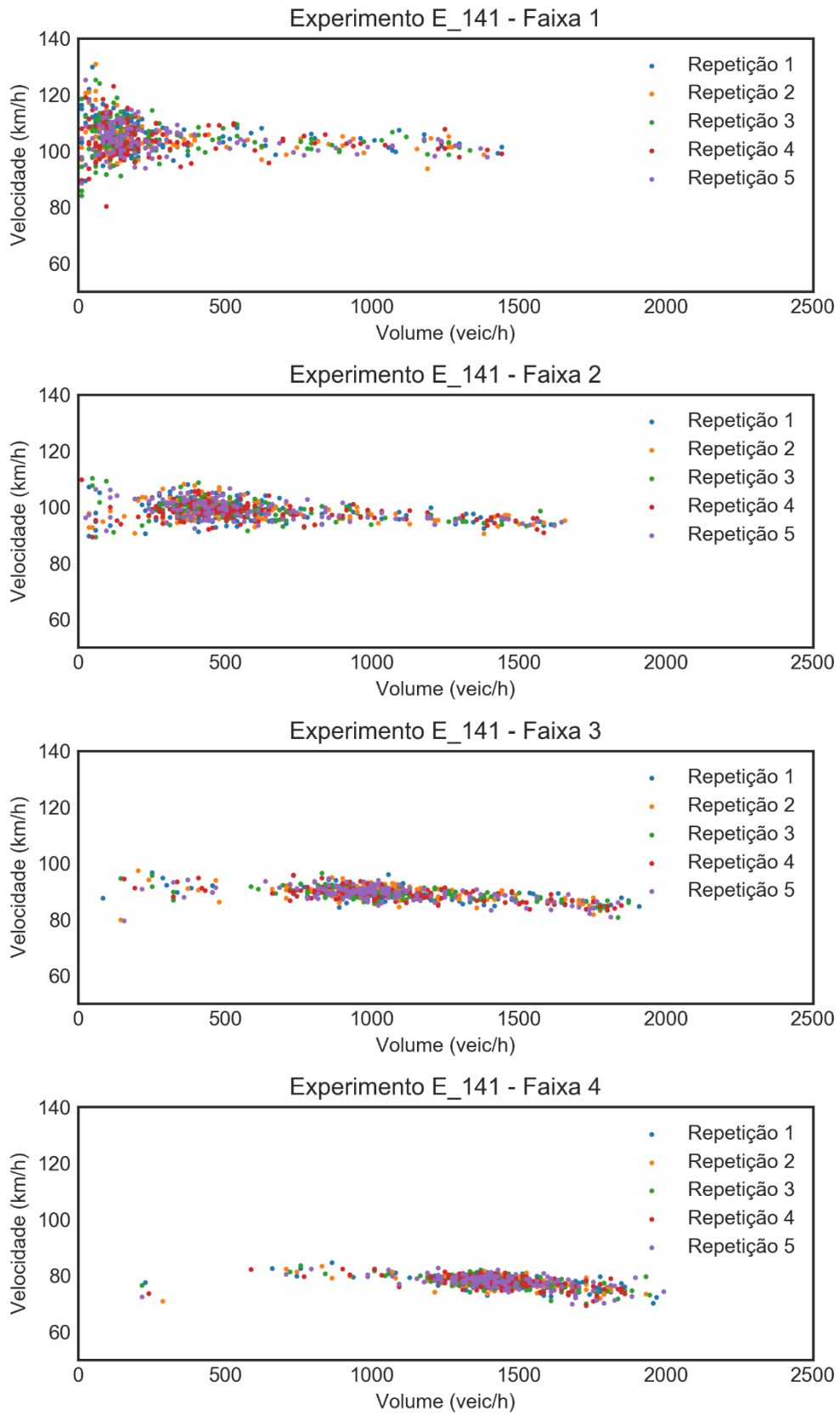


Figura 8: Velocidade x volume agregado por faixa para o experimento E_141

A métrica utilizada para medir a semelhança entre as nuvens de pontos do dia típico e das simulações foi a DMH. Ela foi calculada com base nos dados agregados das 4 faixas. A Figura 9 apresenta o gráfico volume × velocidade do dia típico e para o experimento E_141_3.

