



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

WANDERSON HUGUES DE VASCONCELOS PEDROSA

**ANÁLISE DO TEMPO DE RESPOSTA DOS MOTORISTAS NA FLUIDEZ DO
TRÁFEGO DE INTERSEÇÕES SEMAFORIZADAS MICROSSIMULADAS**

FORTALEZA

2025

WANDERSON HUGUES DE VASCONCELOS PEDROSA

**ANÁLISE DO TEMPO DE RESPOSTA DOS MOTORISTAS NA FLUIDEZ DO
TRÁFEGO DE INTERSEÇÕES SEMAFORIZADAS MICROSSIMULADAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes.

Orientador: Prof. Ph.D. Manoel Mendonça de Castro Neto.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P414a Pedrosa, Wanderson Hugues de Vasconcelos.

Análise do tempo de resposta dos motoristas na fluidez do tráfego de interseções semaforizadas microssimuladas / Wanderson Hugues de Vasconcelos Pedrosa. – 2025.
56 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2025.
Orientação: Prof. Dr. Manoel Mendonça de Castro Neto.

1. Tempo de resposta. 2. Interseções semaforizadas. 3. Microssimulação. 4. Aimsun. 5. Vissim. I. Título.
CDD 388

WANDERSON HUGUES DE VASCONCELOS PEDROSA

**ANÁLISE DO TEMPO DE RESPOSTA DOS MOTORISTAS NA FLUIDEZ DO
TRÁFEGO DE INTERSECÕES SEMAFORIZADAS MICROSSIMULADAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes.

Aprovada em:29/11/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ph.D. Manoel Mendonça de Castro Neto (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Ph.D. Francisco Moraes de Oliveira Neto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Rodrigo Castelan Carlson
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao Prof. Dr. Manoel Mendonça de Castro Neto, pela excelente orientação.

Aos professores participantes da Banca examinadora, Francisco Moraes de Oliveira Neto e Rodrigo Castelan Carlson, pelo tempo pelas valiosas colaborações e sugestões.

À minha mãe Denise, minha irmã Krislane, meu falecido avô Fernando Ribeiro, meus tios Ana Claudia e Breno e minha namorada Ana Talyta pelo apoio nessa fase nada fácil da minha vida.

Aos colegas da turma de mestrado e da graduação que mantive contato, Alexandre, Brenda e Gabriela, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

RESUMO

Interseções semaforizadas são pontos críticos da infraestrutura viária, frequentemente sujeitos a congestionamentos e acidentes devido às limitações de capacidade e aos conflitos de tráfego. O tempo de resposta (TR) dos motoristas, especialmente quando elevado, é uma variável comportamental que afeta o desempenho do tráfego nesses locais, contribuindo para o aumento dos atrasos e para a redução da capacidade viária. O objetivo deste trabalho foi modelar e analisar o impacto do TR dos motoristas na fluidez do tráfego de interseções semaforizadas, utilizando os softwares de microssimulação AIMSUN e VISSIM. O método empregado envolveu a coleta de dados de TR e de *headways* em uma interseção na cidade de Fortaleza, a modelagem da distribuição de probabilidade do TR observado (TR_{obs}) e sua implementação nos simuladores. Diversos cenários foram simulados, variando a demanda de veículos, assim como a frequência e a duração do TR, com o intuito de avaliar os seus impactos no atraso médio, no fluxo de saturação e na capacidade das aproximações semaforizadas. Os resultados mostraram que a distribuição log-normal foi a que melhor se ajustou dados de TR. A modelagem probabilística do TR nos simuladores mostrou que o TR do primeiro veículo da fila (TR_1) foi maior do que para os demais veículos em fila. A inserção da modelagem probabilística do TR aumentou os atrasos e reduziu a capacidade quando comparado ao modelo com os valores padrão, em especial no software AIMSUN. Os cenários em que o TR foi deliberadamente elevado nos primeiros veículos da fila tiveram os maiores atrasos e as menores capacidades. O estudo aponta que a modelagem probabilística do TR afeta a fluidez de interseções semafóricas microssimuladas especialmente em condições de tráfego mais saturado.

