

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

Paula Manoela dos Santos

**Método de calibração de um modelo veículo seguidor para BRT e
ônibus em corredor segregado**

Porto Alegre
março 2013

Paula Manoela dos Santos

**Método de calibração de um modelo veículo seguidor para BRT e
ônibus em corredor segregado**

Dissertação de Mestrado 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, na área de concentração de Sistemas de Transportes.

Orientador: Luis Antonio Lindau

Porto Alegre
março 2013

Paula Manoela dos Santos

Método de calibração de um modelo veículo seguidor para BRT e ônibus em corredor segregado

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção 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.

Porto Alegre, março de 2013.

Prof. Luis Antonio Lindau

Orientador PPGEP/UFRGS

Prof. José Luis Duarte Ribeiro

Coordenador PPGEP/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Profa. Christine Tessele Nodari, Dr. (PPGEP/UFRGS)

Profa. Helena Beatriz Bettela Cybis, Ph.D (PPGEP/UFRGS)

Profa. Leticia Dexheimer, Dr. (UFPel/CIM)

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Luis Antonio Lindau, orientador deste trabalho, pelos conhecimentos a mim transmitidos.

Ao Rodrigo Castilho, pela disposição, pelos ensinamentos e pela paciência sempre confortante.

Ao Guillermo Petzhold pela companhia e ajuda na coleta dos dados em Curitiba.

Ao meu marido Felipe Rocha pelo apoio e incentivo em todos os momentos da vida.

Aos meus pais Renate e Juarez Santos e às minhas irmãs Claudia, Greyce e Roberta pelo amor incondicional.

Equipped with his five senses, man explores the universe
around him and calls the adventure Science.

Edwin Powell Hubble

RESUMO

SANTOS, P. M. **Método de calibração de um modelo veículo seguidor para BRT e ônibus em corredor segregado.** 2013. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

O modelo veículo seguidor – ou *car-following* – é o coração dos *softwares* de simulação microscópica de tráfego. Quando bem calibrados, esses *softwares* são capazes de replicar a realidade em ambiente controlado. Ainda hoje há uma resistência quanto à calibração do modelo veículo seguidor e, mesmo que muitos trabalhos relatem formas de realizá-la, são escassas as referências na literatura sobre calibração utilizando dados de sistemas ônibus. Este trabalho consiste na elaboração de um método de calibração do modelo veículo seguidor de Gipps, combinado ao modelo de aceleração linear, para a replicação da operação de ônibus em corredores exclusivos. A elaboração do método iniciou com uma revisão dos principais modelos veículo seguidor e uma posterior avaliação dos modelos GHR e de Gipps para manobras típicas de sistemas ônibus. A seguir elaborou-se o procedimento de calibração utilizando coleta de dados por meio de filmagens da operação dos ônibus em corredores e da extração dos dados utilizando uma ferramenta de reconhecimento de imagem. O método das coordenadas retangulares foi utilizado para corrigir a paralaxe. Concomitante às filmagens analisou-se visualmente a ocupação dos ônibus para que as taxas de aceleração e desaceleração dos ônibus pudessem ser diferenciadas conforme o nível de ocupação. A calibração foi realizada através da comparação da distância percorrida pelos veículos ao longo do tempo e as correspondentes modeladas. Os resultados para taxas de aceleração e desaceleração obtidas a partir de dados coletados em Curitiba evidenciam a validade do procedimento. A simplicidade do método desenvolvido é uma característica importante, pois permite a replicação em outros ambientes sem a necessidade de equipamentos sofisticados.

Palavras-chave: modelo veículo seguidor, Gipps, BRT, simulação de sistemas ônibus.

ABSTRACT

SANTOS, P. M. **Método de calibração de um modelo veículo seguidor para BRT e ônibus em corredor segregado.** 2013. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

The car-following model is the heart of the traffic simulation software and it is able to replicate real traffic conditions in a controlled environment when properly calibrated. Still today there is resistance on the car-following model calibration and, even though many papers report calibration forms of this model, there are scarce references in the literature about calibration using bus systems data. This work is the development of a method for calibrating the Gipps car-following model, combined with the free linear acceleration model, for replication of buses operation in exclusive lanes. We initiated the method planning with a review of the main car-following model and evaluation of GHR and Gipps for typical bus systems maneuvers. In the next step we developed the calibration procedure using data collection through filming bus operation and drawing out data using a tool for image recognition. We used the rectangular coordinates method to parallax correction. We also visually analyzed the buses occupation simultaneously to filming, so bus acceleration and deceleration rates could be differentiated according to the occupancy level. Calibration was achieved by comparing the vehicle distance traveled over time and corresponding modeled. The results for acceleration and deceleration rates and speed desired values obtained from data collected in Curitiba demonstrate the validity of the procedure. An important feature of this method is the plainness, as it enables replication in other environments without the need for sophisticated equipment.

Key-words: car-following model, Gipps, BRT, bus systems simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: diagrama das fases do modelo PARAMICS.....	26
Figura 2: relação entre os <i>softwares</i> de simulação de tráfego e seus modelos-base.....	29
Figura 3: gráfico da aceleração dos veículos ao longo do sem paradas.....	34
Figura 4: posição dos veículos ao longo do tempo.....	34
Figura 5: posição dos veículos ao longo do tempo com parada de 20 segundos.....	35
Figura 6: aceleração ao longo do tempo com parada de 20 segundos.....	36
Figura 7: aceleração ao longo do tempo com tempo de reação de um segundo.....	37
Figura 8: aceleração ao longo do tempo com tempo de reação de 1,5 segundo.....	37
Figura 9: aceleração ao longo do tempo com distância entre veículos de 38 metros.....	38
Figura 10: aceleração ao longo do tempo (a) distância entre veículos de 67 metros e (b) distância entre veículos de 84 metros.....	39
Figura 11: velocidade relacionada à posição dos veículos (a) distância entre veículos de 67 metros e (b) distância entre veículos de 84 metros.....	39
Figura 12: velocidade ao longo do tempo (a) distância entre veículos de 67 metros e (b) distância entre veículos de 84 metros.....	40
Figura 13: velocidade relacionada à posição de dois pelotões de 10 veículos.....	40
Figura 14: relação entre pontos do plano do filme e do plano da via.....	47
Figura 15: níveis de lotação do ônibus.....	48
Figura 16: ângulo das filmagens disponíveis para validação do método.....	51
Figura 17: instantes em que o ônibus passa pelas marcas no meio fio.....	51
Figura 18: esquema para cálculo da distância percorrida.....	52
Figura 19: aderência dos dados observados ao modelo.....	54
Figura 20: programação para a filmagem.....	54
Figura 21: vista desde o local de filmagem da aceleração.....	55
Figura 22: vista desde o local de filmagem da desaceleração.....	56
Figura 23: pontos medidos em campo para coleta das acelerações.....	57
Figura 24: pontos medidos em campo para coleta das desacelerações.....	58
Figura 25: taxas de aceleração distribuídas entre os níveis de carregamento.....	62
Figura 26: dados reais de aceleração, velocidade e distância.....	63
Figura 27: dados reais e modelados de aceleração, velocidade e distância.....	63
Figura 28: taxas de desaceleração distribuídas entre os níveis de carregamento.....	64
Figura 29: dados reais e modelados de desaceleração, velocidade e distância percorrida.....	64
Figura 30: fluxograma do método de calibração.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: modelos utilizados nos <i>softwares</i> de simulação e graus de facilidade de calibração.....	30
Tabela 2: valores e fontes dos parâmetros inseridos nos modelos GHR e Gipps.....	32
Tabela 3: medidas reais dos pontos de referência e suas correspondentes no filme.....	46
Tabela 4: fragmento da série de dados do movimento observado de um ônibus.....	53
Tabela 5: fragmento da série de dados do movimento modelado de um ônibus.....	53
Tabela 6: distâncias medidas em campo.....	58
Tabela 7: número de veículos analisados.....	59
Tabela 8: fragmento da série de dados do movimento observado de um ônibus.....	60
Tabela 9: fragmento da série de dados do movimento modelado de um ônibus.....	60
Tabela 10: médias e desvios padrão das taxas de aceleração e tempos para alcançar a velocidade cruzeiro.....	62
Tabela 11: médias e desvios padrão das taxas de desaceleração.....	64
Tabela 12: dados de aceleração e desaceleração.....	68

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 TEMA.....	13
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.2.1 Objetivo principal.....	14
1.2.2 Objetivos secundários.....	15
1.3 JUSTIFICATIVA.....	15
1.4 MÉTODO.....	16
1.5 DELIMITAÇÕES.....	16
1.6 DELINEAMENTO.....	17
1.7 ESTRUTURA.....	17
2 O COMPORTAMENTO VEÍCULO SEGUIDOR E A IMPORTÂNCIA DA CALIBRAÇÃO.....	19
2.1 OS MODELOS DE VEÍCULO SEGUIDOR.....	20
2.1.1 Modelo de Gazis-Herman-Rothery (GHR).....	21
2.1.2 Modelo CA (collision avoidance) ou da distância segura.....	22
2.1.3 Modelo de Helly ou modelo linear.....	24
2.1.4 Modelo psicofísico ou AP (action point).....	24
2.1.5 Modelo da lógica difusa.....	26
2.1.6 Outros modelos.....	27
2.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS DE VEÍCULO SEGUIDOR.....	29
3 AVALIAÇÃO DE MODELOS VEÍCULO SEGUIDOR PARA SIMULAÇÃO DE OPERAÇÃO DE ÔNIBUS.....	32
3.1 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
3.1.1 Resultados do modelo de Gazis-Herman-Rothery (GHR).....	34
3.1.2 Resultados do modelo de Gipps.....	36
3.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41
4 LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE DADOS DE CAMPO.....	42
4.1 TÉCNICAS DE COLETA DE ACELERAÇÃO E DESACELERAÇÃO.....	42
4.2 RECONHECIMENTO DE IMAGEM.....	43
4.3 PARALAXE.....	45
4.4 PESQUISA VISUAL DE OCUPAÇÃO DE ÔNIBUS.....	47
5 CALIBRAÇÃO DO MODELO VEÍCULO SEGUIDOR.....	49
5.1 MODELOS CALIBRADOS.....	49

5.2 VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE.....	50
5.3 COLETA DE DADOS.....	54
5.4 ANÁLISE DOS DADOS.....	58
5.4.1 Caracterização da amostra.....	58
5.4.2 Processamento dos dados.....	59
5.4.3 Resultados.....	61
5.5 RESUMO DAS ETAPAS DO MÉTODO.....	65
5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
6. CONCLUSÃO.....	69
REFERÊNCIAS.....	71
APÊNDICE A – Procedimento de coleta de dados.....	74
APÊNDICE B – Dados de aceleração e desaceleração máximas.....	80

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Os modelos de simulação microscópica de tráfego possuem um grande potencial para auxiliar na avaliação da operação do tráfego e no desenvolvimento de projetos de sistemas de transporte, pois podem ser considerados uma representação do sistema real. Uma grande vantagem da simulação é a possibilidade de introduzir e avaliar diferentes cenários em um ambiente controlado sem prejudicar as condições reais de tráfego. Diversos modelos de simulação são citados na bibliografia baseados em comportamentos como aceitação de brechas, adaptação de velocidade, troca de faixa, ultrapassagens e veículo seguidor, cada um com algoritmos e estratégias de controle diferentes.

O modelo veículo seguidor – ou *car-following* – é particularmente importante para a replicação da realidade em microssimuladores e, apesar de ser amplamente estudado, ainda não é rigorosamente compreendido. Segundo a revisão histórica de Brackstone e McDonald (2000), os primeiros estudos dos modelos veículo seguidor datam das décadas de 1950 e 1960. Nos anos 80 os modelos foram aprimorados e empregados na programação de ferramentas de simulação de tráfego. Muitos modelos foram propostos ao longo das últimas décadas, mas são relativamente poucos que se difundiram tanto como o modelo da distância segura de Gipps (1980) e o modelo psicofísico de Leutzbach e Wiedemann (1986).

Para que os modelos sejam capazes de reproduzir realisticamente o comportamento dos veículos na corrente de tráfego, seus parâmetros internos devem ser calibrados, minimizando as diferenças entre os resultados da simulação e as observações reais, assegurando a confiabilidade do modelo. No entanto, há uma resistência em calibrar o modelo veículo seguidor principalmente porque eles possuem parâmetros que, dependendo do número e da natureza, podem tornar o procedimento de calibração complexo. Ainda assim, muitos estudos descrevem procedimentos de calibração dos modelos de veículo seguidor, fundamentalmente para as condições de tráfego de automóveis.

Por outro lado, são escassas as referências na literatura sobre simulação de sistemas ônibus. Apesar da importância da otimização desse modal, ainda é baixa a utilização de simulação neste caso, possivelmente pela falta de modelos específicos. Quando os modelos elaborados para a simulação de automóveis são utilizados na simulação de ônibus, conceitos essenciais devem ser considerados na calibração, os quais diferenciam significativamente estes dois tipos de tráfego.

Tendo em vista o aumento no número de sistemas ônibus, mais especificamente de BRT (*Bus Rapid Transit*), e do interesse em melhorar a capacidade destes sistemas, este trabalho descreve um método de calibração de um modelo veículo seguidor para simular a operação de ônibus em corredores exclusivos. O modelo calibrado é o de Gipps (1980), intuitivo através da combinação de suas poucas variáveis, mas não menos eficiente na replicação da realidade. Além disso, perante algumas análises que precederam a calibração, este modelo se mostrou adaptável às manobras típicas dos serviços de ônibus.

Há muitos relatos sobre modelos veículo seguidor e sobre métodos de calibração. No entanto, a maioria dos modelos possuem muitos parâmetros que são bastante abstratos, ou seja, de difícil calibração. Sobre os métodos de calibração, são inúmeras as tentativas com os mais diversos recursos de coleta e análise de dados, porém muitas delas com equipamentos caros ou procedimentos complexos para operação. O método descrito neste trabalho é essencialmente de fácil replicação, envolvendo coletas de dados com equipamentos acessíveis e análises básicas, buscando tornar menos trabalhosa, e conseqüentemente mais frequente, a calibração do modelo veículo seguidor antes da simulação.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a elaboração de um método de calibração dos parâmetros dos modelos de aceleração linear e veículo seguidor de Gipps aplicado a obstáculos estáticos, para simulação de tráfego de ônibus. Um modelo calibrado para a simulação destes sistemas permite testar alternativas de projeto antes da implantação, aumentando as chances de

eficiência. Além disso, a simulação é importante e tem sido utilizada para descobrir o desempenho limite de configurações de BRT.

1.2.2 Objetivos secundários

Como objetivos secundários, esta dissertação busca:

- a) a identificação, entre os principais modelos veículo seguidor encontrados na literatura, daquele que mais se adequaria à simulação dos ônibus;
- b) a comprovação analítica da adaptação do modelo de Gipps às manobras típicas do transporte por ônibus.

1.3 JUSTIFICATIVA

Modelos veículo seguidor foram desenvolvidos e utilizados para representar o comportamento de correntes de carros em faixa simples. Estes modelos têm sido também frequentemente explorados para representar o comportamento de diferentes veículos, como trens e ônibus, sob diferentes condições operacionais.

O problema desta abordagem é que os modelos veículo seguidor foram desenvolvidos para representar automóveis, não ônibus. Mesmo que a maioria desses modelos ofereça um conjunto de parâmetros ajustáveis para melhor representar diferentes tipos de veículos (como comprimento, velocidade cruzeiro, aceleração e desaceleração), eles tendem a não diferenciar, por exemplo, um semáforo vermelho de uma estação de ônibus. Ambos são obstáculos onde o ônibus deve parar, mas não raro os motoristas de ônibus desaceleram mais suavemente quando se aproximam de um sinal vermelho, o qual logo pode se tornar verde, do que quando se aproximam de uma estação, a qual requer uma parada obrigatória e eficiente.

Outra desvantagem da utilização de modelos veículo seguidor existentes para a representação de ônibus é a não consideração da ocupação do veículo (relativo à massa), nem da inclinação da pista. O desempenho do ônibus é particularmente sensível a estes fatores, o que sugere uma abordagem dinâmica, baseada na segunda lei de Newton, para a aceleração do ônibus. São necessários estudos que considerem estas particularidades a fim de encaminhar à definição de um modelo específico e eficiente para simulações de sistemas ônibus.

Além disso, o estudo das taxas de aceleração e desaceleração de ônibus faz parte do aprendizado para alcançar sistemas de transporte coletivo mais eficientes e com maior capacidade. O *headway* entre veículos, um dos fatores que afetam a capacidade de um sistema, pode ser diminuído se os movimentos dos ônibus forem entendidos para serem monitorados, como é possível em sistemas sobre trilhos.

1.4 MÉTODO

O método de pesquisa pode ser caracterizado quanto:

- a) natureza;
- b) abordagem;
- c) objetivos;
- d) procedimentos.

Esta dissertação possui natureza aplicada, por ser dirigida à solução de um problema específico, como a carência de modelos microscópicos que represente realisticamente a operação de ônibus. A abordagem pode ser considerada qualitativa e quantitativa, devido ao caráter das análises. Por envolver observações em campo e ensaios com os dados provenientes, o objetivo possui caráter explicativo.

Quanto aos procedimentos, o trabalho envolve pesquisa bibliográfica e experimental. A primeira foi essencial para conhecimento e entendimento da área abordada, num âmbito mais amplo. A segunda constitui na elaboração do método de calibração, na coleta de dados e aplicação do método.

1.5 DELIMITAÇÕES

O presente trabalho apresenta um procedimento de calibração do modelo veículo seguidor de Gipps para a representação de sistemas ônibus, incluindo somente a análise de ocupação dos veículos. No entanto, o modelo proposto pode ser adaptado para a análise da aceleração e desaceleração em diferentes inclinações da via e, também, da diferença de comportamento do motorista do ônibus entre a desaceleração perante um semáforo ou uma estação.

Quanto à acurácia dos dados, podem-se citar três fatores que podem ser limitadores:

- a) a observação da ocupação dos veículos é realizada através do método visual, sendo suscetível ao erro humano;
- b) o software utilizado para a extração dos dados das filmagens, método utilizado para coleta de dados, pode conter limitações por se tratar de uma ferramenta de visão artificial através do reconhecimento da coloração dos pixels;
- c) as aproximações dos dados coletados em campo com os modelos calibrados apresentam um grau de erro, podendo gerar pequenas dispersões dos valores obtidos como resultados dos parâmetros.

1.6 DELINEAMENTO

O desenvolvimento desta pesquisa foi realizado em duas etapas. Na primeira foi realizada uma revisão dos modelos veículo seguidor mais relatados na literatura, tanto para o entendimento das diversas abordagens na criação de cada um, quanto para a posterior escolha dos modelos a serem testados com parâmetros típicos da operação de ônibus. Esta seleção levou em consideração o acesso do modelo à calibração. Ainda nesta etapa, os modelos escolhidos foram testados analiticamente, fazendo-se uso de planilhas e gráficos para simular as manobras dos ônibus.

Identificado o modelo que melhor responde às manobras típicas do transporte por ônibus, iniciou-se a segunda etapa, que consistiu no desenvolvimento do método de calibração. O método agrega coleta de dados em campo através de filmagens, utilização de ferramentas computacionais e de equações matemáticas que corrigem a paralaxe das filmagens. Nesta etapa foi realizado também um teste piloto do método desenvolvido. Por fim, realizou-se a coleta de dados em campo e posterior análise dos dados, seguindo o método de calibração elaborado.

1.7 ESTRUTURA

Este trabalho está organizado em seis capítulos. O primeiro capítulo apresenta o tema do trabalho, expondo os objetivos, a justificativa, o método, as delimitações e as etapas do trabalho.

No segundo capítulo são apresentados o conceito de veículo seguidor e a importância da calibração dos modelos. Em seguida os modelos presentes na literatura são brevemente descritos e relacionados com alguns *softwares* de simulação existentes no mercado mundial em um quadro resumo. No terceiro capítulo dois modelos veículo seguidor foram testados a fim de explorar o potencial dos modelos existentes para a representação do comportamento de ônibus.

O quarto capítulo apresenta uma breve descrição de conceitos importantes para a elaboração do método, com destaque para os métodos de coleta dos dados, *softwares* existentes para a extração dos dados de filmagens e métodos matemáticos para a correção da paralaxe de filmagens. O quinto capítulo descreve o desenvolvimento do método de calibração, iniciando com a descrição dos modelos calibrados e com a descrição do projeto piloto para teste do método desenvolvido. Este capítulo descreve também a coleta e o procedimento de análise de dados, além dos resultados da calibração.

O sexto e último capítulo apresenta as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

2 O MODELO VEÍCULO SEGUIDOR E A IMPORTÂNCIA DA CALIBRAÇÃO

O núcleo do *software* de simulação de tráfego é o modelo veículo seguidor (Rakha e Gao, 2011). Este modelo descreve como um par de veículos interage entre si, ou seja, como o veículo seguidor (veículo n) se comporta em relação às ações de um veículo líder (veículo $n - 1$). Isto por vezes é apresentado através da formulação da distância percorrida ao longo do tempo, outras pela formulação da variação da velocidade e outras ainda pela formulação da variação da aceleração. A evolução dos modelos veículo seguidor tem sido lenta e existe ainda o receio de que eles não sejam suficientemente válidos para os propósitos a que são requeridos.

Segundo Panwai e Dia (2005), a chave para avaliar o desempenho do modelo é entender o comportamento do motorista. Para que a modelagem seja possível é necessário assumir que cada motorista é um elemento de controle ativo e previsível no sistema motorista-veículo-via (Rothery, 1992). Outro fator generalizado na maioria dos modelos é o tempo de reação dos motoristas, comumente considerado como um valor fixo ou variável randômica, quando o ideal seria buscar um tempo de reação individual para cada motorista extraído de uma distribuição adequada (Chang e Chon, 2005). Essas suposições geram algumas diferenças entre o comportamento real e os resultados descritos pelos modelos, porém simplificam significativamente os modelos de veículo seguidor. Ainda que os modelos não atendam a todos os fatores relacionados ao sistema motorista-veículo-via, a aproximação utilizada assume que existe uma relação entre os componentes que compõem o tráfego, e esta relação descreve o movimento da unidade motorista-veículo.