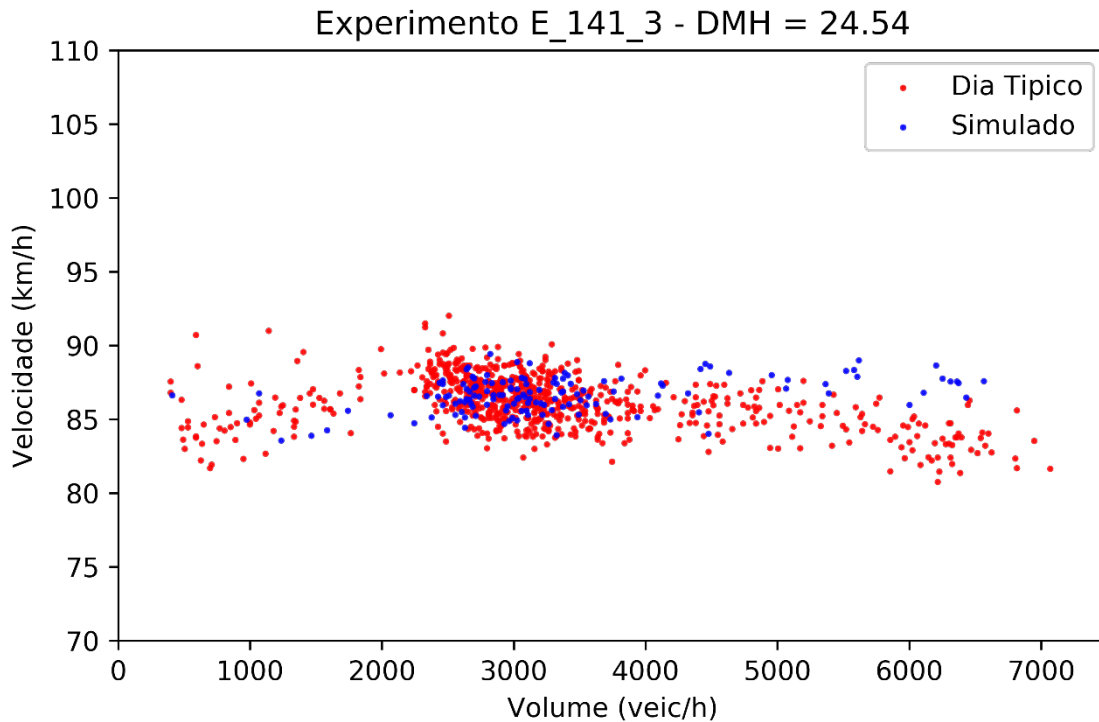


Figura 9: Comparação volume × velocidade agregado nas 4 faixas

4.1 Análise da Variância e Comparação Múltipla de Médias

A ANOVA identificou os efeitos principais dos fatores controláveis e suas interações. Neste estudo foi utilizado um intervalo de confiança de 95%, com resultados significativos para p-valor inferior a 0,05. Os resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados da ANOVA

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Blocos	4	1801,15	450,287	426,57	0,00E+00
t1-leve	4	146,49	36,623	34,69	0,00E+00
t2-leve	4	59,58	14,894	14,11	6,51E-11
t1-pesado	4	17,62	4,405	4,17	2,47E-03

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
t1-leve*t2-leve	16	86,49	5,405	5,12	6,04E-10
t1-leve*t1-pesado	16	12,29	0,768	0,73	7,66E-01
t2-leve*t1-pesado	16	4,08	0,255	0,24	9,99E-01
t1-leve*t2-leve*t1-pesado	64	25,29	0,395	0,37	1,00E+00
Erro	496	523,58	1,056		
Total	624	2676,56			

Foi constatado que todos os efeitos principais e o efeito de interação entre t1-leve e t2-leve são significativos. Além disso, o efeito da semente aleatória como bloco do PE também é significativo, confirmando a hipótese de que a blocagem nas repetições, com a variação controlada da semente aleatória do simulador, contribui para aumentar a precisão do experimento. O gráfico dos efeitos principais para a distância de Hausdorff modificada é apresentado na Figura 10.