Palavras-chave: tempo de resposta; interseções semaforizadas; microssimulação; Aimsun; Vissim.

ABSTRACT

Signalized intersections are critical points in road infrastructure, often prone to congestion and accidents due to capacity limitations and traffic conflicts. Driver reaction time (RT), particularly when elevated, is a behavioral variable that affects traffic performance at these locations, contributing to increased delays and reduced road capacity. This study aims to model and analyze the impact of driver RT on the traffic flow at signalized intersections using the microscopic simulation software AIMSUN and VISSIM. The methodology involved collecting RT and headway data at an intersection in Fortaleza, modeling the probability distribution of the observed RT (RT_{obs}), and implementing it in the simulation tools. Multiple scenarios were simulated, varying vehicle demand as well as the frequency and duration of RT, to evaluate their effects on average delay, saturation flow, and approach capacity. Results indicated that the log-normal distribution provided the best fit for RT data. The probabilistic modeling of RT showed that the first vehicle's RT (RT₁) in the queue was higher than that of the following vehicles. Incorporating probabilistic RT into the simulation increased delays and reduced capacity compared to the default model settings, particularly in AIMSUN. Scenarios where RT was deliberately elevated for the first vehicles in the queue exhibited the highest delays and lowest capacities. The study highlights that probabilistic modeling of RT significantly affects the flow efficiency of microsimulated signalized intersections, especially under saturated traffic conditions.