Um fator que realmente faz diferença no resultado nas simulações de tráfego, e que muitas vezes não é valorizado ou negligenciado por estar relacionado a um custo alto, é a calibração dos parâmetros do modelo padrão. A calibração é o processo pelo qual os parâmetros do modelo de simulação são definidos e ajustados para que o modelo replique as medidas de campo e condições de tráfego observadas. O comportamento do motorista, por exemplo, é uma das principais razões para a calibração dos modelos, por fazer parte da cultura local. Yu et al. (2006) comprovaram a importância da calibração comparando os dados coletados em

campo com os valores resultantes de dois casos de simulação: o primeiro com modelos calibrados e o segundo com modelos não calibrados. O estudo mostra que os dados coletados de fluxo se parecem bastante com os resultantes do modelo calibrado, com um erro máximo relativo de 2,5%, enquanto o erro do modelo não calibrado alcançou 27,4%.

O número e a complexidade dos parâmetros a serem calibrados influenciam na robustez e estabilidade do modelo veículo seguidor. A dificuldade de calibrar o modelo cresce consideravelmente com o número de parâmetros a serem calibrados e a tentativa de aumentar o realismo do modelo escolhido através da introdução de fatores que poderiam explicar as diferenças entre motoristas, nem sempre é válida. Há poucas evidências que comprovem a efetividade da relação dessas características com o comportamento dinâmico observado. (Brackstone e McDonald, 2000). Por isso, na formulação dos modelos, é desejável manter o número de parâmetros o mais baixo possível (Olstam e Tapani, 2004).

Existem diferentes abordagens para definir o comportamento do veículo seguidor. Alguns pesquisadores adotaram a ideia de que o motorista do veículo seguidor realiza manobras de acordo com estímulos recebidos do veículo que trafega à sua frente. Outros assumem que o veículo seguidor acelera e desacelera para manter uma distância segura do veículo à frente. Outros ainda usam mais de uma teoria para descrever o comportamento do seguidor, usualmente um regime “dirigindo livremente”, um regime “seguindo” e um regime “desacelerando”.

Para formar um entendimento dos modelos veículo seguidor e a evolução das ideias que geraram diferentes tipos de modelos, realizou-se uma pesquisa resumindo conceitos importantes como a situação para que foi criado, os parâmetros introduzidos, os esforços de calibração, vantagens e desvantagens relatadas na literatura.

2.1 OS MODELOS DE VEÍCULO SEGUIDOR

Desde a década de 50, quando os modelos veículo seguidor começaram a ser estudados e conectados aos tradicionais modelos macroscópicos de corrente de tráfego, muitos experimentos avaliaram os diversos modelos veículo seguidor, com os mais diferentes objetivos. Estes estudos resultaram no aperfeiçoamento de alguns modelos e no declínio de outros. Alguns modelos mostraram ser mais fiéis ao comportamento real do tráfego e também

foram relatadas inúmeras estratégias de calibração. Algumas das principais opções do modelo veículo seguidor e suas particularidades descritas na literatura são apresentadas a seguir.

2.1.1 Modelo de Gazis-Herman-Rothery (GHR)

O modelo GHR data do final dos anos 50 iniciado por Chandler et al. (1958) na Alemanha sendo evoluído nos anos subsequentes. Neste modelo, a relação básica entre o líder ($n - 1$) e o seguidor (n) é uma função do tipo estímulo-resposta apresentado na equação 1 (Brackstone e McDonald, 2000; Chang e Chon, 2005; Olstam e Tapani, 2004).

$$a_n(t) = cv_n^m(t) \frac{\Delta v(t - T)}{\Delta x^l(t - T)} \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

$a_n(t)$ = aceleração do veículo n no momento t

v_n = velocidade em que o $n - \text{ésimo}$ veículo deseja trafegar

Δx = distância relativa entre o veículo n e o $n - 1$

Δv = velocidade relativa entre o veículo n e o $n - 1$

T = tempo de reação do motorista

l, m e c = constantes

O modelo GHR pode ser simétrico ou assimétrico. O modelo simétrico utiliza os mesmos valores de parâmetro nas situações de aceleração e desaceleração, enquanto o modelo assimétrico utiliza diferentes valores de parâmetro nas duas situações. O *software* MITSIM, por exemplo, que incorpora três regimes para descrever os diferentes comportamentos de motoristas, baseia-se no modelo GHR assimétrico para representar o comportamento do regime “seguido”. Os fatores que descrevem o motorista e o veículo usados como parâmetros no MITSIM são complicados de interpretar, dificultando a calibração, apesar da pequena quantidade de parâmetros (Olstam e Tapani, 2004).

A aplicação desse modelo requer que as constantes l e m sejam calibradas particularmente para cada rede simulada. Brackstone e McDonald (2000) descrevem grandes trabalhos na

tentativa de calibração e validação do modelo GHR ao longo de quase trinta anos, resultando em um grande número de valores contraditórios para as constantes. Pela falta de evidências conclusivas para o comportamento da equação, o modelo tem sido menos frequentemente investigado e utilizado desde o fim dos anos 70.

2.1.2 Modelo CA (collision avoidance) ou da distância segura

A relação fundamental no modelo CA não descreve um tipo de função estímulo-resposta como proposto pelo modelo GHR, mas especifica uma distância seguidora segura (através da manipulação das equações básicas de movimento de Newton), na qual uma colisão pode ser evitada quando o motorista do veículo em frente age imprevisivelmente (Olstam e Tapani, 2004; Panwai e Dia, 2005). O modelo é baseado na equação 2.

$$\Delta x(t - T) = \alpha v_{n-1}^2(t - T) + \beta_1 v_n^2(t) + \beta v_n(t) + b_0 \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

Δx = distância segura entre os veículos

v_n = velocidade em que o n - *ésimo* veículo deseja trafegar

v_{n-1} = velocidade do $(n - 1)$ *ésimo* veículo

Δx = distância relativa entre o veículo n e o $(n - 1)$

T = tempo de reação do motorista

α, β, β_1 e b_0 = constantes

O modelo de Gipps (1980), que é largamente utilizado nas simulações microscópicas de tráfego, é baseado no modelo CA. Um dos motivos da popularidade do modelo é o comportamento realístico na propagação de distúrbios tanto em situações envolvendo um par de veículos quanto em pelotões devido à adição do parâmetro de estimativa da taxa de frenagem do veículo líder pelo seu seguidor. Além disso, o modelo é bastante simples e apresenta apenas três parâmetros de calibração: a aceleração máxima, a desaceleração máxima e a velocidade que o veículo líder deseja alcançar. O modelo assume que a velocidade veículo seguidor é dada pelo menor entre os resultados das equações 3 e 4.

$$v_n(t + T) = v_n(t) + 2,5a_n \times T \times \left(1 - \frac{v_n(t)}{V_n}\right) \sqrt{0,025 + \frac{v_n(t)}{V_n}} \quad (\text{equação 3})$$

$$v_n(t + T) = b_n \times T + \sqrt{b_n^2 \times T^2 - b_n \times \left\{2 \times [x_{n-1}(t) - S_{n-1} - x_n(t)] - v_n(t) \times T - \frac{v_{n-1}(t)^2}{\hat{b}}\right\}} \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

a_n = aceleração máxima que o motorista que o $n - \text{ésimo}$ veículo deseja atingir

b_n = máxima taxa de frenagem que o $n - \text{ésimo}$ veículo deseja utilizar

S_{n-1} = comprimento efetivo do $(n - 1)\text{ésimo}$ veículo

$x_{n-1}(t)$ = posição da frente do $(n - 1)\text{ésimo}$ veículo no instante t

$x_n(t)$ = posição da frente do $n - \text{ésimo}$ veículo no instante t

V_n = velocidade em que o $n - \text{ésimo}$ veículo deseja trafegar

$v_n(t)$ = velocidade do $n - \text{ésimo}$ veículo no instante t

$v_{n-1}(t)$ = velocidade do $(n - 1)\text{ésimo}$ veículo no instante t

T = tempo de reação do motorista

\hat{b} = taxa de frenagem máxima do $(n - 1)\text{ésimo}$ veículo estimada pelo veículo seguidor

A equação 3 é utilizada para condições de tráfego em fluxo livre quando a velocidade do veículo seguidor será ajustada para alcançar a velocidade desejada. Em outras condições de tráfego, utiliza-se a equação 4 e a velocidade do veículo seguidor é ajustada para que seja mantida uma distância segura em relação ao veículo líder (Silva, 1994).

O *software* AIMSUM, que é baseado neste modelo, possui um pequeno número de parâmetros e as definições deles são bastante intuitivas. Isto permite menor trabalho de calibração necessário para alcançar os melhores resultados na aplicação do modelo.

2.1.3 Modelo de Helly ou modelo linear

O modelo (equação 5) tem sua origem no modelo GHR e foi melhorado por Helly que introduziu termos adicionais como o fator de distância desejada entre veículo seguidor e veículo líder (D_n) (equação 6).

$$a_n(t) = C_1 \Delta v(t - T) + C_2 \{\Delta x(t - T) - D_n(t)\} \quad (\text{equação 5})$$

$$D_n(t) = \alpha + \beta v(t - T) + \gamma a_n(t - T) \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

$a_n(t)$ = aceleração do veículo n para atingir a distância desejada

$D_n(t)$ = distância desejada para o veículo seguidor no momento t

v = velocidade do $n - \text{ésimo}$ veículo

Δx = distância relativa entre os veículos n e $(n - 1)$

Δv = velocidade relativa entre os veículos n e $(n - 1)$

T = tempo de reação do motorista

$\alpha, \beta, \gamma, C_1$ e C_2 = constantes

Brackstone e McDonald (2000) citam alguns estudos de calibração deste modelo. Na década de 60, o modelo foi testado em cenários diferentes (vias livres e vias urbanas congestionadas), sendo constatado que, apesar de o modelo apresentar bom ajuste aos dados observados, há dificuldade na calibração das constantes. Mais tarde, outras tentativas de calibração mostraram também que o modelo apresentava erros importantes quando a magnitude da dispersão dos dados aumentava, fazendo com que os *headways* simulados fossem maiores do que os observados. Contudo, ao contrário do modelo GHR, nos casos de calibração do modelo de Helly há um alto grau de concordância nos valores das constantes.

2.1.4 Modelo psicofísico ou AP (action point)

O modelo psicofísico é baseado na suposição de que o motorista executa uma ação quando um limite, expresso em função da diferença de velocidades e de distância entre os veículos, é alcançado. São praticados três tipos de limites. O primeiro limite é relativo à capacidade dos motoristas de saber que estão se aproximando de um veículo à frente devido a mudanças no tamanho aparente deste veículo, percebendo a velocidade relativa através de mudanças no

ângulo visual. Uma vez que este limite é excedido, o motorista desacelera até que a velocidade relativa seja nula. O segundo limite é baseado na percepção do motorista para aproximações e afastamentos, particularmente importante para velocidades relativas baixas. O terceiro limite depende da percepção no aumento e diminuição do *headway* entre os veículos (Brackstone e McDonald, 2000).

Segundo Olstam e Tapani (2004) os exemplos representativos do modelo psicofísico são os desenvolvidos por Leutzbach e Wiedemann (1986) e Fritzsche (1994) sendo que a diferença entre eles é o modo como os limites são definidos e calculados. Nestes modelos, o seguidor troca de regime mesmo quando o líder dirige numa velocidade constante, isto é, o seguidor troca seu comportamento sem qualquer ação do líder, oscilações que são encontradas em observações reais.

O modelo do *software* PARAMICS é baseado principalmente no modelo psicofísico e seu conceito básico divide o plano veículo seguidor em cinco fases (ou regiões) representando diferentes modos do veículo seguidor como mostra a figura 1 (Panwai e Dia, 2005). O projeto SmartBRT da Universidade de Berkeley utilizou o PARAMICS para simular a operação de um sistema BRT. No relatório final (SmartBRT Team, 2004) os pesquisadores concluem que o PARAMICS apresenta limitações, dentre as quais:

- a) impossibilidade de contar com uma representação visual on-line do estado das entidades simuladas (ônibus, paradas, etc.);
- b) trajetórias que não possibilitam uma representação física realística, pois o PARAMICS foi originalmente desenvolvido para simulações de tráfego de larga escala e, portanto, privilegia eficiência e não realismo;
- c) veículos que colidem, especialmente nas interseções e por vezes movimentam-se para os lados;
- d) ônibus que não param completamente nas paradas, continuando a se mover vagarosamente para frente e, assim, precisam ser periodicamente movidos para trás.

Outro *software* bastante utilizado no mercado que utiliza o modelo psicofísico é o VISSIM. Apesar de ser bem qualificado em termos de representação realista, o estudo de Olstam e Tapani (2004) classifica o VISSIM como o *software* que possui maior número de parâmetros e de maior dificuldade de interpretação. Isso indica a necessidade de maior trabalho de calibração. Semelhantemente, o *software* PARAMICS possui um número de parâmetros similar e, por isso, as mesmas dificuldades de calibração.

O trabalho de Oliveira e Cybis (2008) cita formas existentes na literatura de calibração dos algoritmos do VISSIM como métodos de inteligência computacional (algoritmos genéricos) e processos de tentativa e erro, ambos com o auxílio do *software*. Já o estudo realizado por Yu et al. (2006) sobre a calibração do VISSIM para simulação de BRT em Beijing relata que estudos anteriores que adotaram métodos manuais de calibração não se mostraram eficientes nem práticos. Os autores procuraram realizar a calibração com *softwares* auxiliares, pois a função a ser calibrada é de difícil expressão e também não pode ser resolvida através de uma abordagem analítica.

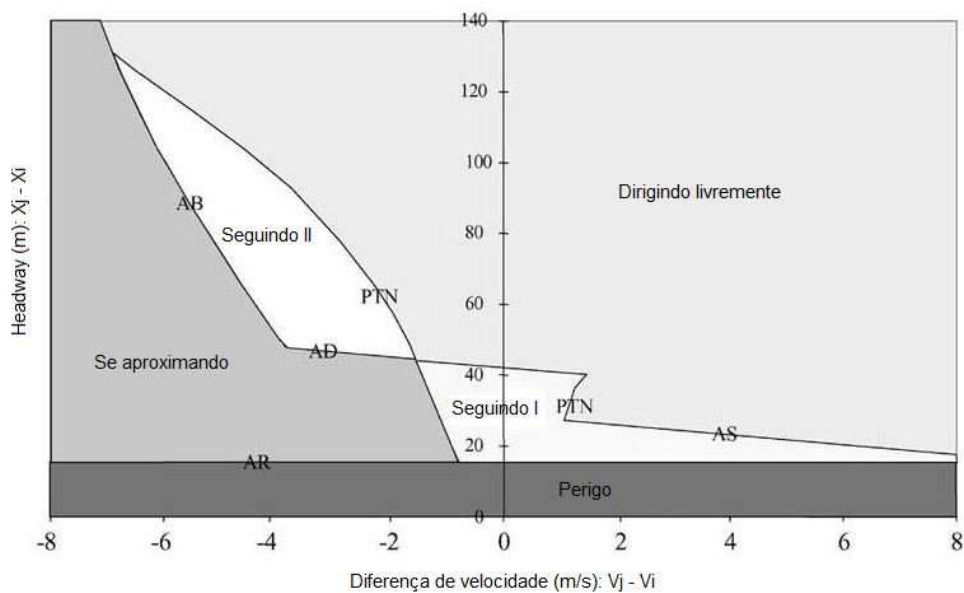


Figura 1: diagrama das fases do modelo PARAMICS

2.1.5 Modelo da lógica difusa

O uso da lógica difusa é considerado como o último estágio no desenvolvimento dos modelos veículo seguidor por representar o próximo passo lógico na tentativa de descrever o comportamento do motorista (Brackstone e McDonald, 2000). A lógica difusa, uma extensão da lógica booleana, admite valores lógicos intermediários entre o “falso” (0) e o “verdadeiro” (1). Por exemplo, o valor médio “talvez” (0,5), e qualquer valor intermediário entre 0 e 1, é um valor lógico difuso. Desse modo, com a lógica difusa é possível avaliar conceitos não quantificáveis como o comportamento de um motorista frente a suas decisões. Modelos veículo seguidor que utilizam a lógica difusa usam séries para quantificar, por exemplo, o que significa “muito perto”. Uma vez definidas, essas séries podem ser usadas em regras lógicas

como SE “perto” E “aproximando” ENTÃO “frear” (Brackstone e McDonald, 2000; Olstam e Tapani, 2004).

Alguns trabalhos nessa área foram realizados na década de 90, mas nenhum deles focou na calibração da parte mais importante para a operação do modelo que é a determinação das funções pertinentes, que na lógica difusa representa o grau de verdade (Brackstone e McDonald, 2000; Panwai e Dia, 2005). Apenas no final do século passado, o estudo de McDonald et al. (1997) revelou que o modelo calibrado produz resultados bastante alinhados com observações do tráfego real. Para a calibração do modelo da lógica difusa são necessários dois tipos de dados: a medição das funções pertinentes das configurações difusas para um grupo de motoristas, necessária para estimar quando o início e o fim de configurações como “aproximando” são percebidas; e as características dinâmicas do comportamento do veículo seguidor em determinadas circunstâncias.

2.1.6 Outros modelos

Existem outros modelos veículo seguidor relatados na literatura, ainda que menos documentados. Esses modelos, geralmente, são variações de um ou mais modelos precedentes aos quais foram aplicadas considerações adicionais para melhor retratar um caso específico de estudo.

O NETSIM é um modelo de simulação de redes de vias urbanas. O algoritmo de veículo seguidor do NETSIM foi derivado do UTSC-1, um modelo de simulação de rede desenvolvido pela *Federal Highway Administration* (FHWA) no início da década de 70, considerado o mais avançado e detalhado modelo de simulação de tráfego em área urbana da época (Sola, 1979). A única diferença entre a lógica de veículo seguidor do NETSIM e o modelo UTSC-1 é que o algoritmo do primeiro considera o tempo de reação do motorista. A principal proposta desta lógica de veículo seguidor é prevenir colisões em qualquer situação (Zhang, 2004).

O INTRAS e o FRESIM utilizam o modelo veículo seguidor de Pitt, que foi desenvolvido pela Universidade de Pittsburgh, e assumem que o veículo seguidor tenta manter um *headway* específico do veículo da frente (Zhang, 2004). O modelo básico do FRESIM incorpora além do espaçamento entre veículos, o diferencial de velocidade entre os veículos seguidor e líder

(Rakha e Gao, 2011). O INTRAS é um modelo de simulação de *freeway* que foi introduzido em 1980 e desde então tem sido usado em muitos estudos de simulações de corredores de tráfego nesse tipo de via.

O INTELSIM foi formulado combinando informações do modelo veículo seguidor da literatura, mas o algoritmo resultante é fundamentalmente diferente de outros modelos. A abordagem do INTELSIM considera o objetivo do veículo seguidor de alcançar, em longo prazo, a condição de estado estável. Esta condição ocorre quando o veículo seguidor e veículo líder possuem a mesma velocidade ou uma diferença mínima, ou a distância entre os dois veículos é significativamente longa para que as manobras do veículo líder não tenham influência no comportamento do veículo seguidor. Ainda, o modelo considera que a aceleração do veículo seguidor varia linearmente (Zhang, 2004).

O modelo de Pipes é considerado a base de lógicas de veículo seguidor em estado estável do CORSIM e do VISSIM no estudo de Rakha e Crowther (2002). O movimento dos veículos mantém relação linear entre velocidade e distância. O modelo veículo seguidor é limitado pela velocidade máxima desejada, tipicamente pouco maior que a velocidade permitida na via e depende da fiscalização da estrada. Por possuir esta estrutura linear, o modelo de Pipes falha na réplica do comportamento veículo seguidor observado de campo.

O mais famoso modelo de corrente de tráfego é o de Greenshields, que foi desenvolvido em 1934 baseado em medições de velocidades relacionadas à densidade, no qual concluiu que a velocidade é uma função linear da densidade. O modelo veículo seguidor que evoluiu do modelo de corrente de tráfego de Greenshields demonstra um comportamento de veículo seguidor agressivo para *headways* pequenos e menos agressivo para *headways* maiores. O estudo de Rakha e Crowther (2002) demonstra que há inconsistência na relação linear entre velocidade e densidade quando comparada a dados coletados em campo.

O modelo de Van Aerde é aplicado no *software* INTEGRATION e combina os modelos veículo seguidor de Pipes e Greenshield, superando as deficiências de cada um. Este modelo requer a calibração de quatro parâmetros, fornecendo mais graus de liberdade para refletir o comportamento do tráfego em diferentes tipos de vias. Van Aerde considera que a velocidade do veículo seguidor é função do espaçamento entre os veículos (Colella et al., 2004; Rakha e Crowther, 2002).

2.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS DE VEÍCULO SEGUIDOR

Dada a complexidade da formulação dos modelos de veículo seguidor, alguns se destacam por possuir parâmetros mais intuitivos e pela validade dos resultados quando comparados a dados reais. Por essa razão, alguns modelos são mais utilizados na programação de *softwares*. A figura 2 apresenta um esquema relacionando alguns *softwares* de simulação de tráfego com os modelos em que foram baseados.