O fator t1-pesado não apresenta interações com outros fatores e, portanto, pode ser otimizado por meio de seu efeito principal. Para fazer a otimização realizaram-se comparações múltiplas de médias utilizando os métodos de Turkey e Fischer. Ambos os resultados indicaram que não existe diferença significativa entre os níveis desse fator. Por conta disso, assume-se que todos os níveis considerados estão em empate técnico em relação à variável de resposta utilizada, e seus efeitos são estatisticamente equivalentes. Isso pode ser explicado pela baixa taxa de veículos pesados presentes no tráfego da rodovia.

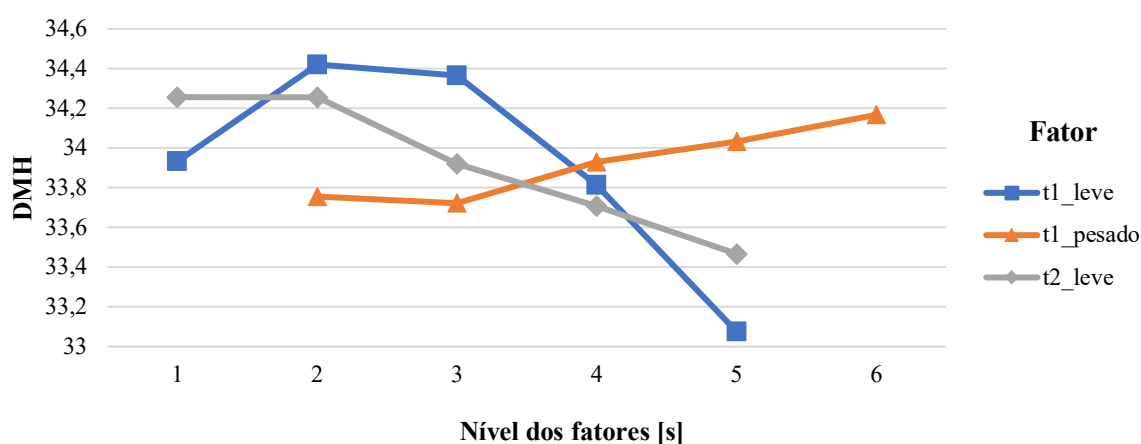


Figura 10: Efeitos principais dos fatores controláveis

Os fatores t1-leve e t2-leve possuem efeito de interação significativo e são otimizados pela avaliação desse efeito. O gráfico da interação está apresentado na Figura 11.

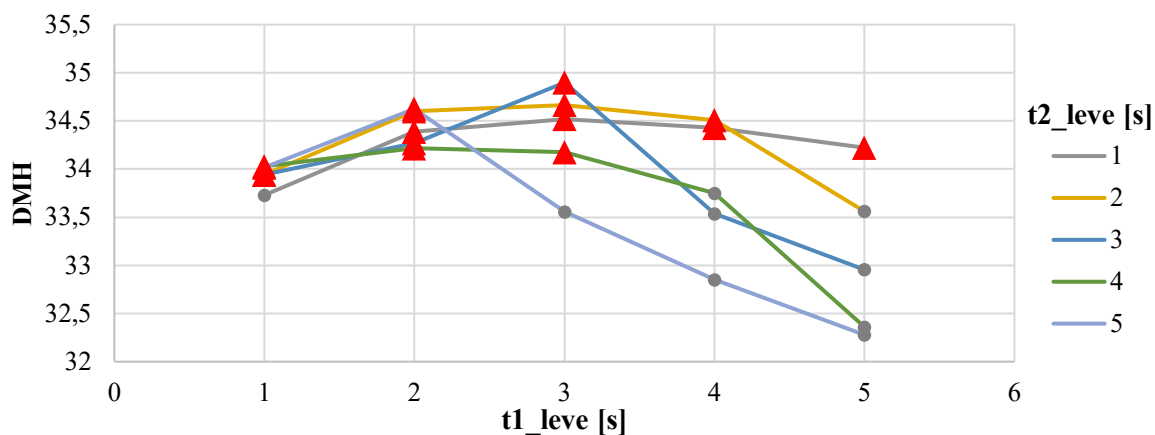


Figura 11: Efeito de interação de t1-leve*t2-leve. Os pontos em triângulo apresentam empate técnico na otimização do efeito desses fatores.