Keywords: reaction time; signalized intersections; microscopic simulation; Aimsun; Vissim.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Frequência e valores de TR elevado de Fontes et al (2022)	20
Tabela 2	– Resumo dos estudos de tempo de resposta nos últimos 20 anos	21
Tabela 3	– Cenários do TRprob no AIMSUN	27
Tabela 4	– Cenários do TRprob no VISSIM	29
Tabela 5	– Cenários de TR elevado, aplicado a um veículo a cada 3 ciclos semafóricos.	31
Tabela 6	– Testes de aderência para TR1	33
Tabela 7	– Testes de aderência para TR	33
Tabela 8	– Comparação dos atrasos entre cenários p/ fluxo de 1.380 veic/hora no AIMSUN.....	37
Tabela 9	– Comparação dos atrasos entre cenários p/ fluxo de 1.780 veic/hora no AIMSUN.....	37
Tabela 10	– Comparação dos atrasos entre cenários p/ fluxo de 2.180 veic/hora no AIMSUN.....	38
Tabela 11	– Comparação dos valores de capacidade por cenário no AIMSUN.....	39
Tabela 12	– Comparação dos valores de fluxo de saturação por cenário no AIMSUN.....	40
Tabela 13	– Comparação dos valores de atraso por cenário p/ fluxo de 1380 veic/hora no VISSIM	42
Tabela 14	– Comparação dos atrasos por cenário p/ fluxo de 1780 veic/h no VISSIM.....	42
Tabela 15	– Comparação dos atrasos por cenário p/ fluxo de 2180 veic/hora no VISSIM.....	42
Tabela 16	– Comparação das capacidades por cenário no VISSIM	44
Tabela 17	– Comparação dos valores de fluxo de saturação por cenário no VISSIM.....	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Relação entre tempo de resposta e fluxo de saturação	16
Figura 2	– Filmagem da Interseção entre Av. Humberto Monte x Av. Jovita Feitosa.....	23
Figura 3	– Passos metodológicos.....	24
Figura 4	– Exemplo da interface do RUBA.....	25
Figura 5	– Exemplo de arquivo de saída do RUBA.....	25
Figura 6	– Layout de implementação no AIMSUN	26
Figura 7	– Rede adotada no AIMSUN	28
Figura 8	– Rede construída no VISSIM	29
Figura 9	– Saída de headways do AIMSUN	32
Figura 10	– Comparaçao entre as distribuições estatísticas de TR1	34
Figura 11	– Comparaçao entre as distribuições estatísticas de TR	34
Figura 12	– Comparaçao TR1obs x Distribuição log-normal	33
Figura 13	– Comparaçao TRobs x Distribuição log-normal	33
Figura 14	– Compilado de resultados de desempenho do AIMSUN	36
Figura 15	– Capacidade e Fluxo de Saturação - AIMSUN	39
Figura 16	– Headway médio por posição - AIMSUN.....	40
Figura 17	– Compilado de resultados de desempenho do VISSIM	41
Figura 18	– Capacidade e Fluxo de saturação por cenário- VISSIM.....	43
Figura 19	– Linhas de Tendência HEADWAY x TR, por posição - VISSIM	45
Figura 20	– Coeficientes Angulares Headway x TR – Cenário 3	45
Figura 21	– Comparaçao Headways Cenário 1 x Cenário 3, no VISSIM.....	46
Figura 22	– Headway de descarga médio por posição - VISSIM	47
Figura 23	– Comparaçao resultados VISSIM x AIMSUN (1380veic/h)	48
Figura 24	– Comparaçao resultados VISSIM x AIMSUN (1780veic/h)	49
Figura 25	– Comparaçao resultados VISSIM x AIMSUN (2180veic/h)	49
Figura 26	– Comparaçao resultados VISSIM x AIMSUN (Capacidade)	51
Figura 27	– Comparaçao resultados VISSIM x AIMSUN (Fluxo de saturação)...	51
Figura 28	– Atrasos por TR elevado, por posição na fila.....	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Problema e questões de pesquisa.....	13
1.2	Objetivos.....	13
1.3	Estrutura da dissertação	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Fluxo do tráfego em Interseções Semaforizadas.....	15
2.1.1	<i>Headway e fluxo de saturação.....</i>	15
2.1.2	<i>Tempo de resposta.....</i>	16
2.2	Modelagem do TR no VISSIM.....	21
2.3	Modelagem do TR no AIMSUN.....	22
3	MÉTODO	23
3.1	Coleta dos TRobs e headway	24
3.2	Modelagem estatística do TR.....	26
3.3	Implementação do modelo do TRprob no AIMSUN.....	26
3.4	Implementação do modelo do TRprob no VISSIM.....	28
3.4.1	<i>Implementação de TR elevado no VISSIM</i>	30
3.5	Impacto do TRprob e do TR elevado no Tráfego.....	30
4	RESULTADOS	33
4.1	Modelagem estatística do TR.....	33
4.2	Impacto do TRprob no tráfego simulado	36
4.2.1	<i>Impacto do TRprob no AIMSUN.....</i>	36
4.2.1.1	Atraso no AIMSUN.....	36
4.2.1.2	Capacidade e fluxo de saturação no AIMSUN.....	38
4.2.1.3	Headway de descarga no AIMSUN.....	40
4.2.2	<i>Impacto do TRprob no VISSIM.....</i>	41
4.2.2.1	Atraso no VISSIM	41
4.2.2.2	Capacidade e fluxo de saturação no VISSIM	43
4.2.2.3	Headway de descarga no VISSIM	44
4.2.3	<i>Diferenças dos resultados VISSIM x AIMSUN.....</i>	48
4.3	Impacto do TR elevado no Tráfego.....	52
5	CONCLUSÕES.....	53

1 INTRODUÇÃO

As interseções semaforizadas são componentes viários críticos para a gestão do tráfego urbano, frequentemente caracterizadas por alta concentração de veículos e potenciais pontos de conflito (Menendez et al., 2022). Essas interseções desempenham um papel essencial na mobilidade, especialmente em áreas urbanas densas, onde a demanda de tráfego e a capacidade de resposta dos sistemas são cruciais para evitar congestionamentos e minimizar acidentes. A operação eficiente em interseções é influenciada por diversos fatores, como a geometria da via, o tipo de veículos presentes e, principalmente, o comportamento dos motoristas (Rodrigues, 2007). Um desses comportamentos, o tempo de resposta (TR), é uma variável fundamental que influencia a fluidez e o desempenho do tráfego em interseções (Fontes, 2022).