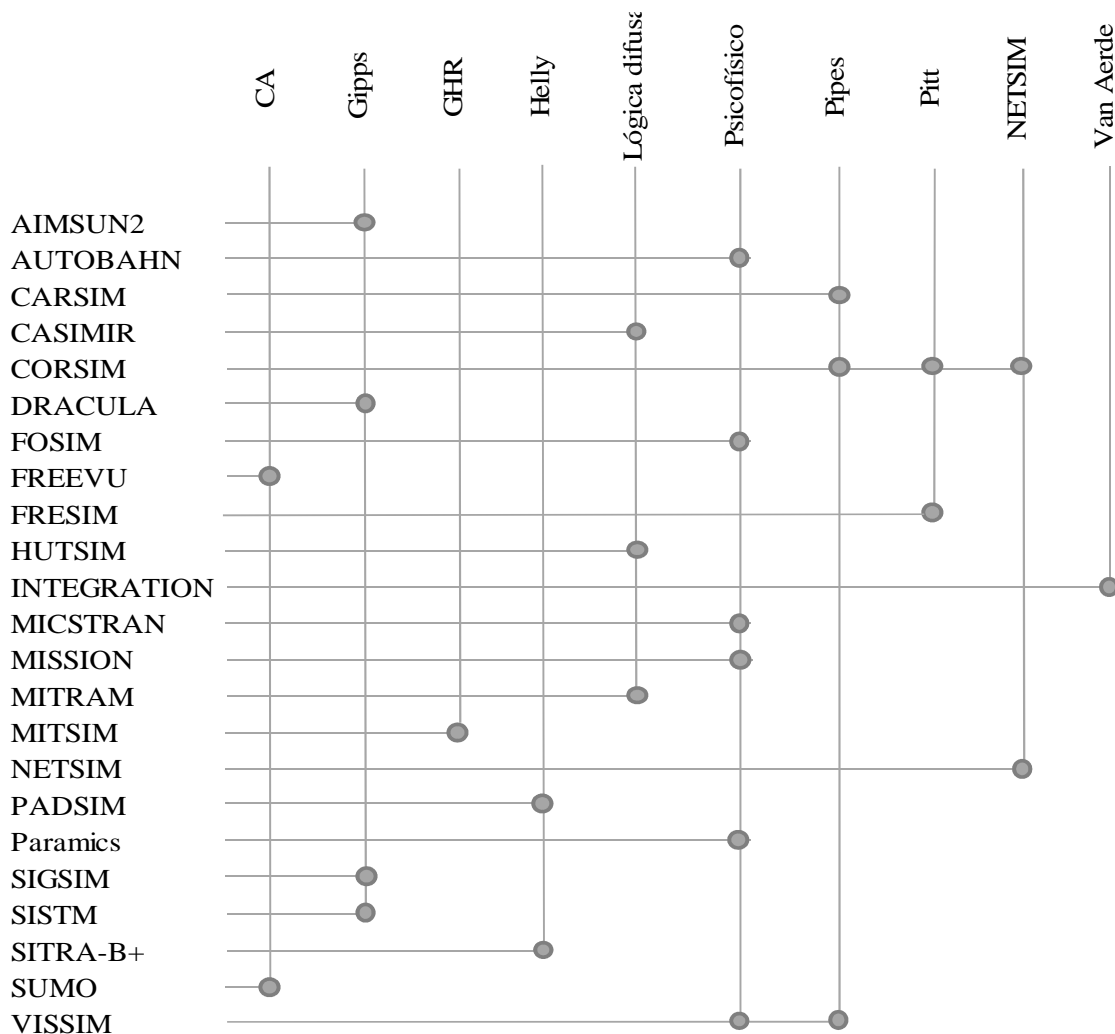


Figura 2: relação entre os *softwares* de simulação de tráfego e seus modelos-base (elaborado pela autora com base em Smartest, 2000; Olstam e Tapani, 2004; Maciejewski, 2010; Brackstone e McDonald, 2000; Rakha e Gao, 2011; Dijker et al., 1997; Liu, 1994; CASIMIR, 2011; TRB, 2004; Rakha e Crowther, 2002)

Através da figura 2 é possível identificar que os modelos mais utilizados na elaboração dos *softwares* de simulação listados são o modelo de Gipps e o psicofísico. Complementarmente, a tabela 1 resume o grau de facilidade da calibração dos modelos e relaciona com o percentual

de utilização nos *softwares* relacionados na figura 2. Com estas duas ferramentas de análise, é possível identificar que, entre os modelos mais utilizados em *softwares*, a realização da calibração do modelo de Gipps é mais simples, conforme a literatura.

Tabela 1: modelos utilizados nos *softwares* de simulação e graus de facilidade de calibração (elaborado pela autora com base em Panwai e Dia, 2005; Brackstone e McDonald, 2000; Oliveira e Cybis, 2008; Yu et al., 2006; Rakha e Crowther, 2002; Rakha e Gao, 2011)

Modelo	Utilização	Número de parâmetros	Características individuais	Presença de constantes	Grau de facilidade de calibração
CA	8,70%	n.d.	n. d.	Sim	n.d.
Gipps	17,39%	Baixo	Parâmetros com definições bastante intuitivas	Apenas em uma das equações	Alto
GHR	4,35%	Baixo	Parâmetros com definições bastante intuitivas. Divergência nos resultados obtidos para as constantes	Sim	Médio
Helly	8,70%	Médio	Dificuldade na calibração dos parâmetros constantes e aumento de erros proporcional ao aumento da magnitude das flutuações dos dados	Sim	Baixo
Lógica difusa	13,04%	n.d.	Necessária medição do grau de verdade para grupos de motoristas e as características dinâmicas do veículo seguidor.	n.d.	Alto
Psicofísico	26,09%	Alto	Dificuldade na calibração dos limites individuais. Os estudos de calibração relatados requerem a utilização do software.	n.d.	Alto
Pipes	13,04%	Baixo	n.d.	Não	Alto
Pitt	8,70%	n.d.	n.d.	Sim	n.d.
NETSIM	8,70%	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Van Aerde	4,35%	n.d.	n.d.	Sim	Alto

n.d.= não disponível

O modelo de Gipps obedece à lógica da distância seguidora segura e faz parte de uma geração mais recente de modelos de veículo seguidor. Em contrapartida, o modelo GHR,

provavelmente um dos modelos pioneiros e também considerado o mais difundido (Brackstone e McDonald, 2000), também possui poucos parâmetros a serem calibrados na sua equação. Esta característica é importante na simulação de operação de ônibus na medida em que é desejável realizar visualizações gráficas com os resultados das equações. Além disso, o GHR pertence ao segmento estímulo-resposta, diferente do modelo de Gipps. Por estes motivos, estes dois modelos apresentam características favoráveis para a calibração e podem ser testados para aplicabilidade da replicação da operação de ônibus.

3 AVALIAÇÃO DE MODELOS VEÍCULO SEGUIDOR PARA SIMULAÇÃO DE OPERAÇÃO DE ÔNIBUS

Para visualizar o comportamento veículo seguidor em situações de tráfego de ônibus, dados característicos foram aplicados nas equações dos modelos de Gazis-Herman-Rothery (GHR) e Gipps. A análise da aplicabilidade dos modelos para o caso de ônibus urbano foi realizada através de gráficos resultantes da aplicação das equações dos modelos com a inserção de valores selecionados.

Os parâmetros foram extraídos de estudos prévios ou admitidos conforme a realidade dos sistemas ônibus. A velocidade desejada pelo motorista do veículo seguidor foi adotada conforme o Código de Trânsito Brasileiro (Brasil, 1997), que admite uma velocidade de 60 km/h em corredores de ônibus. As taxas de aceleração e desaceleração foram obtidas através da análise de filmagens de um corredor do tipo *busway* que apresenta grande fluxo de ônibus, a Avenida Assis Brasil na cidade de Porto Alegre. As constantes do modelo GHR foram extraídas de estudos publicados. A tabela 2 apresenta uma síntese dos valores utilizados bem como de suas fontes.

Tabela 2: valores e fontes dos parâmetros inseridos nos modelos GHR e Gipps

Parâmetros			Fonte
Taxas máximas de aceleração e desaceleração	$a = 0,9 \text{ m/s}^2$ $b = 1,3 \text{ m/s}^2$		Estimados com dados do corredor de ônibus da Avenida Assis Brasil em Porto Alegre
Velocidade desejada do veículo seguidor	$v_0 = 60 \text{ km/h}$		Brasil (1997)
Constantes do modelo GHR	Aceleração $c = 1,1$ $m = -0,2$ $l = 0,2$	Desaceleração $c = 1,1$ $m = 0,9$ $l = 1$	Brackstone e McDonald (2000)

A fim de realizar diferentes análises, três parâmetros receberam valores variados:

- comprimento dos veículos: 12 e 18,5 metros;
- tempo de reação do motorista: 1 e 1,5 segundos;
- distância entre os veículos: 38, 67 e 84 metros.

Os valores adotados para o comprimento dos veículos correspondem ao ônibus de comprimento padrão e ao ônibus articulado, respectivamente (Wright e Hook, 2008). Os tempos de reação dos motoristas foram adotados considerando os estudos relatados por Chang e Chon (2005). As distâncias entre veículos adotadas correspondem a tempos de *headway*:

- a) o primeiro valor (38 m) corresponde a 2,3 segundos de distância entre veículos a uma velocidade de 60 km/h e representa o limite mínimo para os modelos, ou seja, se a distância adotada for menor, os veículos seguidores aplicarão uma desaceleração para aumentar esta distância, fazendo com que o gráfico apresente uma oscilação em torno da aceleração nula;
- b) o segundo valor (67 m) corresponde a 4 segundos e é o *headway* médio previsto no projeto do BRT Transbrasil, na cidade do Rio de Janeiro. Este projeto prevê duas faixas por sentido para o corredor e não possui semáforo no trecho mais carregado.
- c) o terceiro valor (84 m) corresponde a um *headway* médio de 5 segundos que é realidade no corredor de ônibus do Lincoln Tunnel na cidade de Nova York, a faixa simples de ônibus mais carregada dos Estados Unidos (Quelch, 2005).

Os gráficos do comportamento dos veículos seguidores foram gerados a partir de um comportamento pré-definido do veículo líder. As taxas de aceleração e desaceleração utilizadas para graficar o desempenho correspondente ao veículo líder, nas figuras 3 a 13, foram de $0,45 \text{ m/s}^2$ e $0,7 \text{ m/s}^2$, respectivamente. A velocidade e posição do veículo líder ao longo do tempo foram calculadas a partir da aceleração e desaceleração. Do primeiro veículo seguidor em diante, foram utilizadas as equações dos modelos para definir as acelerações, velocidades e posições ao longo do tempo e, com esses dados, foram traçados os gráficos.

3.1 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos testados possuem diferentes abordagens em relação à representação dos movimentos dos veículos. Deste modo, apresentaram diferentes níveis de complexidade na elaboração dos gráficos assim como na posterior manipulação dos mesmos através da modificação dos parâmetros variáveis. A quantidade de constantes também é um fator importante para a compreensão do modelo.

3.1.1 Resultados do modelo de Gazis-Herman-Rothery (GHR)

O modelo GHR foi primeiramente testado para uma situação em que o veículo líder inicia sua trajetória em velocidade constante igual a 60 km/h, desacelera a uma taxa de $0,7 \text{ m/s}^2$ por 10 segundos, atingindo a velocidade de 35 km/h, e volta a acelerar a uma taxa de $0,45 \text{ m/s}^2$ por 14 segundos, voltando à velocidade inicial. Os veículos seguidores obedecem à equação de aceleração do modelo, como mostra a figura 3. A verificação da validade da equação e dos parâmetros inseridos foi realizada através do gráfico de variação da posição dos veículos ao longo do tempo. Conforme mostra a figura 4, o veículo líder traça uma trajetória e os seguidores, obedecendo ao modelo GHR, seguem a mesma trajetória a certa distância, sem ultrapassagens ou atrasos, ou seja, sem que as linhas dos veículos seguidores cruzem a linha do líder ou se distanciem dela.

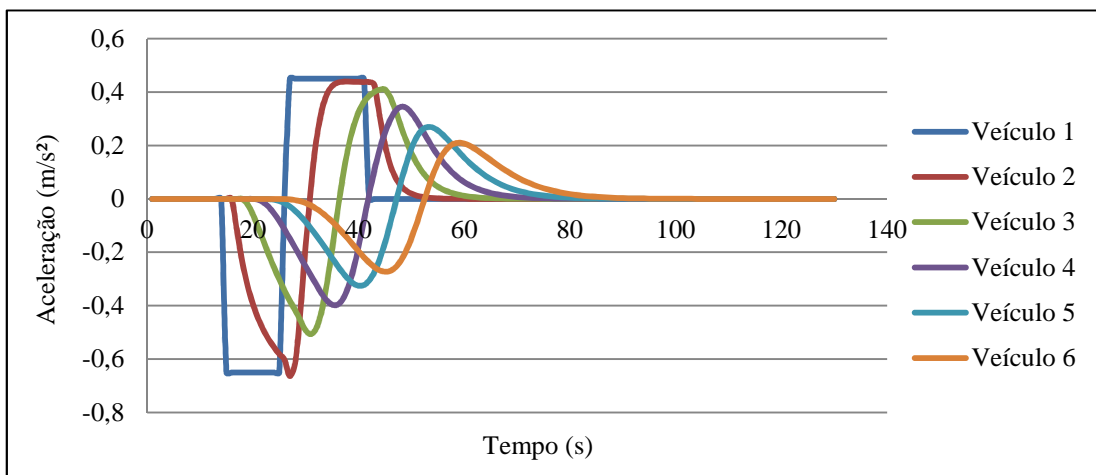


Figura 3: gráfico da aceleração dos veículos ao longo do sem paradas

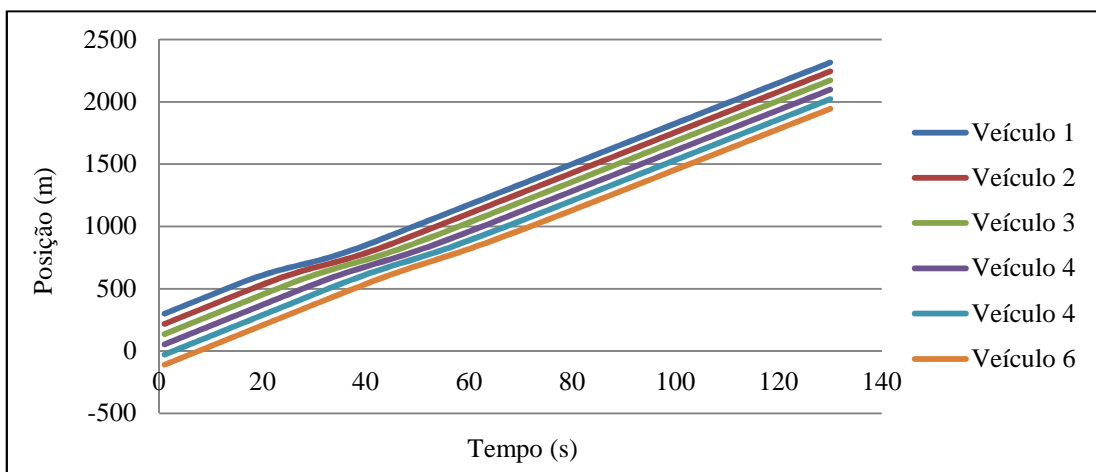


Figura 4: posição dos veículos ao longo do tempo

Após a conclusão de que o modelo representa bem a reação dos seguidores aos movimentos do líder, foi realizada a segunda avaliação aplicando ações diferentes ao veículo líder. O veículo iniciou o trajeto trafegando com a mesma velocidade inicial e aplicou as mesmas taxas de aceleração e desaceleração. Porém, desta vez, a desaceleração foi aplicada até o veículo parar e ele somente torna a acelerar após 20 segundos. Este teste foi realizado com o intuito de verificar o desempenho do modelo à situação de parada dos ônibus nas estações para atender à demanda de passageiros.

A figura 5 mostra que a equação foi bem empregada uma vez que o segundo veículo obedece à trajetória do líder sem ultrapassá-lo ou se distanciar. Porém, neste caso, o terceiro veículo em diante revelam velocidades negativas no momento em que deveriam parar na estação. Além disso, o gráfico da figura 6, que mostra a aceleração dos veículos ao longo do tempo, apresenta uma oscilação durante a desaceleração que, mesmo com a variação de parâmetros como comprimento do veículo e *headway*, não foi corrigida. Embora a causa dessa oscilação não tenha sido investigada, pode-se dizer que o modelo não se comporta bem em situações típicas de operação de ônibus.

O motivo das oscilações pode estar relacionado com a taxa de desaceleração empregada pelo veículo líder. Por causa da equação única do modelo GHR que expressa todos os movimentos possíveis do veículo, desacelerações bruscas do líder podem desestabilizar o restante do pelotão. Além disso, caso as constantes do modelo tivessem sido calibradas para ônibus e não automóveis, talvez o modelo apresentasse melhores resultados.

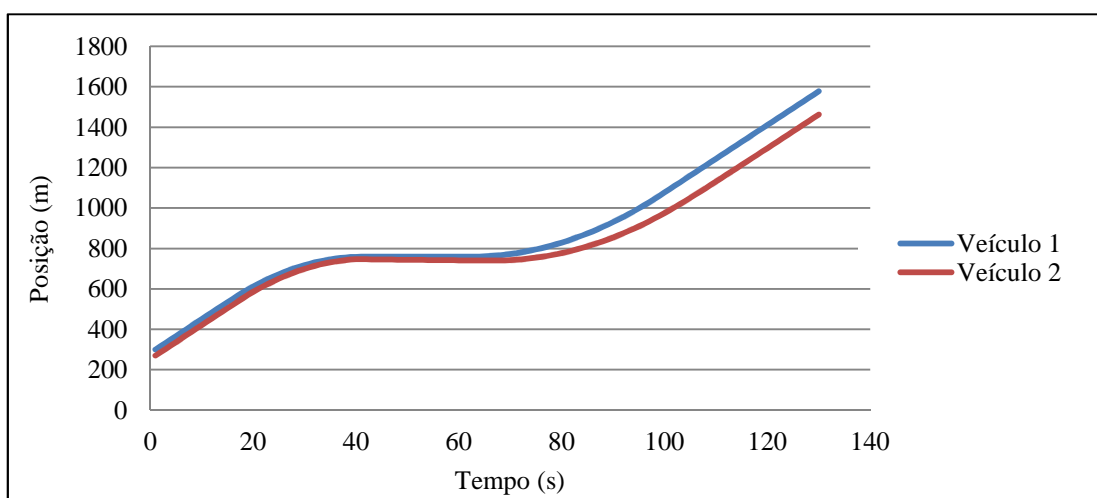


Figura 5: posição dos veículos ao longo do tempo com parada de 20 segundos

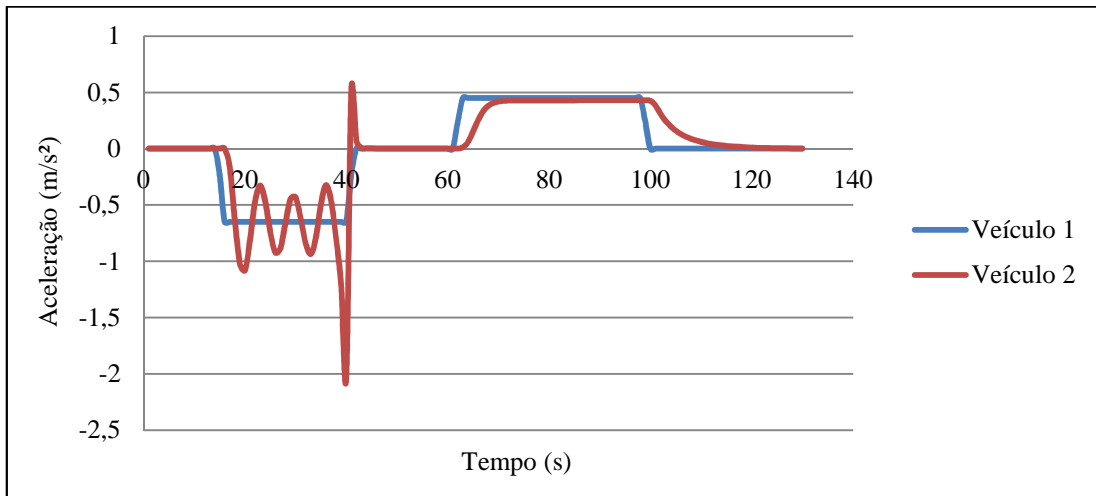


Figura 6: aceleração ao longo do tempo com parada de 20 segundos

O modelo GHR se mostrou bastante sensível à variação da distância inicial entre os veículos em ambos os testes. No caso em que o veículo líder trafega sem realizar a parada, a distância mínima entre os veículos é de 55 metros. Se a distância inicial for menor, os veículos seguidores apresentam oscilações na aceleração até atingirem a velocidade desejada, ou seja, o motorista acelera e desacelera repetidamente, o que forma uma linha senoidal no gráfico por um determinado tempo. É o que acontece para a distância inicial testada de 38 metros (inferior a 55 metros). Para as distâncias testadas de 67 e 84 metros (superiores a 55 metros), o modelo gera gráficos como o da figura 3.

No teste em que os veículos realizam a parada, apenas para a distância entre veículos de 18 metros o veículo seguidor acompanhou o líder da maneira esperada. Qualquer outra distância, maior ou menor, distorce o gráfico da posição ao longo do tempo. Portanto, neste teste com o modelo GHR não foi possível aplicar os *headways* relativos às distâncias de 38, 67 e 84 metros previstos no método. Quanto à variação do tempo de reação do motorista, o modelo não se mostrou significativamente sensível.

3.1.2 Resultados do modelo de Gipps

Os mesmos testes realizados com o modelo GHR foram aplicados ao modelo de Gipps. O primeiro deles, onde os veículos não realizam a parada, confirmou a correta interpretação das equações do modelo e o segundo procurou verificar o comportamento do modelo às condições

de tráfego de sistemas ônibus. As figuras 7 e 8 mostram o comportamento dos veículos seguidores quando é aplicado ao veículo líder o mesmo comportamento adotado no teste do modelo GHR, qual seja velocidade inicial de 60 km/h, desaceleração por 10 segundos a uma taxa de $0,7 \text{ m/s}^2$ até atingir a velocidade de 35 km/h, retornando à velocidade inicial acelerando a uma taxa de $0,45 \text{ m/s}^2$ por 14 segundos.