A combinação desses fatores que otimiza a variável resposta com nível de significância de 95% é t1-leve=3s e t2-leve=3s. A comparação múltipla de médias pelo método de Fischer, também com nível de significância de 95%, indica empate técnico dessa combinação com as demais marcadas em vermelho na Figura 5. Isso significa que todos eles possuem efeito estatisticamente equivalente sobre a variável de resposta escolhida neste estudo. Isso pode ser explicado devido à baixa proporção (<10%) de veículos pesados na composição do tráfego na via.

As distribuições geradas a partir da combinação dos níveis ótimos do projeto de experimentos está apresentada na Figura 12.

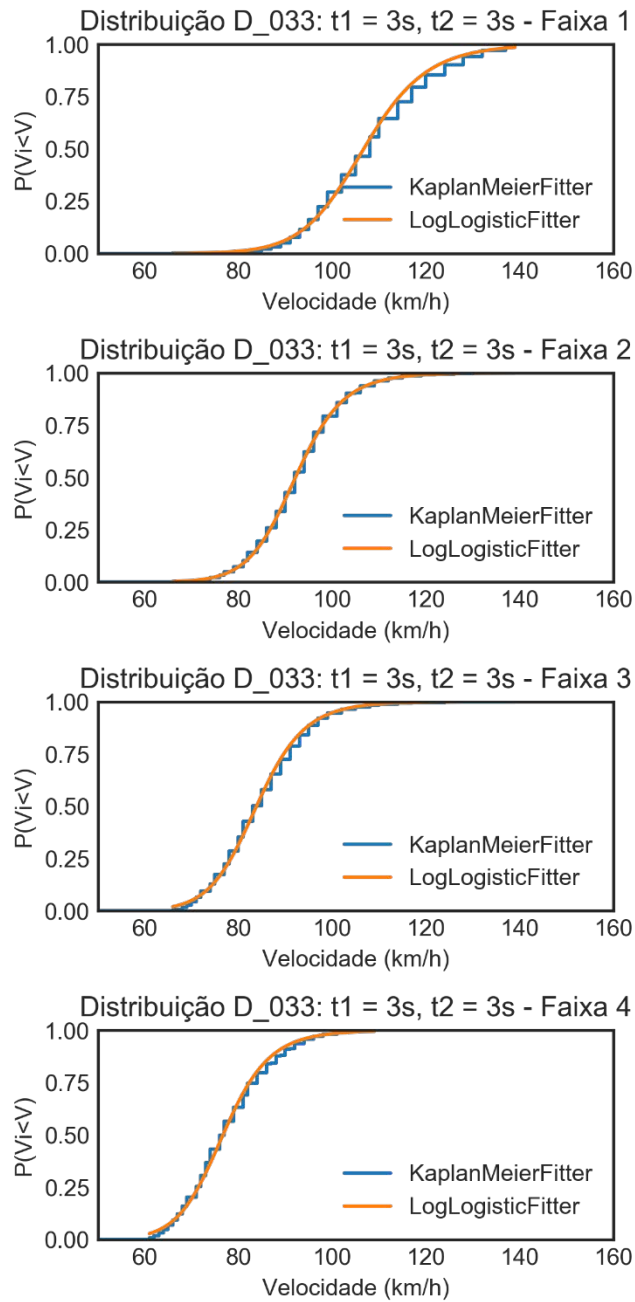


Figura 12: Distribuições de velocidade desejada para os níveis ótimos do PE

Como os parâmetros de calibração do modelo utilizado no VISSIM foram mantidos constantes, sendo as únicas variáveis as distribuições de velocidade, que com a otimização alcançaram um valor ótimo, obteve-se nas simulações uma boa representação dos valores observados em campo, comprovando assim a eficácia da metodologia proposta.