O TR pode ser definido como o tempo que um motorista leva para reagir a um evento, como a mudança do sinal de vermelho para verde (Li et al., 2002). O TR é uma parcela dos headways dos veículos em fila, portanto afetam diretamente a fluidez do tráfego, daí surge a importância de seu estudo e modelagem. Embora o TR do primeiro veículo da fila (TR_1) tenha sido amplamente estudado na literatura, os impactos do TR ao longo de toda a fila de veículos permanecem menos explorados. O comportamento de reação dos motoristas é complexo, variando de acordo com a posição do veículo na fila, as condições do tráfego e o nível de atenção do condutor (Fontes, 2022).

Diante da crescente demanda por uma modelagem de tráfego mais realista, a presente pesquisa se propõe a analisar o efeito do TR na operação de interseções semaforizadas, utilizando modelos probabilísticos e simuladores de tráfego como o VISSIM e o AIMSUN, visando avaliar os impactos do TR nas medidas de desempenho, como atraso médio, capacidade e fluxo de saturação das interseções. O estudo inclui a coleta de dados empíricos em Fortaleza, Brasil, e a utilização de técnicas de processamento de imagens para a extração dos tempos de reação e *headways* dos motoristas. Além disso, foram aplicados testes estatísticos para modelar as distribuições de probabilidade que melhor representassem os dados observados.

A metodologia adotada é composta por várias etapas, incluindo a coleta de dados por meio de vídeos de interseções, a modelagem probabilística dos tempos de resposta e a implementação nos simuladores VISSIM e AIMSUN. Para simular as condições de tráfego, foram considerados diferentes cenários de demanda, variando de baixos a altos volumes veiculares. Os simuladores foram configurados para replicar a dinâmica real das interseções, com ciclos semafóricos específicos e diferentes configurações de TR. A abordagem permitiu

avaliar como o TR influencia o desempenho do tráfego e identificar diferenças na sensibilidade dos simuladores em relação a essa variável.

1.1 Problema e questões de pesquisa

A problemática tratada nesta dissertação consiste no efeito que os tempos de resposta dos motoristas podem ocasionar na modelagem do tráfego de interseções semaforizadas, com ênfase no impacto no atraso, no *headway* e na capacidade.

Nesse contexto, os pacotes computacionais de microssimulação são uma ferramenta importante, capaz de analisar os impactos de variáveis como o TR nas medidas de desempenho dos sistemas de transportes. Entretanto, no software VISSIM, o TR pode ser modelado por uma distribuição de probabilidade apenas para o primeiro veículo da fila (TR_1), quando especificada. Para os demais veículos da fila, o software não permite o usuário especificar os TRs por meio da edição direta dos parâmetros na interface gráfica. No software AIMSUN, pode-se atribuir valores probabilísticos tanto para o TR_1 quanto para o TR dos demais veículos em fila, embora o uso de distribuição probabilísticas para as duas variáveis, simultaneamente, seja trabalhosa, devido a interface do usuário, como será detalhado nas seções seguintes.

Essas diferenças nas abordagens podem causar diferenças na modelagem e nos resultados das simulações. Para este trabalho, pode-se evidenciar as seguintes questões de pesquisas:

1. Qual o impacto do TR_1 e do TR no tráfego de interseções semaforizadas?
2. Quais os efeitos da posição do veículo (na fila) no seu TR?
3. Qual o efeito do TR de um veículo no seu *headway*?
4. Qual o efeito do TR no atraso médio e na capacidade de interseções semaforizadas?
5. Como considerar essas modelagens nos microssimuladores e quais os impactos disso no desempenho operacional do tráfego modelado?