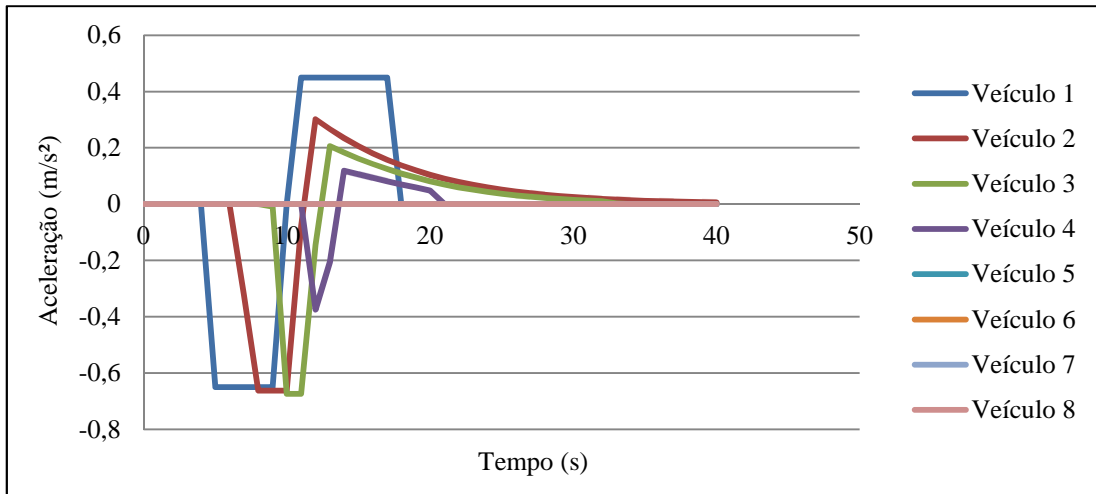


Figura 7: aceleração ao longo do tempo com tempo de reação de um segundo

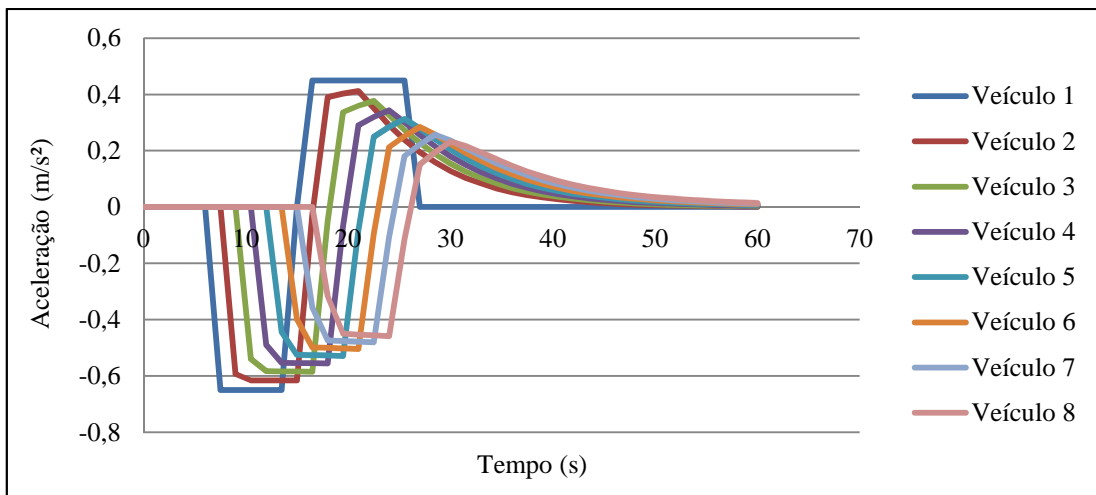


Figura 8: aceleração ao longo do tempo com tempo de reação de 1,5 segundo

A diferença entre as figuras 7 e 8 está no tempo de reação dos motoristas. Na figura 7 o tempo de reação é de um segundo enquanto na figura 8 é de 1,5 segundo. É possível notar que quanto maior o tempo de reação dos motoristas, mais veículos seguidores são influenciados pelo comportamento do veículo líder. Na figura 7 os veículos seguidores de cinco a oito já não reagem aos estímulos do veículo líder. Além disso, no caso em que o tempo de reação é

menor, o veículo seguidor aplica uma desaceleração máxima maior do que a do líder e por menos tempo, ou seja, freia com mais agressividade do que no caso em que o tempo de reação é maior.

No segundo teste o veículo líder realiza a parada de 20 segundos e foram inseridos 19 veículos seguidores, totalizando um pelotão de 20 veículos. Assim como no primeiro teste, nesta segunda etapa o tempo de reação interferiu apenas na dissipação da fila e na agressividade da desaceleração e ambos os tempos testados apresentaram resultados satisfatórios. Por esta razão, serão apresentados somente os resultados do teste utilizando tempo de reação de um segundo, tendo em vista que o teste referente ao tempo de reação de 1,5 segundo apresentou resultado semelhante. Isso ocorre também com a variação do tamanho do veículo entre 12 e 18,5 metros, que altera o espaçamento entre veículos em magnitude e não interfere nos resultados. Os veículos dos testes apresentados possuem 12 metros de comprimento.

Diferentemente do modelo GHR, a figura 9 mostra que o modelo de Gipps não apresenta oscilações da aceleração e desaceleração. Esta estabilidade pode ser influenciada pela divisão do modelo em duas equações que isolam os comportamentos “fluxo livre” e “seguidor”. O teste revelou também que os veículos seguidores não permanecem parados o mesmo tempo que o veículo líder. Este efeito pode ser visto na figura 9, que mostra que os últimos veículos do pelotão não realizam a parada antes de tornar a acelerar.

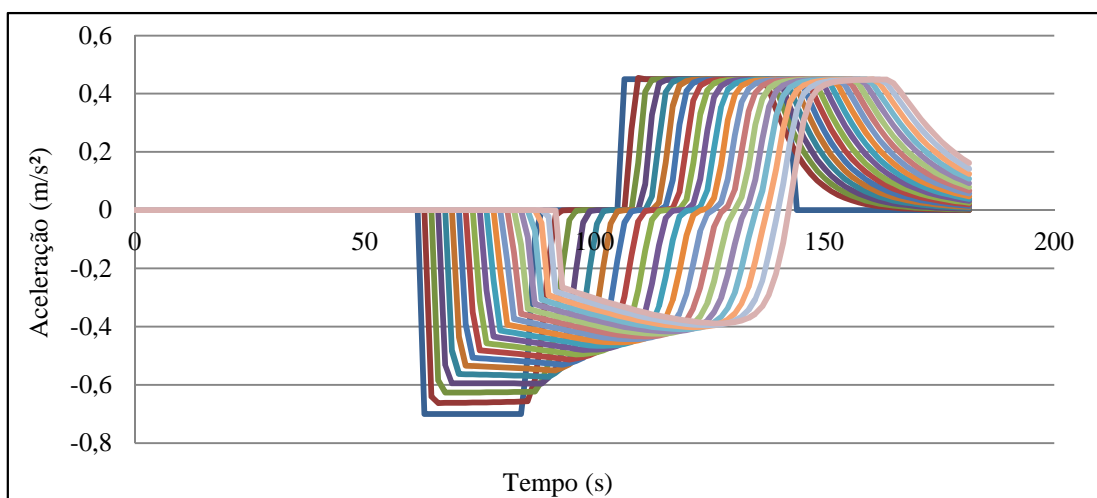
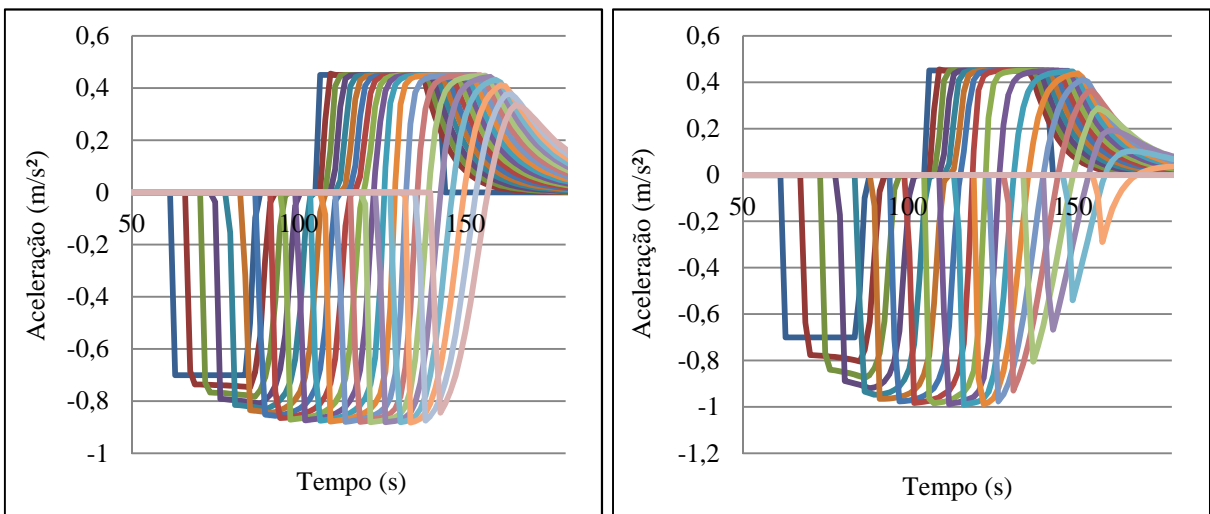


Figura 9: aceleração ao longo do tempo com distância entre veículos de 38 metros

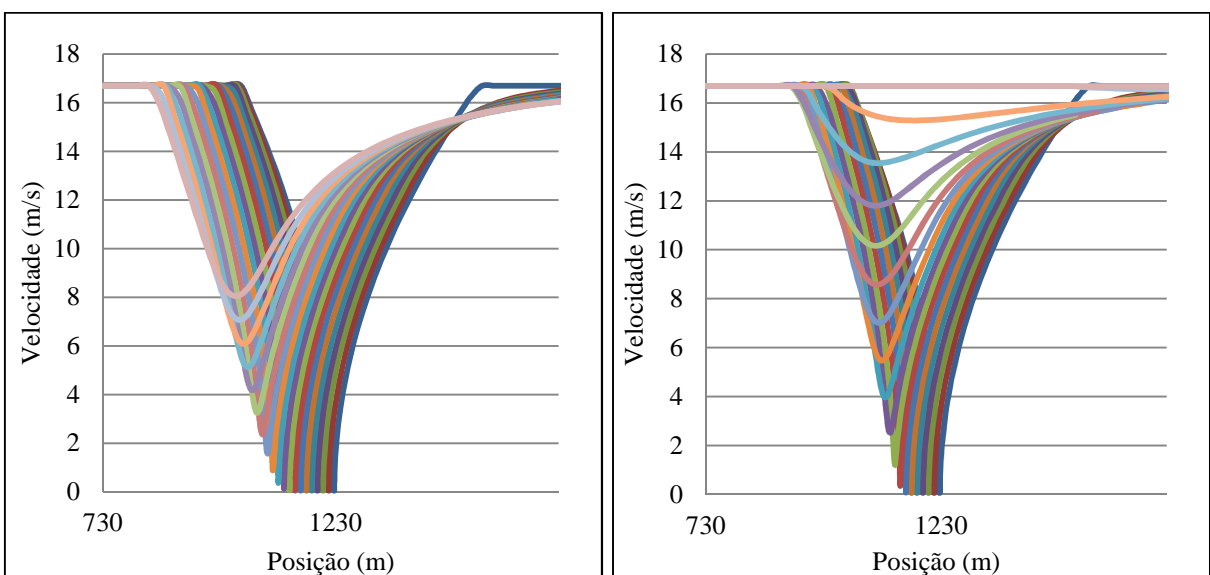
Esta situação é ainda mais perceptível conforme a distância entre os veículos aumenta como pode ser visto nas figuras 10-a e 10-b, 11-a e 11-b e 12-a e 12-b. Nestes casos, além de os veículos não realizarem a parada, o tempo em estado de desaceleração é menor. Isto ocorre porque, quando o veículo seguidor se encontra a uma distância maior do líder, o motorista é capaz de perceber a ação completa do líder (desaceleração, parada e aceleração) antes que seja necessário reagir a ela. Assim, o motorista do veículo seguidor apenas diminui a velocidade para manter a distância segura e volta a acelerar.



(a)

(b)

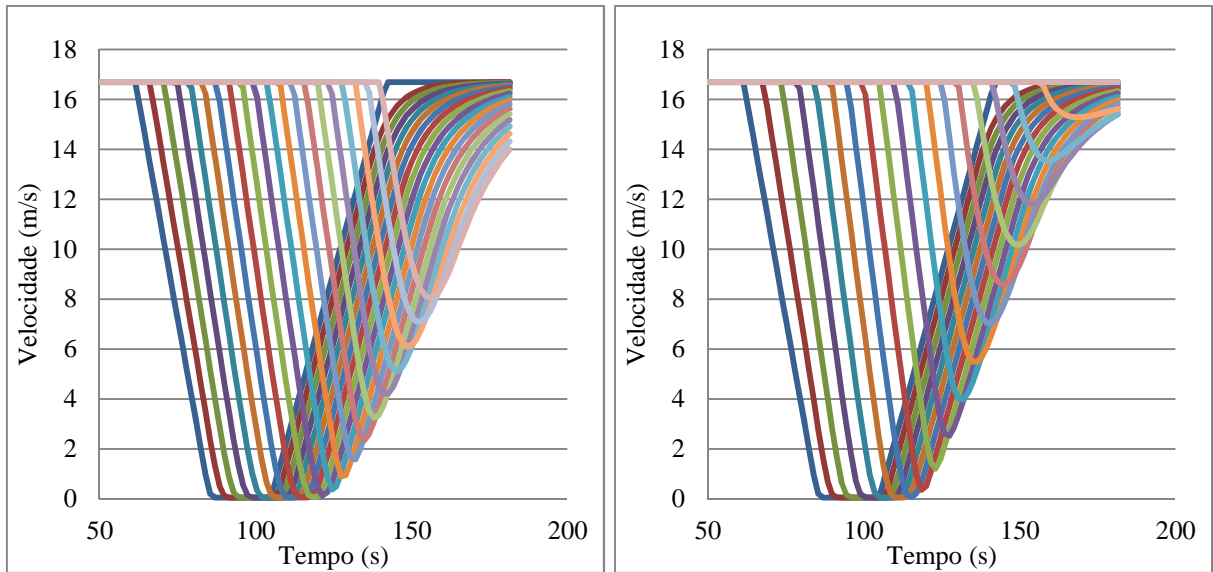
Figura 10: aceleração ao longo do tempo (a) distância entre veículos de 67 metros e (b) distância entre veículos de 84 metros



(a)

(b)

Figura 11: velocidade relacionada à posição dos veículos (a) distância entre veículos de 67 metros e (b) distância entre veículos de 84 metros



(a) (b)
 Figura 12: velocidade ao longo do tempo (a) distância entre veículos de 67 metros e (b) distância entre veículos de 84 metros

O resultado da variação da distância entre veículos propiciou a avaliação do comportamento da operação do pelotão de 20 veículos dividido em dois grupos de 10 veículos. A figura 13 mostra o primeiro pelotão de 10 veículos atendendo a estação por 20 segundos e o segundo grupo ocupa a plataforma assim que ela se torna livre. Neste caso utilizou-se uma ordem para que o veículo líder do segundo pelotão realizasse a parada e então os seus seguidores responderam a esta manobra.

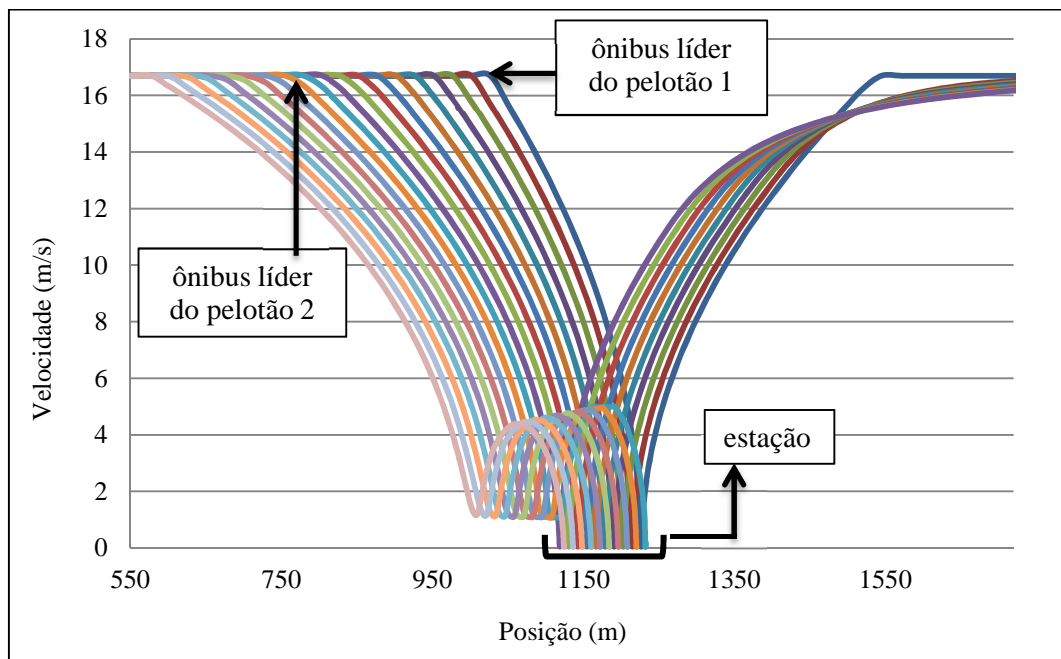


Figura 13: velocidade relacionada à posição de dois pelotões de 10 veículos

3.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta etapa do trabalho apresentou a caracterização dos modelos veículo seguidor encontrados na literatura com o objetivo de identificar os mais utilizados em *softwares* de simulação e de mais simples calibração. Após a obtenção deste resultado, dois modelos foram testados com parâmetros característicos de sistemas ônibus: o de Gazis-Herman-Rothery (GHR) e o de Gipps. Os modelos foram testados com os mesmos dados, alguns fixos e outros variados conforme a necessidade de avaliação dos gráficos elaborados com os dados resultantes dos modelos.

O modelo GHR mostrou-se efetivo para a simulação do comportamento de tráfego em que os veículos viajam sem realizar paradas e aplicam acelerações e desacelerações ao longo do tempo apenas para diminuir e aumentar a velocidade. No caso em que os veículos param por um espaço de tempo – característica típica na operação de ônibus – o modelo se mostrou pouco eficaz. A aplicação de taxas de desaceleração bruscas pode ter influenciado este resultado assim como a inserção de valores de constantes sem relação com as demais variáveis, ou seja, constantes não calibradas.

Os resultados dos testes com o modelo de Gipps, que é conhecido por possuir comportamento realístico na propagação de distúrbios envolvendo pelotões, apresentaram boa relação com diferentes comportamentos do veículo líder. Tanto na opção em que o veículo líder trafega sem paradas quanto na opção em que realizam a parada, os veículos seguidores tiveram comportamento uniforme, revelando que o modelo é capaz de representar as características de sistemas ônibus.

Os resultados destes testes mostraram, ainda, a evolução dos modelos veículo seguidor ao longo de quase meio século. É provável que não exista um modelo perfeito que represente o real comportamento dos motoristas. Porém, há evidências suficientes que comprovem a relação dos resultados de simulações dos modelos existentes com os dados de correntes reais de tráfego. O detalhe que faz da simulação uma forte ferramenta de auxílio na tomada de decisão é a calibração do modelo com dados específicos da situação a ser representada.

4 LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE DADOS DE CAMPO

A próxima etapa do trabalho define o procedimento da calibração do modelo de Gipps para a operação de ônibus, desde a coleta até a análise dos dados de campo. Para isso, é necessário a adoção de técnicas conhecidas na bibliografia que tornam a pesquisa válida. A seguir serão descritas as técnicas utilizadas neste trabalho para o levantamento e análise de dados.

4.1 TÉCNICAS DE COLETA DE ACELERAÇÃO E DESACELERAÇÃO

Para calibrar modelos veículo seguidor é necessário dispor de dados reais. Há na literatura diferentes fontes destes dados, alguns coletados das vias mediante técnicas diversas, outros obtidos junto a instituições públicas e privadas responsáveis por medições e monitoramento das vias. A aceleração e a desaceleração de ônibus são dados de difícil obtenção por meio das instituições e, assim, devem ser coletados optando pela técnica mais apropriada.

Métodos de coleta com aparelhos de medição em campo como GPS (*Global Positioning System*), por exemplo, não apresentam o melhor desempenho para este caso na medida em que, embora o aparelho seja programado para registrar dados a cada segundo, as séries registradas por esses aparelhos geralmente apresentam intervalos de tempo variado que giram no entorno de um segundo entre registros. Radares, acelerômetros e outros aparelhos de medição isolada, por sua vez, apresentam custos elevados. No caso da necessidade de obtenção de dados para vários veículos de uma só vez, os aparelhos embarcados se tornam ainda mais onerosos. Outro inconveniente das medições locais é a dificuldade da determinação de características instantâneas como *headway*, densidades e velocidade média no espaço.

Espinosa e Coeymans (2008) descrevem o método do Sistema de Aquisição de Dados (SAD) que registra a distância percorrida a cada 0,3 segundos, com o qual pode-se determinar a velocidade e a aceleração. O Sistema de Aquisição de Dados é um programa para a leitura de sinais de tensão elétrica, que podem ser gerados por uma variedade de sensores e são digitalizados através de um microcomputador. Podem ser adquiridos e processados sinais de temperatura, voz, força, entre outros (UFRGS, 2012). Porém, segundo Espinosa e Coeymans

(2008), este método produz muitos erros devido à instabilidade do sistema frente às vibrações dos veículos. O sistema tem sido melhorado para gerar estabilidade e veracidade dos dados.