5 CONCLUSÕES

Neste estudo propôs-se uma metodologia para a calibração da velocidade desejada utilizada no microssimulador de tráfego VISSIM em ambiente rodoviário. As distribuições de velocidade desejada foram feitas utilizando-se a função não paramétrica de Kaplan-Meier e dados de velocidade e *headway* coletados em campo. Verificou-se que esta distribuição é melhor representada pela função paramétrica Logit.

A escolha das distribuições de velocidade desejada mais adequadas para o cenário estudado foi feita por meio de um projeto de experimentos. Seus Fatores controláveis foram os *headways* utilizados para estimar as distribuições e os experimentos consistiram em simulações no VISSIM com as distribuições estimadas. Os dados provenientes das simulações foram comparados com os dados de campo por meio da Distância Modificada de Hausdorff, sendo esta a variável resposta do PE.

A metodologia utilizada permitiu identificar distribuições que melhor se ajustam aos dados de campo e quais dos fatores e suas interações são significativos. Constatou-se que mais de uma distribuição é estatisticamente adequada, uma vez identificado empate técnico entre diferentes níveis dos fatores controláveis. Conclui-se que a utilização dessa metodologia traz vantagens pela sua abordagem simples e por utilizar dados de fácil aquisição. Seus resultados têm a capacidade de reproduzir com maior precisão o desempenho do tráfego em condições não congestionadas.

Sugere-se para trabalhos futuros a avaliação do uso de diferentes variáveis resposta na metodologia apresentada. Além disso, neste estudo foi testada apenas as variações dos níveis, e não o uso/não uso das métricas de *headway* para construção das distribuições de velocidade desejada. Portanto, recomenda-se também que o efeito da utilização/não utilização desses parâmetros seja estudado, bem como o de outros parâmetros eventualmente utilizados para estimar as distribuições.

6 REFERÊNCIAS

- Bethonico, F. C., Piva, F. J., e Setti, J. R. (2016) Calibração de Microsimuladores de Tráfego Através de Medidas Macroscópicas. *Anais do XXX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET*. Rio de Janeiro, RJ.
- Caleffi, F. (2018) *Proposição de um método de harmonização da velocidade baseado em modelo de previsão de conflitos veiculares*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Obtido de <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/179552>
- Catbagan, J. L., e Nakamura, H. (2009) Desired Speed Distributions on Two-Lane Highways under various Conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2088(1), p. 218–226. doi:10.3141/2088-23
- Elefteriadou, L., P. Roess, R., e R. McShane, W. (1995) Probabilistic nature of breakdown at freeway merge junctions. *Transportation Research Record*, v. 1484, p. 80–89.
- Erlander, S. (1971) A mathematical model for traffic on a two-lane road with some empirical results-II. Empirical results. *Transportation Research*, v. 5(2), p. 149–175. doi:10.1016/0041-1647(71)90016-5
- Geistefeldt, J. (2015) Empirical Estimation of Desired Speed Distributions for Microscopic Traffic Simulation. *Transportation Research Record*, v. 2490(1), p. 41–46. doi:10.3141/2490-05
- Hoban, C. J. (1980) *Overtaking lanes on two-lane rural highways*. (degree granting institution Monash University, Ed). Thesis (Ph.D.) Monash University, 1980, Melbourne.
- Hoogendoorn, S. P. (2005) Unified approach to estimating free speed distributions. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 39(8), p. 709–727. doi:10.1016/j.trb.2004.09.001
- Kaplan, E. L., e Meier, P. (1958) Nonparametric Estimation from Incomplete Observations. *Journal of the American Statistical Association*, v. 53(282), p. 457–481. doi:10.2307/2281868
- National Research Council. (2010) *Highway Capacity Manual*. Washington D.C.
- Zechin, D., Acosta, D. R., Cybis, H. B. B., e Abreu, R. (2018) Influência da chuva na probabilidade de Breakdown. *Anais do XXXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET*. Gramado, RS.