1.2 Objetivos

Ao responder às suas questões, esta pesquisa visa fornecer informações sobre a melhor modelagem do tempo de resposta, e por consequência, da fluidez do tráfego. Esta pesquisa de mestrado possui dois objetivos principais. O primeiro é analisar o efeito de se modelar o tempo de resposta (TR) dos motoristas seguindo uma distribuição de probabilidade na fluidez de

interseções semaforizadas microssimuladas. O segundo objetivo é analisar os efeitos da ocorrência de TR elevados, como os que ocorrem devido a distrações causadas pelo uso de smartphones quando motoristas aguardam o sinal verde. Para alcançar esses objetivos, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- 1 Estimar distribuições de probabilidade do TR na interseção estudada.
- 2 Modelar o efeito do TR no *headway*, considerando a posição do veículo na fila.
- 3 Analisar o efeito da modelagem probabilística do TR na fluidez do tráfego (atraso médio, fluxo de saturação e capacidade) em simulações microscópicas realizadas com o VISSIM e o AIMSUN.
- 4 Analisar o efeito de TRs elevados na fluidez do tráfego da interseção estudada.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta por: Introdução, apresentada neste capítulo 1; Revisão bibliográfica, apresentada no capítulo 2; Método empregado, detalhado no capítulo 3; Resultados obtidos, no capítulo 4 e as conclusões, apresentadas no capítulo 5.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nas análises de transporte, muito tem sido explorado quanto às características físicas da via e do tráfego, mas o comportamento dos motoristas se torna uma tarefa mais complexa devido a sua heterogeneidade em fatores como gênero, idade e tempo de reação (XIE *et al.*, 2020). Essa revisão se limita ao tempo de resposta (TR), definido como o tempo entre o início do sinal verde e o instante em que o primeiro veículo da fila inicia seu movimento, e, para os demais veículos em fila, é o tempo entre o início do movimento do veículo subsequente e o início do movimento do veículo logo atrás. Alguns estudos já avaliaram de diferentes maneiras. Segundo Murat e Cetin (2019), o TR exerce efeito significativo no fluxo de saturação das vias. Enquanto nas análises deste parâmetro, Nouzard *et al.* (2014) e Fitch *et al.* (2013) citaram a utilização de câmeras ou sensores de rastreamento ocular. Nouzard *et al.* (2014) ainda considerou a análise por meio de ferramentas computacionais, como os microssimuladores de tráfego.

Neste capítulo de revisão serão abordados os efeitos do TR na fluidez de interseções semaforizadas e a modelagem do TR utilizando os microssimuladores de tráfego VISSIM e AIMSUN.

2.1 Fluxo do tráfego em Interseções Semaforizadas

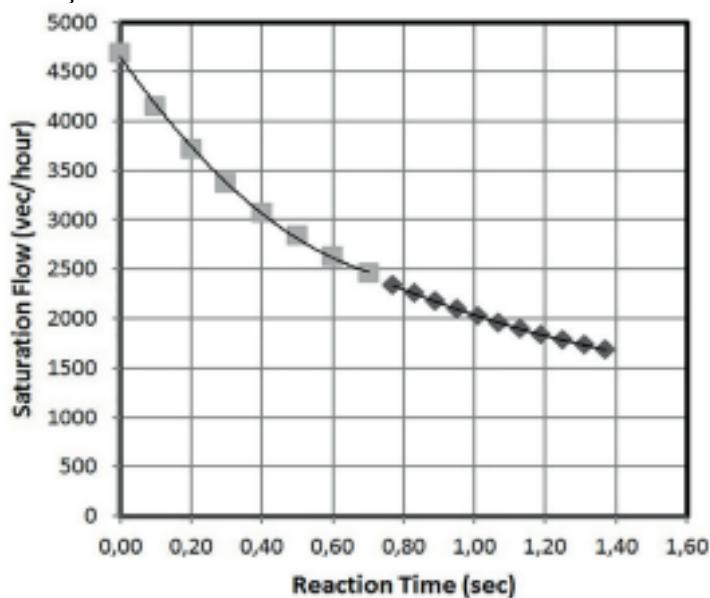
2.1.1 Headway e fluxo de saturação

Hurwitz *et al.* (2013) analisaram o impacto da distração no tempo perdido no início do estágio em uma interseção semaforizada, com objetivo de investigar se o headway médio dos primeiros cinco veículos da fila se alterava em caso de condutores com algum tipo de distração em relação a um grupo controle, sem distração. Em uma análise de 4.091 *headways* do grupo controle e 844 que sofreram distração, foi concluído que o headway médio dos motoristas distraídos foi 0,4 s maior que os daqueles que não sofreram distração. Na análise de Fontes *et al.* (2022), que verificou o impacto de TR elevados em cada posição da fila, o headway dos veículos só exerceu impacto significativo nos dois primeiros veículos da fila, sugerindo que foi devido ao curto espaço que possuíam para compensar o atraso causado pelo TR elevado.