Métodos de filmagem são amplamente utilizados na coleta de vários dados relativos ao tráfego de veículos. Muitas entidades monitoram o tráfego de estradas e vias urbanas através de câmeras e dispõem de muitos vídeos que podem ser utilizados em pesquisas. Além de possuir custo baixo, a filmagem permite a análise dos movimentos quantas vezes forem necessárias. No caso da necessidade do levantamento presencial, hoje é fácil adquirir uma filmadora digital e sua operação não requer um especialista.

Há relatos de experimentos com filmagens de fluxo veicular realizadas a partir de helicópteros, como descrevem Hoogendoorn et al. (2003). Com o objetivo de coletar dados detalhados do comportamento de motoristas em congestionamentos, os autores desenvolveram um *software* que detecta e descreve a trajetória dos veículos automaticamente. Porém, além do alto custo dos equipamentos envolvidos, este método requer que algumas operações sejam aplicadas para corrigir as imperfeições das imagens, como distorções devido ao movimento do helicóptero.

Filmagens a partir de pontos fixos elevados, como postes ou mesmo edificações, caracterizam a forma mais fácil para a obtenção de imagens com boa qualidade. A visibilidade do entorno necessária para o rastreamento do veículo por uma determinada distância é atendida e não há o inconveniente da distorção da imagem devido ao movimento da câmera. Além disso, o método não perde sua principal característica positiva: baixo custo e praticidade de operação.

4.2 RECONHECIMENTO DE IMAGEM

Com o avanço exponencial da tecnologia é possível admitir que computadores capturem imagens e as processem de forma a transformá-las em informação. Desde o mais simples identificador de códigos de barras de produtos até sofisticados *softwares* de reconhecimento facial, existem diversas técnicas utilizadas no mercado para o reconhecimento de imagens. É possível encontrar estes *softwares* em smartphones, câmeras digitais, em vendas de produtos online ou em manuais que interagem com o usuário. O limite é o programador que define.

Os elementos utilizados pelos processadores na transformação de imagens em informações úteis ao analista são básicos. O *software* de reconhecimento facial utilizado pela polícia americana para encontrar criminosos em meio à multidão, por exemplo, calcula algumas medidas como distancia entre os olhos, comprimento do nariz, ossos laterais da face linha da mandíbula, entre outros (Vasquez, 2012). Já as câmeras de trânsito que realizam o reconhecimento da placa dos veículos em tempo real, processam a imagem com mais detalhe. Estes sistemas consideram o contraste entre um pixel e outro para criar linhas e comparam o desenho formado com símbolos pré-definidos.

Os algoritmos mais complexos utilizam também inteligência artificial. No caso da necessidade de reconhecimento de elementos muito semelhantes, que não são diferenciados pelo computador, faz-se uso de uma espécie de treinamento para a máquina, conhecido como aprendizado assistido. Neste sistema, o computador é alimentado com uma vasta fonte de imagens ligadas a informações pertinentes ao reconhecimento pelo computador. Com estas informações, a máquina se torna capaz de diferenciar modelos de veículos, por exemplo, ao saber de antemão quais os modelos que possivelmente aparecerão no vídeo (Rocha, 2003).

Para o reconhecimento do movimento de ônibus ao longo de corredores exclusivos, apesar da aparente simplicidade do processo, o encontro do *software* não foi imediato. Muitos dos especialistas consultados indicaram métodos muito sofisticados para a intenção e alcance da pesquisa. A solução partiu do Laboratório de Sistemas de Transportes da Universidade Federal do Rio Grande do sul, onde os pesquisadores identificaram um *software* simples de reconhecimento de imagem disponível na internet.

O Kinovea 0.8.15, um *software* gratuito de análise de imagens, é essencialmente utilizado para estudar e avaliar o desempenho de atletas, mas também útil para animadores e engenheiros de ergonomia. O Kinovea possui as seguintes ferramentas de análise (Kinovea, 2012):

- a) reprodução em câmera lenta;
- b) reprodução em alta velocidade;
- c) ferramentas de ampliação da imagem;
- d) possibilidade de escolha do formato da representação do tempo;
- e) qualidade da imagem ajustável;
- f) ferramentas de desenho (retas, formas, ângulos, etc.) e texto;

- g) marcação de referencia de observação;
- h) rastreamento manual ou semiautomático dos objetos;
- i) medidas de distância e velocidade dos objetos rastreados.

O *software* foi utilizado para identificar a trajetória de ônibus sucessivos, registrando a posição (x,y) de um ponto de referência de cada veículo filmado a cada 33 milissegundos. Com estas séries de posição ao longo de um curto intervalo de tempo (aproximadamente 30 observações por segundo) foi possível identificar a variação da aceleração de maneira detalhada. Esse nível de detalhamento é importante principalmente na chegada e na saída dos ônibus das estações, onde ocorre maior variação da velocidade.

4.3 PARALAXE

O *software* de reconhecimento de imagem produz séries de posicionamento ao longo do tempo da trajetória veicular, dado um determinado ponto de referencia. No Kinovea é possível indicar as medidas reais, entretanto as diferenças das medidas causadas pela paralaxe da imagem não são automaticamente corrigidas. Assim, técnicas de transformação das medidas da filmagem em medidas reais foram estudadas.

A paralaxe é a diferença na posição aparente de um objeto visto por observadores em pontos distintos. Os recursos para a medição e balanceamento da paralaxe são amplamente estudados na cartografia. Ainda que a tecnologia permita a correção automática, métodos analíticos ainda são utilizados para atualização cartográfica de áreas que não necessitam de alta precisão dos resultados e também para o suporte didático ao ensino.

O método para a correção das medidas usado neste trabalho é o das coordenadas retangulares descrito por Bleyl (1972) que foi empregado por Matthew Huber e Joseph Tracy no fim dos anos 60 a fim de simplificar o procedimento bastante utilizado na época utilizando grades de perspectiva. O método de Bleyl se mostrou eficaz junto às técnicas modernas para solução de sistemas de equações. O método consiste em converter as coordenadas obtidas nas filmagens para posições laterais e longitudinais, utilizando uma rotina numérica de fácil resolução. Esse método foi aplicado com sucesso também por Lindau (1983) para corrigir a posição de ônibus em filmes Super 8 realizados a longo da Avenida Farrapos em Porto Alegre.

Em campo, são medidas três distâncias com relação a um ponto de referência. O quadrilátero formado pelos quatro pontos de referência requer que os ângulos internos tenham entre 70° e 110° . Este ponto de referência deve ser concomitante ao do filme e as medidas realizadas em campo devem ser realizadas dentro do filme também. Assim, ao final têm-se quatro pontos em duas escalas diferentes, como exemplifica a tabela 3.

Tabela 3: medidas reais dos pontos de referência e suas correspondentes no filme

Ponto	Medidas do vídeo		Medidas reais	
	x	y	x	y
Referência	0	0	0	0
1	-109	-144	-17,362	-22,222
2	-46	-175	-11,361	-25,827
3	46	-21	6,535	-2,509

Os pontos são relacionados com o plano da filmagem (figura 14) através das equações 7 e 8. As coordenadas reais dos quatro pontos medidas em campo são igualadas às coordenadas reais calculadas a partir das equações 7 e 8, que envolvem as coordenadas dos pontos no filme e as constantes C1 a C8. O conjunto de equações pode ser resolvido utilizando a ferramenta Solver do Excel®, com o qual se obtêm as oito constantes. Os pontos registrados da trajetória ao longo do tempo pelo *software* de reconhecimento de imagem são, então, transformados nas posições verdadeiras do ônibus, utilizando novamente as equações 7 e 8 e as constantes já calculadas.

$$X_r = \frac{C_1 + C_2 X_f + C_3 Y_f}{C_4 X_f + C_5 Y_f + 1} \quad (\text{equação 7})$$

$$Y_r = \frac{C_6 + C_7 X_f + C_8 Y_f}{C_4 X_f + C_5 Y_f + 1} \quad (\text{equação 8})$$

Onde:

X_f, Y_f = par de coordenadas no plano do filme

X_r, Y_r = par de coordenadas correspondentes no plano da via (real)

C_1, C_2, \dots, C_8 = coeficientes constantes para todas as tomadas do filme contanto que a filmagem seja feita de um ponto fixo

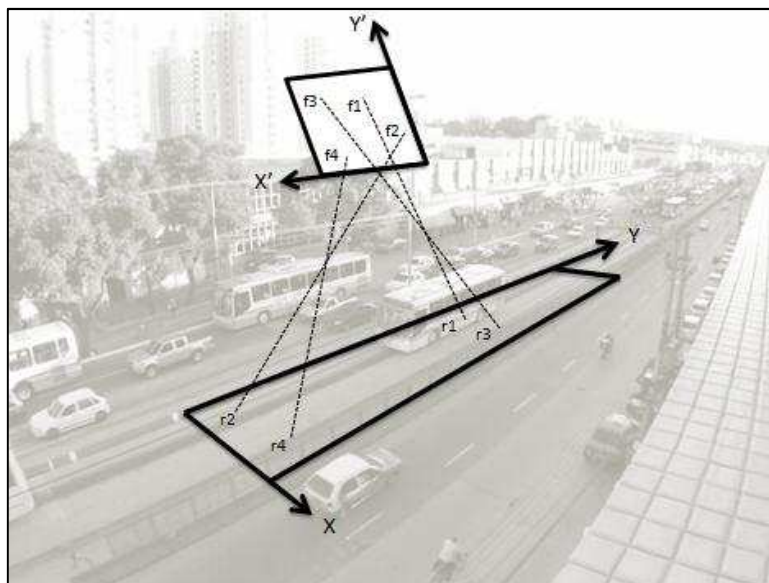


Figura 14: relação entre pontos do plano do filme e do plano da via

4.4 PESQUISA VISUAL DE OCUPAÇÃO DE ÔNIBUS

Além da medição da desaceleração e aceleração máximas dos ônibus na chegada e saída da estação, este trabalho descreve também a relação da intensidade dessas taxas com o nível de ocupação dos ônibus. Para isso, foi necessária a realização da coleta da ocupação dos veículos.

Em 1989 foi publicada a NBR 10985 – Pesquisa visual de ocupação de ônibus (ABNT, 2012) que fixava os procedimentos a serem observados na realização da pesquisa visual de ocupação de ônibus. Porém, por ser pouco utilizada pelo setor de transportes, foi cancelada em novembro de 2012. Ainda assim, o método é utilizado por muitas das conceituadas empresas de consultoria de transportes brasileiras.

A pesquisa visual de ocupação de ônibus é realizada no trecho mais carregado na linha onde um pesquisador treinado estima o nível de ocupação dos veículos utilizando como base gabaritos, como mostra a figura 15, exemplo extraído de Nicolai et al. (1987). Este método é utilizado para observar a variação da demanda nos diferentes períodos do dia.

Outro método conhecido consiste na pesquisa no interior do ônibus. O pesquisador embarca no ônibus e registra o número inicial de passageiros no veículo. Ao longo da viagem, ele

registra o número de passageiros que embarcam e desembarcam em cada ponto de parada, calculando os passageiros remanescentes em cada trecho entre paradas.

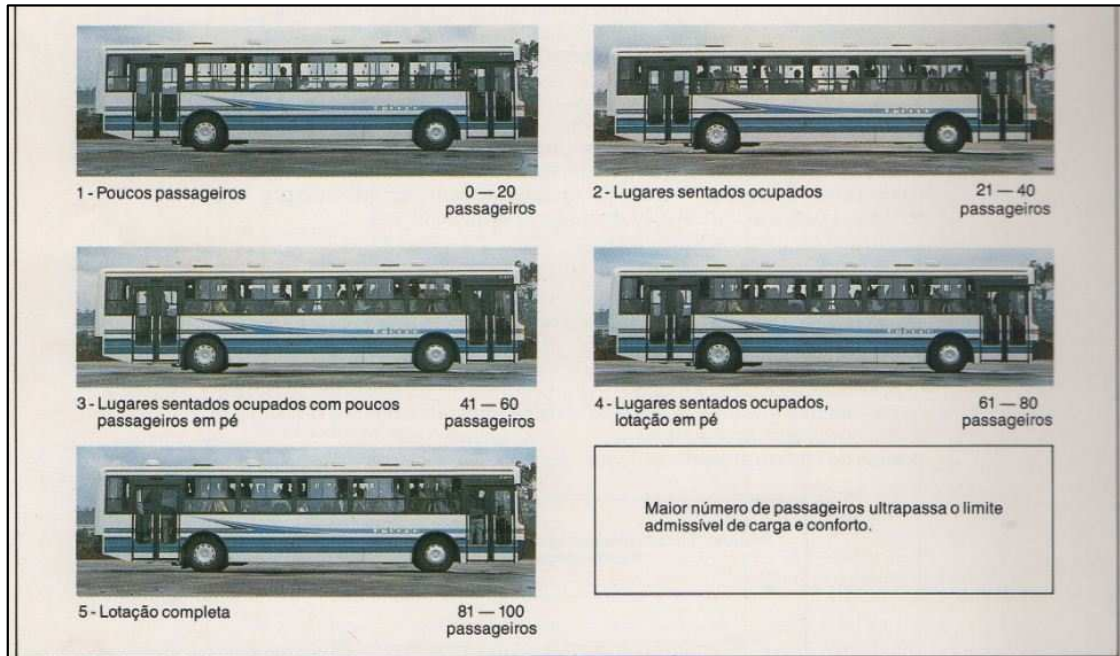


Figura 15: níveis de lotação do ônibus

Sistemas metroviários valem-se de sensores bolha para estimar o carregamento de suas composições e, assim, determinar a potência a ser empregada pelos motores na aceleração a partir das estações. A pesagem de veículos é um método utilizado para transporte de carga em rodovias que poderia também ser adaptado para o registro da ocupação do ônibus. Este método seria utilizado no caso em que se deseja saber a ocupação do ônibus para projetos de pavimentação ou de pesquisas de diferenciação de velocidade e aceleração conforme a carga. A pesagem poderia ser realizada de maneira dinâmica, com dispositivo instalado na estação, evitando a necessidade de parada durante o processo.

5 CALIBRAÇÃO DO MODELO VEÍCULO SEGUIDOR

Este capítulo apresenta as várias etapas do método de calibração do modelo veículo seguidor para a replicação de sistemas ônibus operando em corredor exclusivo. A simplicidade do método utilizado é uma característica importante, pois permite a reprodução sem a necessidade de equipamentos e procedimentos complexos. A coleta dos dados foi realizada através de filmagens que foram posteriormente analisadas com auxílio do Kinovea e com o método de coordenadas retangulares. Concomitante às filmagens, foi realizada também a pesquisa visual da ocupação dos ônibus.

5.1 MODELOS CALIBRADOS

Por se mostrar eficaz na simulação de sistemas ônibus, o modelo veículo seguidor de Gipps foi calibrado utilizando dados coletados de um corredor BRT. O modelo possui duas equações, uma delas utilizada para condições de tráfego em fluxo livre e a outra para manter o veículo seguidor a uma distância segura em relação ao veículo líder.

Entretanto, como a primeira equação possui parâmetros fixos calibrados com dados obtidos do tráfego de automóveis, para a representação do deslocamento em fluxo livre dos ônibus propõe-se utilizar um modelo de aceleração linear. O modelo assume que a aceleração de um veículo cai linearmente com o aumento da sua velocidade, tendendo a zero na medida em que a velocidade tende ao valor máximo desejado, conforme a equação 9.

$$a(t + dt) = A_{m\acute{a}x} \times \left[1 - \frac{v(t)}{V_{des}} \right] \quad (\text{equação 9})$$

Onde:

$a(t + dt)$ = aceleração do veículo no instante $t + dt$

$A_{m\acute{a}x}$ = aceleração máxima

$v(t)$ = velocidade no instante t

V_{des} = velocidade máxima desejada

Uma adaptação da equação do modelo de Gipps para o veículo seguidor é utilizada para determinar a velocidade ao longo do espaço de tempo em que os veículos se aproximam de um alvo estático, ou seja, a estação. Nesse caso, a equação que estima a velocidade do veículo seguidor (equação 4) se reduz à equação 10.

$$v_n(t + T) = b_n \times T + \sqrt{b_n^2 \times T^2 - b_n \times \{2 \times [x_{alvo} - x_n(t)] - v_n(t) \times T\}} \quad (\text{equação 10})$$

Onde:

b_n = máxima taxa de frenagem que o n – *ésimo* veículo deseja utilizar

x_{alvo} = posição do alvo

$x_n(t)$ = posição da frente do n – *ésimo* veículo no instante t

$v_n(t)$ = velocidade do n – *ésimo* veículo no instante t

T = tempo de reação do motorista

5.2 VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE

Antes da coleta dos dados para a calibração utilizando o método elaborado, realizou-se um teste piloto com filmes já existentes de um corredor de ônibus. Os filmes disponíveis foram também feitos com a finalidade de calibração do modelo veículo seguidor, porém, na ocasião o Kinovea não era conhecido e, por isso, o método utilizado para a extração de dados das filmagens foi diferente. Antes das filmagens, foram pintadas marcas no meio fio do corredor a cada cinco metros até a linha de retenção do semáforo, conforme mostra a figura 16.

Os filmes disponíveis foram analisados com um *software* capaz de rodar em baixa velocidade, onde foi possível determinar os exatos instantes em que os ônibus atingiam cada marca no pavimento. Logo, foi possível extrair os dados distância e tempo, necessários para a calibração. A desvantagem deste método reside em ter-se apenas o registro do tempo em que os ônibus passam por pontos referenciais da via (figura 17). Além disso, pintar a via não é possível em muitos corredores.



Figura 16: ângulo das filmagens disponíveis para validação do método

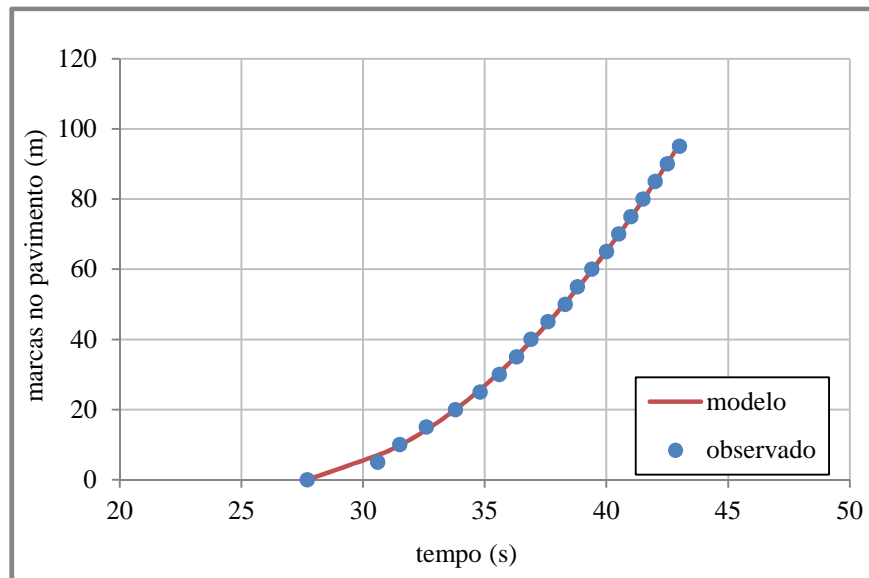


Figura 17: instantes em que o ônibus passa pelas marcas no meio fio

A forma de identificação dos veículos no *software* Kinovea, por sua vez, é bastante simples e dispensa as marcas no pavimento. Um ponto de todos os ônibus é escolhido e indicado como referência para que o Kinovea identifique a sua trajetória em relação a um ponto de referência estático previamente escolhido. Para este trabalho, o farol dianteiro esquerdo foi escolhido como ponto do veículo por ser pequeno e apresentar coloração diferenciada das demais partes

do veículo. O tamanho do ponto assim como a distinção de cor é importante para o *software* identificar que o veículo se move.

As filmagens utilizadas para a validação do método mostram a operação e movimentação dos veículos logo após atender a uma estação, em um dos corredores tipo *busway* mais carregados do Brasil, localizado na Avenida Assis Brasil, na cidade de Porto Alegre. O ângulo de visão das filmagens é ilustrado na figura 16. Foram analisadas duas filmagens disponíveis tomadas da mesma edificação, porém de diferentes distâncias da estação. As filmagens foram realizadas no pico da tarde com duração de aproximadamente duas horas. Foi utilizada uma câmera Panasonic com lente de alcance de ângulos amplos, fixada com tripé. Este tipo de lente não é recomendado, no entanto, por distorcer a imagem e prejudicar a correção da paralaxe.

As duas filmagens foram rodadas no Kinovea e de cada uma foram extraídas as séries de coordenadas (x,y) registradas ao longo do tempo de diversos veículos. As coordenadas foram corrigidas usando o método de coordenadas retangulares. Das coordenadas ajustadas foram obtidas as distâncias percorridas pelos ônibus calculando as hipotenusas de triângulos infinitesimais, como mostra a figura 18. A tabela 4 mostra um exemplo dos dados do movimento de um ônibus observado, separando os dados de saída do Kinovea dos dados corrigidos.

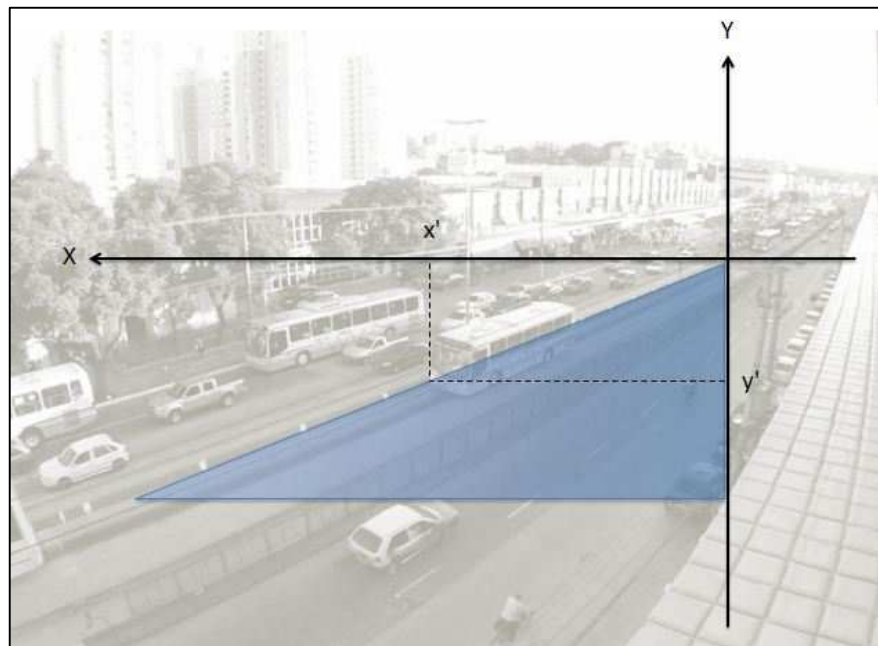


Figura 18: esquema para cálculo da distância percorrida

Tabela 4: fragmento da série de dados do movimento observado de um ônibus

Dados de saída do Kinovea			Coordenadas corrigidas pelo método das coordenadas retangulares (m)		Distância percorrida (m)
x	y	t	Xv	Yv	
23	5	0	3,92	1,25	7,81
23	4	33	3,86	1,05	7,92
22	4	66	3,70	1,04	8,08
22	3	100	3,65	0,84	8,18
22	3	133	3,65	0,84	8,18
21	2	166	3,43	0,63	8,43
21	2	200	3,43	0,63	8,43
21	1	233	3,38	0,43	8,51
20	1	266	3,22	0,42	8,67
20	0	300	3,17	0,22	8,75
19	0	333	3,01	0,21	8,91

No Excel®, estes dados foram comparados com a posição teórica dos ônibus líderes de pelotões, calculada a partir da velocidade, obtida do modelo de aceleração linear (tabela 5). O mesmo procedimento pode ser utilizado para a transformação dos dados de desaceleração, obtendo a distância percorrida teórica a partir da velocidade calculada com o modelo de Gipps.

Tabela 5: fragmento da série de dados do movimento modelado de um ônibus

Aceleração modelada (m/s ²)	Velocidade modelada (m/s)	Distância percorrida modelada (m)
$a(t + dt) = A_{m\acute{a}x} \cdot \left[1 - \frac{v(t)}{V_{des}} \right]$	$v(t + dt) = v(t) + a(t) \cdot [t2 - t1]$	$d(t + dt) = d(t) + v(t) \cdot [t2 - t1]$
0,71	3,29	7,17
0,70	3,31	7,28
0,70	3,34	7,39
0,70	3,36	7,50
0,70	3,38	7,61
0,70	3,41	7,73
0,70	3,43	7,84
0,70	3,45	7,96
0,70	3,48	8,08
0,69	3,50	8,19
0,69	3,52	8,31

Para aproximar a curva modelada da curva observada, a diferença entre o par (distância percorrida real, distância percorrida teórica) de cada instante foi elevado ao quadrado e a

soma destas diferenças foi minimizada, ajustando assim os valores dos parâmetros $A_{m\acute{a}x}$ e V_{des} . Para cada veículo filmado, chegou-se a uma aceleração máxima e uma velocidade desejada. A figura 19 mostra o gráfico de deslocamento de um dos veículos acelerando e evidencia a razoável aderência, tendo por conta os erros de paralaxe gerados pela lente da câmera, entre os pontos observados e os pontos modelados após a calibração.

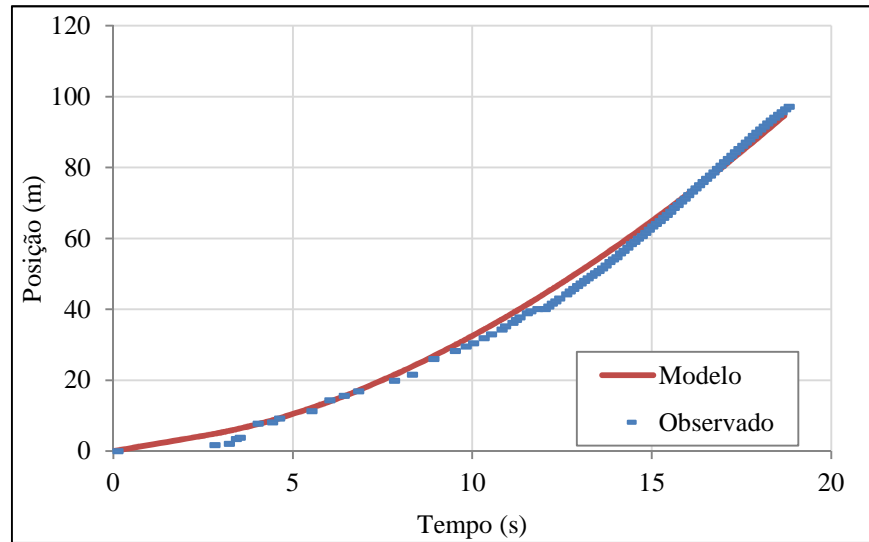


Figura 19: aderência dos dados observados ao modelo

5.3 COLETA DE DADOS

As condições ideais para a coleta de dados implicam em medições realizadas durante os dias de semana com exceção de sextas-feiras, pois neste dia há alterações na composição do trânsito (Espinosa e Coeymans, 2008). As filmagens para o presente estudo foram realizadas no sistema BRT da cidade de Curitiba, nos dias 29 e 30 de Outubro de 2012 (segunda e terça-feira, respectivamente). A figura 20 mostra a programação para filmagem.

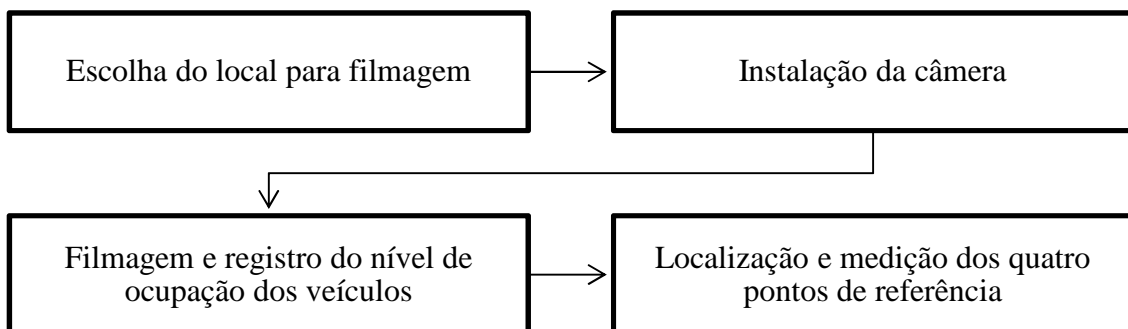


Figura 20: programação para a filmagem

A estação filmada foi a Estação Bento Viana sentido centro-bairro, na Avenida Sete de Setembro. Foi eleita por permitir a aceleração sem a influência de semáforos, estar rodeada de edificações altas e sem interferência de árvores, postes da rede elétrica ou outro elemento que impedisse a filmagem da trajetória do ônibus. A filmadora Sony JVC GZ-EX210 fixada em tripé foi instalada na cobertura de um edifício comercial com altura aproximada de 60 metros. As providências tomadas antes das filmagens assim como um resumo do procedimento de coleta dos dados estão elencadas no Apêndice A.

As figuras 21 e 22 mostram a visão do corredor desde o local das filmagens. As filmagens dos ônibus que aceleram e saem da estação foram feitas de um ângulo diferente daquele das filmagens dos ônibus que desaceleram e chegam à estação. Ambas as filmagens enquadram a estação e 50 metros do corredor, antes da estação no caso da desaceleração e depois da estação no caso da aceleração. Por razão do semáforo instalado no cruzamento que antecede a chegada dos ônibus na estação, apenas foram contabilizados neste experimento os veículos que alcançam o semáforo no sinal verde, ou seja, que não param no cruzamento.



Figura 21: vista desde o local de filmagem da aceleração



Figura 22: vista desde o local de filmagem da desaceleração

O corredor foi filmado em três horários diferentes, sendo dois na hora pico e um fora da hora pico do corredor, na tentativa de obter amostras de distintos níveis de ocupação veicular para as duas manobras. No total foram realizadas seis filmagens com duração aproximada de quarenta minutos que visam caracterizar as seguintes situações:

- a) chegada dos ônibus na estação na hora pico da manhã;
- b) saída dos ônibus da estação na hora pico da manhã;
- c) chegada dos ônibus na estação na hora pico da tarde
- d) saída dos ônibus da estação na hora pico da tarde;
- e) chegada dos ônibus na estação fora da hora pico;
- f) saída dos ônibus da estação fora da hora pico.

Para a pesquisa visual da ocupação dos veículos foi utilizado o padrão de níveis de ocupação sugerido por Nicolai et al. (1987). Cada veículo foi classificado e posteriormente relacionado com os veículos nas filmagens através da sincronização do horário nos relógios digitais do observador encarregado de coletar o nível de ocupação e do encarregado da filmagem. O observador posicionou-se no nível do corredor em posições diferentes conforme a manobra por ele observada:

- a) desaceleração: antes de o veículo parar na estação (à montante da estação);
- b) aceleração: depois de o veículo sair da estação (à jusante da estação).

Após as filmagens, conforme o campo de visão alcançado nas filmagens, foram medidos os pontos de referência para a correção da paralaxe. As figuras 23 e 24 mostram os pontos de referência das filmagens de desaceleração. Tanto no caso das tomadas de aceleração quanto de desaceleração, foram medidas as distâncias entre os quatro pontos que formam o quadrilátero. A tabela 6 mostra as distâncias medidas em campo. A partir destas medidas e utilizando trigonometria, as coordenadas dos quatro pontos foram calculadas.

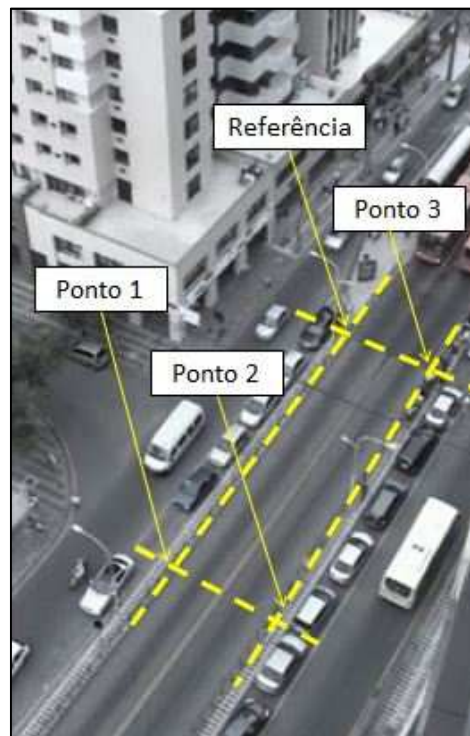


Figura 23: pontos medidos em campo para coleta das acelerações

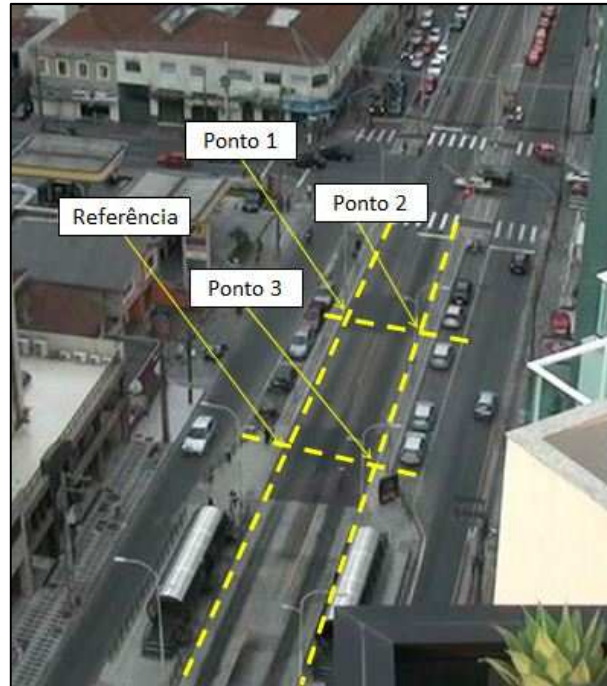


Figura 24: pontos medidos em campo para coleta das desacelerações

Tabela 6: distâncias medidas em campo

	filmes de aceleração	filmes de desaceleração
Distância entre Referência - Ponto 1 (m)	28,2	14,1
Distância entre Ponto 1 - Ponto 2 (m)	7	7
Distância entre Ponto 2 - Ponto 3 (m)	28,2	14,1
Distância entre Ponto 3 - Referência (m)	7	7

5.4 ANÁLISE DOS DADOS

Esta seção do capítulo aborda a análise dos dados obtidos no levantamento de campo em Curitiba. Primeiramente foi realizada a contagem dos veículos de interesse registrados nas filmagens, separados por tipo de manobra e por níveis de ocupação para reconhecimento da amostra adquirida. Posteriormente foi realizada a transformação dos dados através do método previamente testado.

5.4.1 Caracterização da amostra

O número total de veículos registrados durante o tempo de filmagem foi de 141, sendo 70 acelerando e 71 desacelerando. Destes últimos, alguns foram desconsiderados devido à

impossibilidade de rastreá-los com o *software* ou por não resultarem em bom ajustamento com o modelo, restando 47 veículos passíveis de análise. A tabela 7 mostra o número de veículos registrados e validados para análise, separados em horário de filmagem, tipo de manobra e nível de ocupação.

O número de veículos observados com carregamento de nível cinco é bastante escasso, sendo inexistente nas desacelerações. Isto pode ocorrer pela ausência efetiva de veículos muito carregados nos horários das filmagens ou pela semelhança visual, segundo o gabarito utilizado, dos veículos com nível de ocupação quatro.

Tabela 7: número de veículos analisados

		Nível de ocupação do veículo				
		Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5
Pico da tarde	Aceleração	0	1	11	7	4
	Desaceleração	3	4	8	2	0
Fora de pico	Aceleração	4	9	8	2	0
	Desaceleração	2	9	7	1	0
Pico da manhã	Aceleração	8	7	6	3	0
	Desaceleração	6	1	2	1	0

5.4.2 Processamento dos dados

Utilizando o método testado com os dados do corredor de ônibus de Porto Alegre, os dados de deslocamento ao longo do tempo foram extraídos das filmagens e corrigidos através do método das coordenadas retangulares de Bleyl (1972). Para os veículos que partem da estação, ou seja, que aceleram, o ajuste entre os dados coletados e o modelo foi executado da mesma forma que no teste piloto. A taxa de aceleração máxima de todos os ônibus foi estimada a partir de séries de aceleração do veículo a cada 33 milissegundos. No caso dos veículos que chegam à estação, isto é, que desaceleram, foi utilizado o mesmo método, porém utilizando a equação de veículo seguidor de Gipps, adaptada para o alcance de alvos estáticos.

Primeiramente, os dados de distância percorrida de cada veículo registrados em filme ao longo do tempo foram corrigidos, obtendo-se a série de dados reais (tabela 8). Em seguida a velocidade do veículo foi estimada segundo o modelo de Gipps, com atualização de cálculo a cada 33 milissegundos (tabela 9). O tempo de reação do motorista foi fixado em um segundo,

tendo a desaceleração máxima como variável da equação. A partir desta série de dados modelados de velocidade ao longo do tempo, foi calculada a série de dados modelados de distância percorrida ao longo do tempo (tabela 9), que foi ajustada a serie de dados reais, minimizando os quadrados das diferenças entre as duas séries e variando a desaceleração máxima.

Tabela 8: fragmento da série de dados do movimento observado de um ônibus

Dados de saída do Kinovea			Coordenadas corrigidas pelo método das coordenadas retangulares (m)		Distância percorrida (m)
x	y	t	Xv	Yv	
54	90	0	10,50	18,77	0,25
54	89	33	10,43	18,52	0,58
53	88	66	10,23	18,26	0,58
53	88	100	10,23	18,26	0,83
53	87	133	10,16	18,01	1,15
52	86	166	9,97	17,75	1,40
52	85	200	9,90	17,50	1,65
52	84	233	9,83	17,25	1,72
51	84	266	9,71	17,24	1,97
51	83	300	9,64	16,99	2,22
51	82	333	9,58	16,75	2,23

Tabela 9: fragmento da série de dados do movimento modelado de um ônibus

Velocidade modelada (m/s)		Distância percorrida modelada (m)
$v(t + dt)$		$d(t + dt) = d(t) + v(t) \cdot [t2 - t1]$
$= b_n \times T + \sqrt{b_n^2 \times T^2 - b_n \times \{2 \times [x_{atvo} - x_n(t)] - v_n(t) \times T\}}$		
	7,60	0,25
	7,15	0,49
	7,09	0,73
	7,09	0,96
	7,03	1,19
	6,95	1,43
	6,89	1,66
	6,83	1,88
	6,82	2,11
	6,76	2,34
	6,74	2,35

Gipps (1980) cita que é desejável que o intervalo entre sucessivos recálculos de aceleração, desaceleração, velocidade e distância seja uma fração do tempo de reação para que não seja

necessário o armazenamento de uma quantidade grande de dados históricos. Ou seja, considerando uma série onde as atualizações de cálculo sejam feitas a cada 33 milissegundos e o tempo de reação do motorista seja de um segundo, quando o motorista reage ao movimento do veículo à sua frente no instante $d(t + T)$, ele deve ter consciência das informações de um segundo atrás, em $d(t)$, conforme é possível perceber na equação de Gipps, e não consegue perceber o movimento do veículo líder nos milésimos de segundo contidos nesse intervalo de um segundo. No caso do uso deste modelo para definir a desaceleração de um ônibus que se aproxima e para em uma estação, o motorista tem sempre a consciência de que o ponto onde ele deve parar não muda de posição ao longo do tempo, ou seja, é estático. A diferença de valores entre a atualização dos cálculos de desaceleração e o tempo de reação apenas é válido, pois o ponto “seguido” pelos veículos está parado.

5.4.3 Resultados

Os valores de aceleração máxima e desaceleração máxima de todos os veículos analisados, estimados a partir do procedimento descrito, são apresentados no Apêndice B. Os valores de velocidade desejada resultantes das estimativas foram considerados dados intermediários, isto é, supõe-se que a velocidade desejada por todos os veículos será sempre de 16,67 m/s (ou 60 km/h) a qual é a velocidade limite do corredor, mas nas filmagens nem sempre foi possível captar o trajeto do veículo até atingir a velocidade cruzeiro. Sendo assim, foi realizado o cálculo do tempo que cada veículo leva para chegar à velocidade de 16,67 m/s.

A tabela 10 mostra as médias e desvios padrão das taxas de aceleração máxima para cada nível de ocupação do ônibus e também os tempos médios e desvios padrão para os veículos atingirem 60 km/h. Nestes dados é possível observar que a taxa média de aceleração tende a diminuir conforme o ônibus se torna mais ocupado por passageiros. Da mesma forma, os ônibus precisam de mais tempo para alcançar a velocidade desejada quando muito carregados.

A figura 25 também evidencia o decréscimo da aceleração conforme o carregamento, mesmo apresentando uma considerável variabilidade entre as taxas dentro dos grupos. Por ser um parâmetro bastante sensível, a taxa de aceleração tende a variar mesmo quando observadas diversas séries de um mesmo veículo. Apesar disso, nesta figura é possível

observas regiões de tendência nos dados, caracterizados por uma aglomeração maior de pontos no gráfico.

Tabela 10: médias e desvios padrão das taxas de aceleração e tempos para alcançar a velocidade cruzeiro

	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5
Aceleração (m/s ²)	1,07 (0,11)	0,94 (0,16)	0,92 (0,09)	0,81 (0,17)	0,80 (0,14)
Tempo para alcançar 60 km/h (s)	33 (7,49)	35 (7,00)	34 (3,60)	40 (7,74)	49 (16,74)

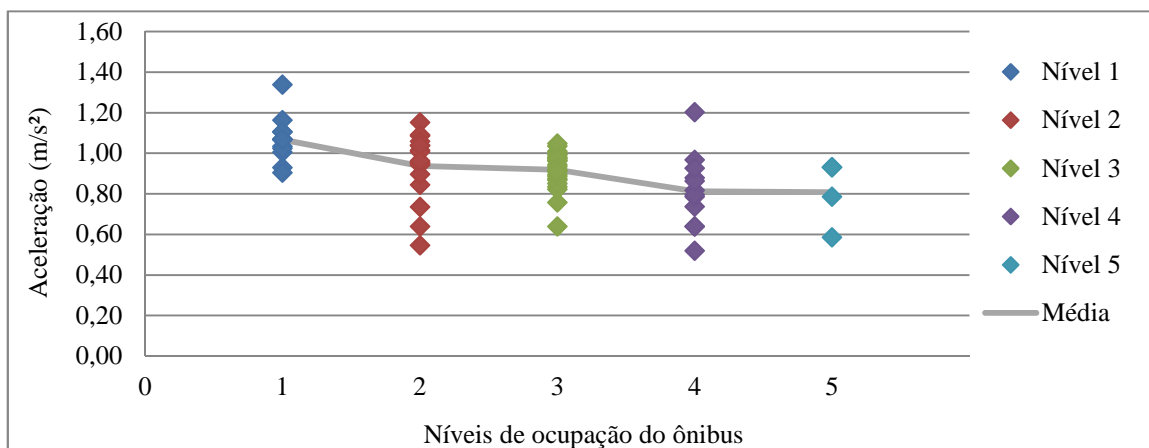


Figura 25: taxas de aceleração distribuídas entre os níveis de carregamento

Para todos os veículos, os dados de distância percorrida ao longo do tempo real e modelada foram comparados através de gráficos, a fim de verificar o ajustamento do modelo aos dados de campo. A figura 26 mostra um exemplo de gráfico dos dados, onde é possível perceber a variação da distância, da velocidade e da aceleração ao longo do tempo. Além disso, pode-se observar o instante em que o motorista realiza a mudança de marcha, entre quatro e seis segundos, onde ocorreu flutuações em acelerações e velocidades.