Em outra pesquisa, Murat e Cetin (2019) buscaram introduzir uma nova perspectiva na estimativa do fluxo de saturação, reunindo características veiculares com fatores humanos. Eles representaram a relação entre o TR médio (no eixo X) e o fluxo de saturação médio (no

eixo Y), como mostrado na Figura 1, com os pontos mais escuros representando dados coletados em campo, e os mais claros sendo projeções de valores de fluxo de saturação para TR médios menores. Como conclusão, o TR foi o fator mais importante para o fluxo de saturação e, se fosse possível reduzir o TR médio para valores inferiores a 0,8 segundos com o uso de novas tecnologias, os fluxos de saturação poderiam ser superiores a 3.000 veíc/h.

Figura 1 - Relação entre tempo de resposta e fluxo de saturação



Fonte: Adaptado de Murat e Cetin (2019)

2.1.2 *Tempo de resposta*

Considerando as distribuições estatísticas encontradas nos estudos dos últimos 20 anos, Li e Prevedouros (2002) e Çaliskanelli e Tanyel (2016) analisaram o efeito do movimento de conversão no TR do primeiro veículo da fila (TR_1). Para os veículos que seguiram em frente, a hipótese nula que o TR_1 segue uma distribuição normal não foi rejeitada. Já para os veículos que realizaram conversão, a única distribuição que não foi rejeitada para o TR_1 foi a log-normal.

Li e Prevedouros (2002) conduziram uma análise do TR em uma interseção semafORIZADA no centro de Honolulu, Havaí, utilizando filmagens para registrar os movimentos dos veículos. O estudo focou em dois tipos de movimento: seguir em frente e conversão protegida à esquerda, avaliando variáveis como o headway de saturação, o tempo perdido no início do estágio e o TR_1 . Os valores médios de TR observados foram de 1,76 s para os veículos que seguiram em frente e 1,42 s para aqueles que realizaram conversão à esquerda.

A análise da diferença entre os valores de TR foi confirmada por meio de um teste t-Student, que indicou significância estatística para a diferença média entre os TRs dos dois tipos de movimento. Esses resultados são consistentes com os achados de Çaliskanelli e Tanyel (2018), que também observaram tempos de reação menores para manobras de conversão.

Li e Prevedouros(2002) também notaram que aproximadamente 1% dos motoristas que realizaram conversão à esquerda iniciaram o movimento antes mesmo do início do sinal verde. Em relação à distribuição do TR, os dados apresentaram uma forte assimetria positiva (coeficiente de inclinação $> 1,0$), sugerindo que uma distribuição log-normal poderia ser adequada. No entanto, o teste de Lilliefors, uma variação do teste de Kolmogorov-Smirnov, rejeitou essa hipótese, indicando que os dados não se ajustaram bem à distribuição log-normal.

Em estudo similar, Çaliskanelli e Tanyel (2016) realizaram uma investigação sobre TR em interseções em uma cidade na Turquia, focando na influência do TR₁ no fluxo de saturação e no desempenho viário. Para o estudo, nove interseções foram selecionadas com base em critérios: ausência de paradas de ônibus que interferissem na movimentação dos veículos, greide longitudinal inferior a 1%, e proibição de estacionamento ao longo do trecho analisado. A coleta de dados abrangeu 19 aproximações, com observações realizadas durante os horários de pico, pela manhã e/ou tarde, registrando no mínimo 25 ciclos para cada aproximação.