O ajustamento do modelo aos dados reais é mostrado na figura 27. Observa-se que o modelo não possui ajuste perfeito, em nível de distância percorrida, somente pela distorção causada pela troca de marcha. Todos os ônibus biarticulados de Curitiba possuem câmbio automático, mas, se ainda assim for possível suavizar a troca automática de marcha, o modelo apresentaria melhor ajuste.

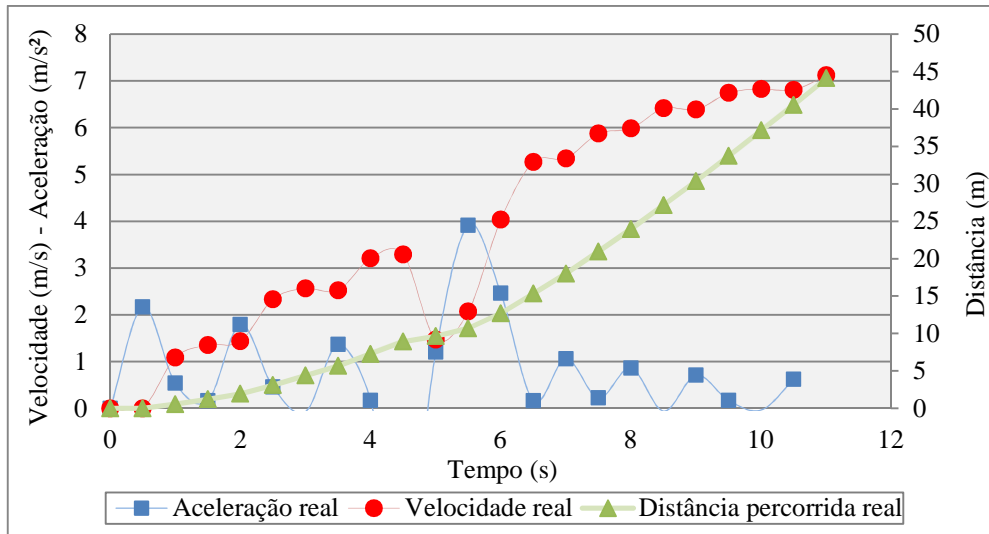


Figura 26: dados reais de aceleração, velocidade e distância percorrida

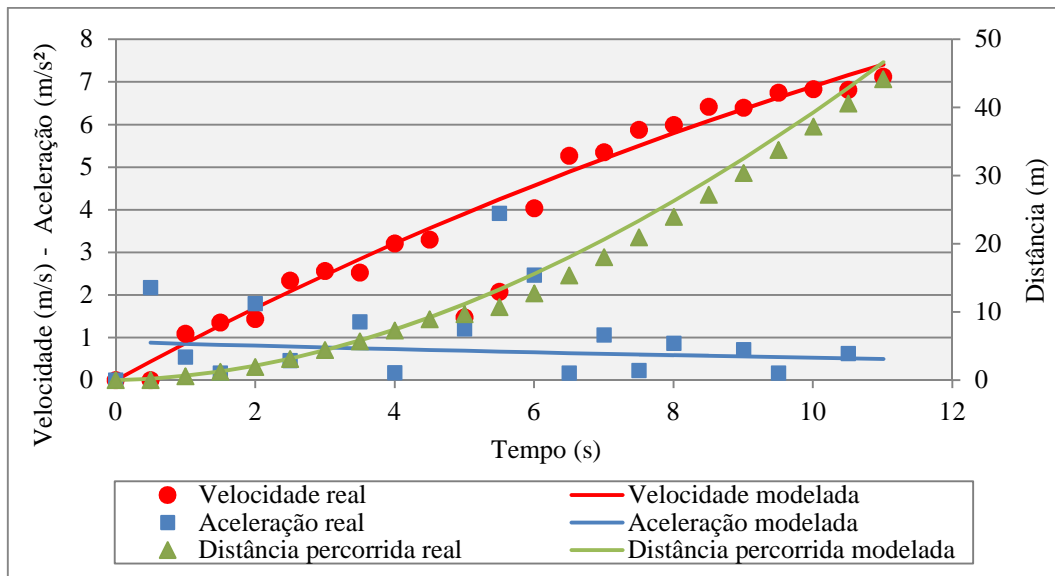


Figura 27: dados reais e modelados de aceleração, velocidade e distância percorrida

Do mesmo modo, a tabela 11 mostra as médias e desvios padrão das taxas de desaceleração máxima para cada nível de ocupação do ônibus, onde também é possível observar a tendência da taxa de desaceleração diminuir quando os veículos ficam mais carregados. Por outro lado, a figura 28 não mostra claramente agrupamentos de dados para todos os níveis, apresentando uma dispersão ligeiramente maior do que no caso das acelerações. Este fato é compreensível, pois na desaceleração o fator comportamento do motorista é maior uma vez que este possui mais controle sobre o veículo, diferentemente de quando acelera e está mais limitado às restrições do conjunto moto propulsor do ônibus.

Tabela 11: médias e desvios padrão das taxas de desaceleração

	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
Desaceleração (m/s ²)	1,80	1,58	1,44	1,29
	(0,52)	(0,78)	(0,63)	(0,52)

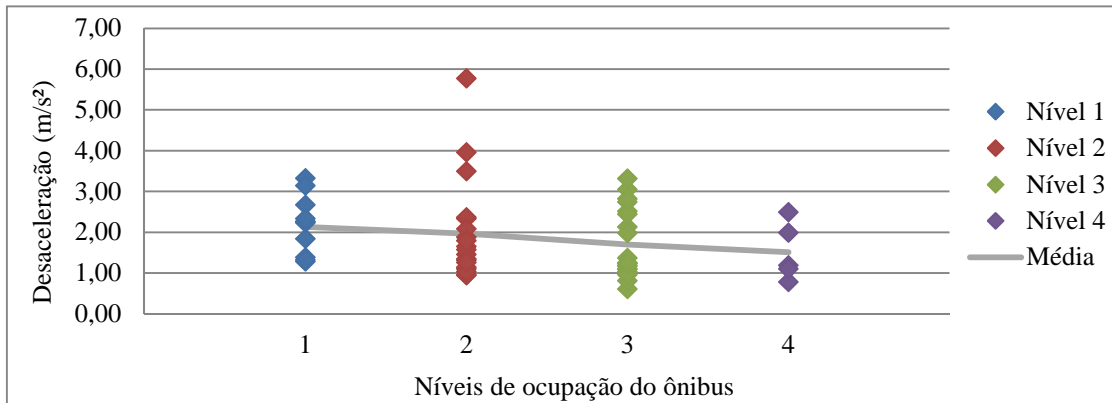


Figura 28: taxas de desaceleração distribuídas entre os níveis de carregamento

Para a desaceleração, também foram utilizados gráficos da distância percorrida ao longo do tempo para conferir o ajustamento do modelo. A figura 29 mostra um exemplo destes gráficos, mostrando variação da distância, da velocidade e da desaceleração ao longo do tempo. A linha da desaceleração modelada sofre pequenas turbulências possivelmente porque estes dados de desaceleração foram calculados a partir dos dados de velocidades ($\frac{\Delta v}{\Delta t}$) e não diretamente do modelo, como é o caso dos dados de aceleração.

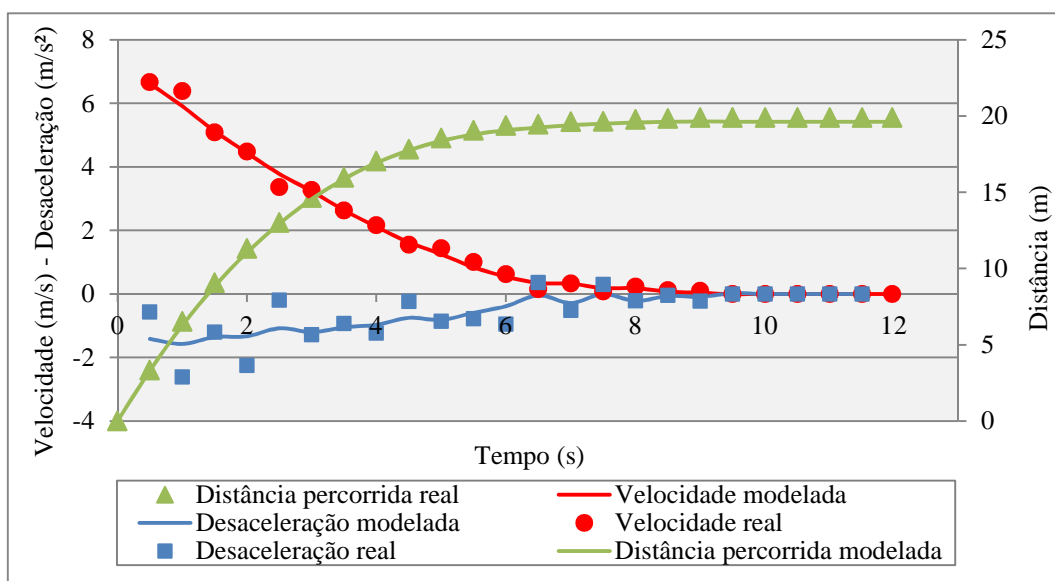


Figura 29: dados reais e modelados de desaceleração, velocidade e distância percorrida

5.5 RESUMO DAS ETAPAS DO MÉTODO

Esta seção apresenta o resumo das etapas do método de calibração. O fluxograma da figura 30 mostra as etapas que serão descritas a seguir:

- a) a coleta dos dados para a calibração foi realizada através da filmagem da aceleração e desaceleração dos ônibus de uma estação, localizada próxima a edificações altas onde a câmera pôde ser instalada e distante de interseções permitindo a aceleração livre do veículo, sem a interferência de semáforos;
- b) a câmera foi instalada em dois locais diferentes da mesma edificação, que permitiram boa visibilidade do trajeto do ônibus desde a estação, no caso das filmagens das acelerações, e até a estação, no caso das filmagens das desacelerações. Uma filmagem piloto foi realizada para a conferência da isenção de interferências como árvores, postes ou cabos de energia;
- c) os quatro pontos de referência escolhidos para a correção da paralaxe estavam contidos e bem visíveis no plano da filmagem. A distância entre os pontos foram medidas e anotadas;
- d) a aceleração e a desaceleração dos ônibus foram filmadas concomitantes ao registro da ocupação dos mesmos em uma planilha, realizada no nível da estação. Para relacionar os veículos registrados nas filmagens com aqueles registrados na planilha, foram utilizados dois relógios digitais perfeitamente sincronizados;
- e) as séries de distância percorrida pelos ônibus ao longo do tempo foram extraídas através do *software* de reconhecimento de imagem Kinovea, que identifica a trajetória do ônibus uma vez marcado o farol como ponto de referência;
- f) o ajuste das séries de distância coletadas em campo ao modelo foi realizado através do Solver do Excel®, minimizando as diferenças entre as duas séries de dados (real e modelada), variando, para isso, os valores de aceleração máxima, velocidade desejada e desaceleração máxima. A análise gráfica auxiliou a percepção da qualidade do ajuste dos dados;
- g) as acelerações e desacelerações máximas resultantes do ajuste dos dados reais aos modelados foram separadas de acordo com o nível de ocupação registrado para cada ônibus, resultando em valores médios e desvios padrão dessas taxas para todos os níveis de carregamento registrados.

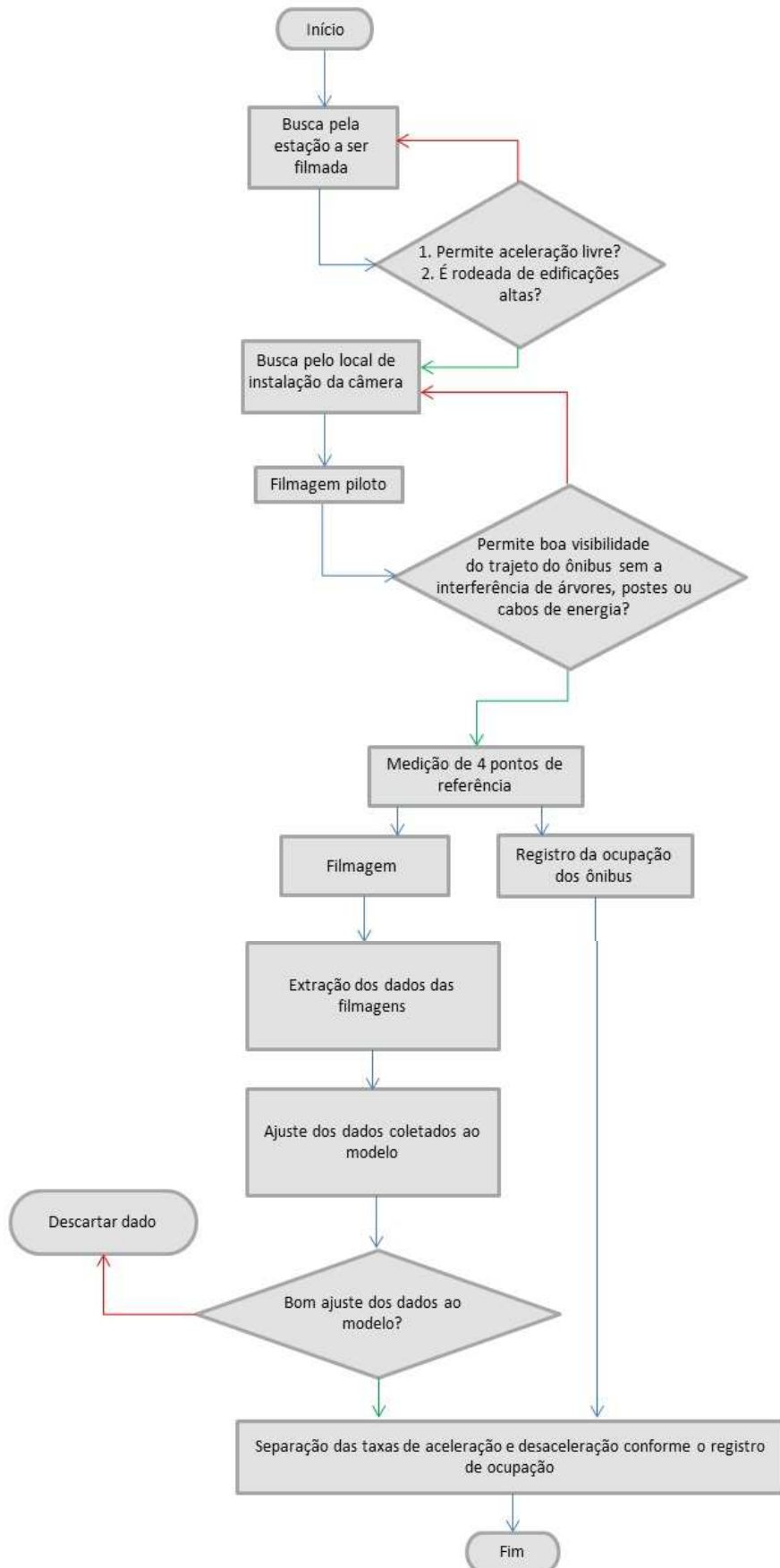


Figura 30: fluxograma do método de calibração

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo veículo seguidor de Gipps combinado ao modelo de aceleração linear foi calibrado utilizando dados de variação da distância percorrida por ônibus na chegada e na partida de estações. Os dados foram coletados na cidade de Curitiba, pioneira em sistemas BRT (Lindau et al., 2007), através da filmagem de uma estação escolhida a partir de requisitos pré-determinados. Os dados foram extraídos das filmagens com o auxílio de um *software* de reconhecimento de imagem e a paralaxe foi corrigida pelo método de coordenadas retangulares.

Tanto o modelo de Gipps quanto o modelo de aceleração linear mostraram comportamento satisfatório na replicação da aceleração e desaceleração dos ônibus das estações, apresentando bom ajustamento com os dados coletados. O método deve ser testado, ainda, para a replicação da operação de ônibus em comboio, para avaliar o comportamento do modelo de Gipps também nestas situações. Para isto, é necessária a elaboração de um plano de filmagem semelhante ao descrito neste trabalho, porém focando a movimentação de dois ou mais ônibus próximos e em linha.

A coleta de dados através de filmagens mostrou-se eficaz para o método. Além do baixo custo do processo, as câmeras filmadoras são equipamentos de fácil acesso e não necessitam especialistas para sua operação. As filmagens podem ser rodadas quantas vezes forem necessárias para a extração dos dados e reutilizados em pesquisas futuras.

O *software* de reconhecimento de imagem Kinovea foi utilizado para obter as séries de distância percorrida pelos ônibus filmados ao longo do tempo e, apesar de não ter sido elaborado para reconhecimento de veículos, atendeu às necessidades deste trabalho. Por ser uma ferramenta de livre acesso pela internet, alinha-se com o objetivo de elaboração de um método de calibração de baixo custo.

Os dados de saída do Kinovea foram posteriormente utilizados para a estimativa das taxas de aceleração e desaceleração criando, para isso, planilhas com dados detalhados de velocidade e aceleração de cada ônibus filmado ao longo do tempo. Estes dados foram ajustados aos modelos propostos no método e as taxas de aceleração e desaceleração foram estimadas para cada veículo. Por envolver longas planilhas de dados e pela necessidade de análise particular dos veículos, este processo pode ser tedioso uma vez que é necessário elaborar os cálculos de

maneira realista e coerente com a realidade, o que não é, todavia, trivial. Porém os cálculos realizados são facilmente resolvidos com o auxílio do Solver do Excel®.

A maior evidência da confiabilidade do método são os valores resultantes para as taxas de aceleração e desaceleração, cujas grandezas se aproximam bastante de valores encontrados na literatura conforme a tabela 12. Nenhum dos autores, no entanto, faz diferenciação entre o nível de ocupação do veículo, o que pode ser a razão da variabilidade dos valores referidos.

Tabela 12: dados de aceleração e desaceleração

Fonte	Aceleração máxima do ônibus (m/s ²)	Desaceleração do ônibus (m/s ²)
Espinosa e Coeymans (2008)	1,72	2,85
DNIT (2005)	0,90	-
Vuchic (2007)	0,70 a 0,90	-
Gonçalves (1995)	1,07	1,41
Hendrickson (1981)	1,12	1,12
Faixas de valores obtidos neste estudo	0,80 a 1,07	1,29 a 1,80

Segundo Vuchic (2007), veículos lotados alcançam 70% da aceleração atingida por veículos vazios. Com o método elaborado neste trabalho para a calibração do modelo de aceleração linear e os dados coletados em campo, os veículos com nível de ocupação cinco alcançam 75,69% da aceleração dos veículos com nível de ocupação um. Isto comprova que o carregamento do veículo é um fator crucial para considerar em simulações que envolvem ônibus.

6. CONCLUSÃO

Embora muitos modelos veículo seguidor sejam amplamente estudados ao longo de meio século, e apesar da expansão e evolução dos sistemas ônibus através de investimentos em corredores *busway* e BRT, poucas ainda são as referências de calibração para este modal. Modelos inicialmente criados para replicar o tráfego de automóveis podem apresentar bom comportamento para simular sistemas ônibus se devidamente calibrados. Este trabalho teve como objetivo principal elaborar um procedimento acessível para a calibração do modelo veículo seguidor de Gipps combinado ao modelo de aceleração linear para a replicação da operação de sistemas ônibus em corredores BRT.

Muitos modelos veículo seguidor foram elaborados desde meados do século XX. Alguns deles foram mais difundidos e utilizados nas ferramentas de simulação de tráfego conhecidas hoje. Os modelos de Gipps e psicofísico juntos representam quase 50% dos modelos utilizados em *softwares* de simulação de tráfego, sendo que dentre estes dois, a realização da calibração do modelo de Gipps é mais simples. A principal dificuldade, tanto na formulação dos modelos quanto na calibração deles, reside em generalizar o comportamento humano frente às questões do tráfego. Alguns modelos simplificam a conduta do motorista em demasia, resultando em modelos pouco eficazes, outros são muito complexos e tornam a calibração quase inexecutável.

As manobras realizadas pelos motoristas de ônibus apresentam algumas peculiaridades que devem ser levadas em consideração na calibração. Para observar como os modelos veículo seguidor se comportam frente a estas características, os modelos GHR e de Gipps foram testados analiticamente, através da análise de gráficos. Como resultado, comprovou-se que o modelo de Gipps adapta-se às manobras típicas do transporte por ônibus.

O modelo de Gipps foi calibrado com dados coletados no sistema BRT de Curitiba. A coleta de dados foi realizada através de filmagens da operação dos ônibus em uma estação, registrando a aceleração e desaceleração desses veículos. Este método de coleta de dados se mostrou efetivo para o objetivo do estudo, porque além de ser possível realiza-la a um baixo custo e sem a necessidade de treinamento de pessoas para a operação da filmadora, os filmes podem ser analisados quantas vezes forem necessárias, aumentando a confiabilidade da análise dos dados.

A extração das taxas de aceleração e desaceleração das filmagens através do *software* de reconhecimento de imagem Kinovea agregou à característica de baixo custo do método de calibração desenvolvido neste estudo. O *software* é obtido gratuitamente pela internet e permite o registro cerca de 30 dados de posição em um segundo de objetos móveis selecionados. Esse detalhamento de dados ao longo do tempo é importante na observação de taxas de aceleração e desaceleração, as quais variam em curtos intervalos de tempo.

Os dados obtidos na calibração foram as taxas de aceleração e desaceleração máximas e a velocidade desejada após partir da estação. Estas taxas foram divididas entre níveis de ocupação de um a cinco, sendo que os ônibus com ocupação de nível um são os mais vazios e os de nível cinco são os mais ocupados. Os resultados apresentaram uma variação esperada: quanto mais carregado o veículo, menor a taxa aplicada para acelerar ou desacelerar. Quando consideramos a velocidade desejada igual a limite da via (60 km/h), o tempo que os ônibus levam para atingir essa velocidade, dada a aceleração empregada, pode ser calculado, e tende a aumentar com o nível de ocupação do ônibus.

O modelo proposto pode ser adaptado para a análise da aceleração e desaceleração em diferentes inclinações da via e para a diferenciação do comportamento do motorista do ônibus entre a desaceleração perante um semáforo ou perante uma estação. Além disso, o modelo de Gipps deve ser calibrado para a replicação de tráfego de ônibus em comboios, realizando para isso, a filmagem de corredores em pontos fora das estações.

Com este trabalho comprovou-se que embora não exista um modelo que represente com perfeição os movimentos dos automóveis, tampouco dos ônibus, os modelos existentes se aproximam bastante de dados reais. Eles permitem, através de uma calibração adequada, que o tráfego nas grandes cidades seja estudado melhor e soluções podem ser encontradas sem que para isso sejam despendidas grandes quantidade de verba. E a existência de métodos de calibração simples e acessíveis é essencial para este processo.

REFERÊNCIAS

- ABNT. 2012. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Disponível em <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=6261>>. Acesso em 27 dez. 2012.
- BLEYL, R. L. **Traffic analysis of time lapse photographs without employing a perspective grid.** Traffic Engineering, p. 29-31. 1972.
- BRACKSTONE, M.; MCDONALD, M. **Car-following: a historical review.** Transportation Research Part. F. 2, p. 181-196. 2000.
- BRASIL. 1997. Código de Transito Brasileiro. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/ccivil/leis/19503.htm>>. Acesso em 16 out. 2011.
- CASIMIR. 2011. **Computer Aided Simulation Model for Instream Flow Requirements.** Disponível em <http://www.casimir-software.de/index_eng.html>. Acesso em 16 out. 2011.
- CHANDLER, R. E.; HERMAN, R.; MONTROLL, E. W. **Traffic dynamics: studies in car-following.** Operations Research, v 6, p. 165-184. 1958.
- CHANG, K.; CHON, K. **A car-following model applied reaction times distribution and perceptual threshold.** Journal of the Eastern Asia Society for Transportations Studies, v 6, p. 1888-1903. 2005.
- COLELLA, D. A. T.; LIMA, E. P.; DEMARCHI, S. H. **Calibração e validação do modelo fluxo-velocidade do INTEGRATION para vias urbanas semaforizadas.** XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. ANPET. Florianópolis. 2004.
- DIJKER, T.; BOVY, P. H. L.; VERMIJS, R. G. M. M. **Car-following under non-congested and congested conditions.** Delf University of Technology. 1997.
- ESPINOSA, C.; COEYMANS, J. E. **Calibración de parámetros de transporte público em tráfico mixto para modelos micro: GETRAM en Santiago.** Actas XV Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte. Universidad del Norte, Cartagena de Indias, Colombia, 14-17 de Septiembre. 2008.
- FRITZSCHE, H-T. **A model for traffic simulation.** Transportation Engineering Contribution 5: 317–321. 1994.
- GIPPS, P. G. **A behavior car-following model for computer simulation.** Transportation Research, B v. 15, p. 105-111. 1980.
- HOOGENDOORN, S. P.; VAN ZUYLEN, H. J.; SCHREUDER, M.; GORTE, B.; VOSSelman, G. **Microscopic Traffic Data Collection by Remote Sensing.** TRB 2003 Annual Meeting. 2003.
- KINOVEA. 2012. Disponível em <<http://www.kinovea.org>>. Acesso em 28 jan. 2012.

LEUTZBACH, W.; WIEDEMANN, R. **Development and applications of traffic simulation models at the Karlsruhe Institut fur Verkehrswesen.** Traffic Engineering and Control. p. 270-278. May, 1986.

LINDAU, L. A. **High-flow bus operation on urban arterial roads.** Dissertação (Doutorado em Transportes) - University of Southampton, Southampton, Inglaterra. 1983.

LINDAU, L. A.; HIDALGO, D.; FACCHINI D. **Curitiba, the Cradle of Bus Rapid Transit.** Built Environment. v. 36, n. 3. 2007.

LIU, R. **Dracula microscopic traffic simulator.** White Rose University Consortium. Institute of Transportation Studies, University of Leeds. Working paper 431. 1994.

MACIEJEWSKI, M. **A comparison of microscopic traffic flow simulation systems for urban area.** Institute of machines and motor vehicles. Poznan University of Technology. Transport Problems, v. 5, issue 4, Poland. 2010.

MCDONALD, M.; WU, J.; BRACKSTONE, M. **Development of a fuzzy logic based microscopic motorway simulation model.** Proc. of ITSSC97, Boston, reproduced by permission of IEEE. 1997.

NICOLAI, J; SILVA, P.; SANTOS, A. C.; ROTHEN, M. **Sistema de transporte coletivo urbano por ônibus – planejamento e operação.** Diretoria de desenvolvimento. Departamento de sistemas de trânsito e transporte. Mercedes-Benz do Brasil S.A. 1987.

OLIVEIRA, M. L.; CYBIS, H. B. B. **Revisão da experiência de calibração do software VISSIM aplicado a um estudo de caso de autoestrada brasileira.** VIII Seprosul – Semana de Engenharia de Produção Sul-Americana. Bento Gonçalves, Brasil. 2008.

OLSTAM, J. J.; TAPANI, A. **Comparison of car-following models.** Swedish National Road and Transport Research Institute. VTI meddelande 960A. 2004.

PANWAI, S.; DIA, H. **Comparative evaluation of microscopic car-following behavior.** IEEE Transactions on intelligent Transportation Systems, v. 6, n. 3, Australia. 2005.

QUELCH, G. **Lincoln Tunnel exclusive bus lane enhancement study: preparing for tomorrow's transportation needs today.** The Port Authority of NY and NJ. New York. 2005.

RAKHA, H.; CROWTHER, B. **Comparison of Greenshields, Pipes, and Van Aerde car-following and traffic stream models.** Transportation Research Record n. 1802. Washington, DC. 2002.

RAKHA, H.; GAO, Y. **Calibration of steady-state car-following models using macroscopic loop detector data.** TRB Transportation Research Electronic Circular E-C149: 75 Years of the Fundamental Diagram for Traffic Flow Theory: Greenshields Symposium. p. 178-198. Washington, DC. 2011.

ROCHA, F. A. M. **Inteligência artificial: noções gerais.** Visual Books, Florianópolis. 2003.

ROTHERY, R. W. **Car following models**: revised monograph on traffic flow theory. Update and expansion of the Transportation Research Board (TRB) Special Report 165. Disponível em <<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/tft/>>. Acesso em 29 set 2011. 1992.

SILVA, P. C. M. **Engenharia de tráfego: teoria do fluxo de tráfego**. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Área de Transportes. Brasília, DF. 1994.

SMARTBRT TEAM. **SmartBRT Model Report**. California PATH. UC Berkeley. 2004.

SMARTTEST. 2000. Final Report for Publication. ITS, University of Leeds (GB). Disponível em <<http://www.its.leeds.ac.uk/projects/smartest/>>. Acesso em 16 out. 2011.

SOLA, S. M. **Modelo de simulação de tráfego urbano UTSC-1**. Companhia de Engenharia de Tráfego – CET. Notas técnicas. SP 24/11/79. NT 049/79. 1979.

TRB. **National Cooperative Highway Research Program**. Report 535. Predicting air quality effects of traffic-flow improvements: final report and user's guide. p. 82. 2004.

UFRGS. 2012. **Laboratório de medições mecânicas**. Grupo de mecânica aplicada. Disponível em <<http://www.pgie.ufrgs.br/portalead/nucleo/HPLMM/>>. Acesso em 27 dez. 2012.

VASQUEZ, B. 2012. **Reconhecimento de Imagens**. OP Services. Disponível em <<https://www.opservices.com.br/pt-br/blogs/Reconhecimento-de-Imagens>>. Acesso em 27 dez. 2012.

VUCHIC, V. R. **Urban transit: systems and technology**. John Wiley e Sons, Inc. Hoboken, New Jersey. 2007.

WRIGHT, L.; HOOK, W. **Manual de BRT – Bus Rapid Transit – Guia de Planejamento**. Brasília: Institute for Transportation & Development Policy; Brasil, Ministério das Cidades. 2008.

YU, L.; CHEN, X.; WAN, T.; GUO, J. **Calibration of VISSIM for Bus Rapid Transit systems in Beijing using GPS data**. *Journal of Public Transportation*. v. 9, n. 3. Special edition: BRT. National Center for Transit Research. University of South Florida. 2006.

ZHANG, Y. **Scalability of car-following and lane-changing models in microscopic traffic simulation system**. Master degree of Science in Civil Engineering. Louisiana State University. 2004.

APÊNDICE A – Procedimento de coleta de dados

MÉTODO DE FILMAGEM PARA EXTRAÇÃO DE TAXAS MÁXIMAS DE ACELERAÇÃO E DESACELERAÇÃO DE ÔNIBUS

As taxas de aceleração e desaceleração dos ônibus são de grande importância para a precisão da simulação. Este documento descreve o método de coleta destas taxas através da filmagem da operação dos ônibus próximo a uma estação.

1. EQUIPAMENTOS

- a) câmera filmadora com tripé (não utilizar lentes angulares, ou seja, que aumentam a cobertura da imagem, para não distorcer o plano filmado e impossibilitar a correção da paralaxe);
- b) planilha organizada para registrar a ocupação dos ônibus;
- c) caneta para anotações;
- d) dois relógios digitais sincronizados, um para quem filma e outro para quem registra a ocupação dos ônibus.

2. EQUIPE

- a) uma pessoa na filmagem;
- b) uma pessoa para registrar a ocupação dos ônibus.

3. PROVIDÊNCIAS PRÉ-FILMAGEM

- a) esvaziar os cartões de memória das máquinas;
- b) carregar completamente as baterias;
- c) ajustar a qualidade de filmagem nas máquinas.

4. PROCEDIMENTO

A primeira etapa consiste na busca pelo local de filmagem. A estação deve estar rodeada de edificações altas e, preferencialmente, afastada de intercessões semaforizadas, permitindo a

aceleração livre de obstáculos, como um semáforo vermelho. Este processo pode ser realizado através do Google Earth®.

A câmera deve ser alocada no terraço ou andares altos das edificações que cercam a estação selecionada. A altura é importante para que sejam executados filmes com maior alcance do corredor e para que a paralaxe do plano do vídeo seja a menor possível. É importante também que apareça nas filmagens o trajeto do ônibus desde a saída da estação até aproximadamente 40 metros depois da estação (ou antes, no caso da chegada). A figura APA1 mostra um bom ângulo de filmagem. Tendo a câmera instalada, uma filmagem piloto deve ser realizada a fim de verificar o zoom apropriado.

Cuidados a serem tomados na escolha do local:

- a) não podem existir elementos no vídeo que interfiram a visão da trajetória do ônibus, como exemplifica a figura APA2;
- b) caso uma estação seja seguida de semáforo, indicar no campo de visão da câmera a abertura e o fechamento do semáforo.



Figura APA1: ângulo de filmagem

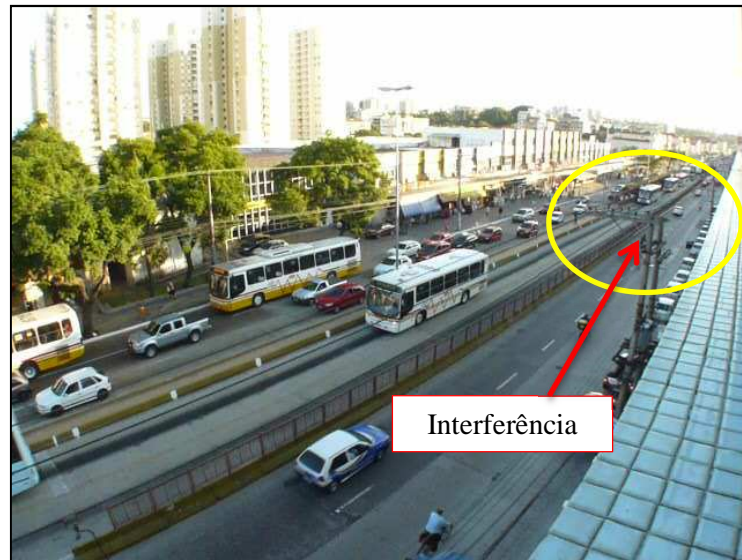


Figura APA2: poste da rede elétrica prejudicando a extração da trajetória do ônibus

A etapa seguinte compreende a realização das filmagens e o concomitante registro da ocupação dos ônibus.

É necessária a realização de duas filmagens, ambas com duração aproximada de duas horas:

- a) uma filmagem para a observação da saída dos ônibus da estação (registro da aceleração);
- b) uma filmagem para a observação da chegada dos ônibus na estação (registro da desaceleração).

Durante a filmagem, a identificação do carregamento dos veículos é realizada por uma pessoa no nível da estação, conforme os níveis visuais da figura APA3 (Nicolai et al., 1987).. Este dado será necessário para diferenciar as taxas conforme o carregamento do veículo.

Esta pessoa deve se posicionar em relação à estação conforme o objetivo do filme que está sendo executado (figura APA4):

- a) antes da estação (montante) no caso da desaceleração;
- b) depois da estação (jusante) no caso da aceleração.

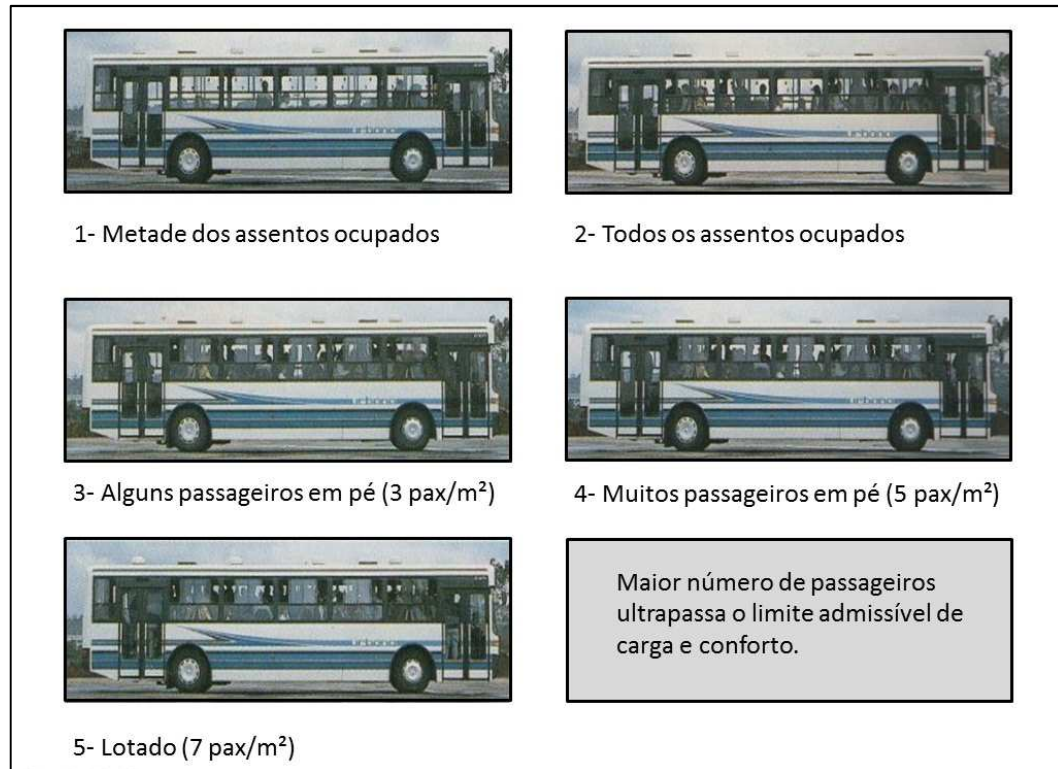


Figura APA3: níveis de lotação do ônibus

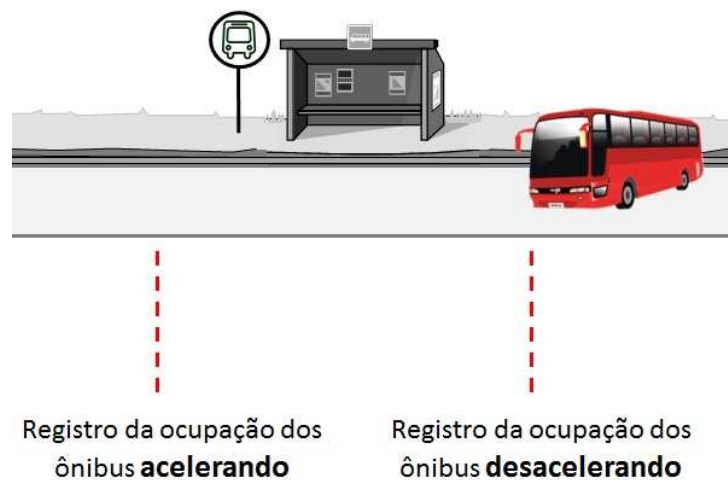


Figura APA4: posicionamento para registro da ocupação do ônibus

É necessário identificar os ônibus referidos na análise de ocupação com a ordem em que aparecem no vídeo, sincronizando, por exemplo, dois relógios digitais: um para a pessoa encarregada de analisar o carregamento e outro para a pessoa responsável pela câmera, a qual mostrará o relógio no campo de visão da filmagem em determinados momentos (figura APA5).

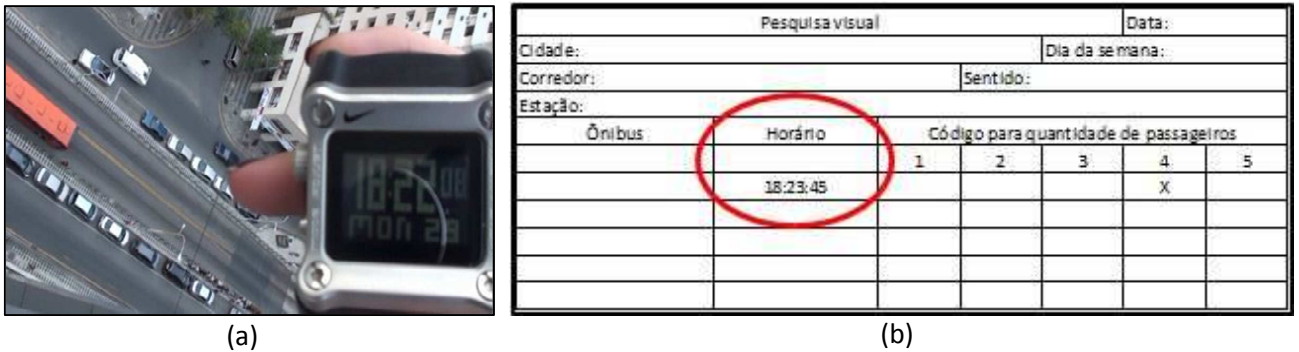


Figura APA5: sincronização entre os ônibus (a) das filmagens e (b) das planilhas de registro de ocupação

É desejável obter amostras de todos os níveis de carregamento. Se não for possível observar ônibus de baixa ocupação na hora pico, será necessário realizar também uma filmagem fora da hora pico.

APÊNDICE B – Dados de aceleração e desaceleração máximas

Tabela APB1: dados de aceleração

Nível de ocupação do ônibus	Aceleração máxima (m/s ²)	Tempo para alcançar 60 km/h (s)
1	1,00	30
1	1,07	28
1	1,34	23
1	0,93	33
1	1,03	29
1	1,16	40
1	0,90	33
1	1,11	38
1	1,02	30
1	1,07	29
1	1,10	28
1	1,07	53
2	1,09	28
2	0,95	31
2	0,64	45
2	1,15	39
2	1,09	32
2	1,06	29
2	0,84	35
2	1,01	30
2	1,04	29
2	0,73	40
2	1,01	30
2	0,95	31
2	0,94	48
2	1,04	37
2	0,55	52
2	0,90	33
2	0,96	31

Tabela APB2: dados de aceleração

Nível de ocupação do ônibus	Aceleração máxima (m/s ²)	Tempo para alcançar 60 km/h (s)
3	0,87	34
3	0,96	31
3	0,89	33
3	1,00	30
3	0,76	39
3	0,98	31
3	0,99	30
3	0,92	33
3	0,97	31
3	1,01	30
3	0,87	35
3	0,83	36
3	0,96	31
3	0,82	36
3	0,92	33
3	0,85	35
3	0,99	35
3	0,94	32
3	1,03	41
3	0,98	31
3	0,93	32
3	0,64	45
3	1,05	30
3	0,89	34
3	0,91	33
4	0,97	31
4	0,74	40
4	0,88	34
4	0,64	46
4	0,79	38
4	0,82	37
4	0,79	37
4	0,52	55
4	1,20	51
4	0,86	35
4	0,64	45
4	0,93	32
5	0,79	76
5	0,93	35
5	0,93	35
5	0,59	49

Tabela APB3: dados de desaceleração

Nível de ocupação do ônibus	Desaceleração máxima (m/s ²)
1	1,38
1	1,28
1	3,32
1	1,84
1	2,67
1	1,32
1	2,26
1	3,14
1	2,23
1	2,25
1	2,33
1	1,54
1	2,13
2	2,33
2	2,36
2	3,96
2	1,88
2	1,65
2	1,1
2	5,77
2	0,94
2	0,95
2	3,49
2	1,57
2	1,45
2	1,34
2	1,14
2	2,08
2	1,31
2	1,03
2	1,26
2	1,79

*Os dados destacados foram desconsiderados por mau ajustamento do modelo aos dados reais.

Tabela APB4: dados de desaceleração

Nível de ocupação do ônibus	Desaceleração máxima (m/s ²)
3	1,19
3	2,74
3	2,13
3	3,05
3	2,51
3	0,61
3	1,24
3	1,09
3	1,03
3	2,44
3	2,82
3	3,31
3	1,98
3	1,37
3	1,24
3	0,81
3	1,09
3	1,16
3	0,96
3	1,23
4	0,78
4	1,19
4	1,99
4	2,49
4	1,1

*Os dados destacados foram desconsiderados por mau ajustamento do modelo aos dados reais.