O método de coleta consistiu na instalação de uma câmera em um edifício próximo, permitindo a captura das imagens do semáforo e do primeiro veículo na fila. Adicionalmente, um observador posicionado ao lado do primeiro veículo registrou manualmente o TR₁. Foram também coletados dados relativos ao tipo de veículo, largura das faixas, direção dos movimentos, gênero do motorista e tempos semafóricos, totalizando 1.788 observações para os veículos na primeira posição da fila. Os resultados mostraram que o TR dos motoristas que realizaram manobras de conversão (à direita ou à esquerda) foi significativamente menor do que o TR dos motoristas que seguiram em frente.

Para modelar os dados, os autores aplicaram o teste de aderência Anderson-Darling para avaliar a compatibilidade com diferentes distribuições estatísticas (log-normal, exponencial, gama e Weibull). Os resultados indicaram que a distribuição log-normal representou melhor os dados, sendo a única que não foi rejeitada. Posteriormente, foi realizada uma regressão linear para desenvolver um modelo de previsão do TR, sugerindo que ciclos semafóricos mais longos podem aumentar a distração dos motoristas e, consequentemente, prolongar o TR.

Li et al. (2014) examinaram e caracterizaram o TR₁ em interseções semaforizadas em Beijing, China, comparando cenários com e sem a presença de um contador regressivo para o sinal verde. O estudo foi realizado em três interseções, uma com contador regressivo e duas sem, utilizando câmeras instaladas nas proximidades para captar quatro horas de dados em cada local. A coleta foi facilitada por um algoritmo que detectava tanto o instante do início do verde quanto o início do movimento do veículo. Contudo, o algoritmo apresentava limitações e não conseguiu registrar o TR quando havia pedestres, ciclistas ou objetos obstruindo o veículo. O estudo coletou 150 observações de TR para cada cenário. Os resultados indicaram que a média do TR dos motoristas na interseção com contador regressivo foi menor em comparação à média dos TRs nas interseções sem o dispositivo. Essa diferença sugere que a presença do contador regressivo aumenta a atenção dos motoristas, reduzindo distrações. Para avaliar a homogeneidade das variâncias entre os cenários, os autores aplicaram o teste de Levene, que rejeitou a hipótese nula de variâncias iguais, indicando que as variâncias do TR diferiram significativamente entre os cenários com e sem o contador. Além disso, o teste U foi utilizado para testar a hipótese de que os TRs dos dois cenários eram estatisticamente diferentes, resultando em uma diferença significativa. A análise da distribuição dos dados de TR foi realizada graficamente, e os autores selecionaram as distribuições que mais se ajustavam aos dados. O teste qui-quadrado mostrou que o TR do primeiro veículo seguia uma distribuição Weibull no cenário sem contador regressivo e uma distribuição log-normal no cenário com o dispositivo.

Em outro estudo, Colella (2008) analisou o comportamento dos motoristas em interseções semaforizadas nos Estados Unidos, com foco nas reações durante a transição de sinal verde para amarelo, o comportamento de frenagem na interseção e a aceleração no início do tempo de verde. O estudo utilizou dados coletados em 2005, envolvendo 60 motoristas voluntários em um ambiente controlado na pista de testes do Virginia Tech Transportation Institute. Cada motorista realizou 24 passagens pela interseção, com quatro passagens durante o sinal verde e as demais no sinal amarelo. As variáveis coletadas incluíram posição do veículo em relação à linha de retenção, velocidade, aceleração instantânea, número de passagens, gênero, idade e fase do semáforo, totalizando 78 tipos de registros diferentes.

A partir dos dados, Colella (2008) obteve um TR₁ médio de 1,0 segundos, com percentil de 85% correspondendo a 1,3 segundos. Embora o teste de Kolmogorov-Smirnov não tenha rejeitado a hipótese de normalidade para a variável TR, o autor sugeriu o uso de distribuições assimétricas, como beta, gama ou de valores extremos.

Em outro estudo, Hurwitz et al. (2013) analisaram o impacto do uso de dispositivos móveis e outras formas de distração em motoristas, considerando o tempo gasto entre o início do verde e o início do movimento do veículo. O estudo utilizou uma amostra de 1.500 ciclos de sinalização em quatro interseções distintas com faixas duplas de conversão à esquerda, analisando o comportamento de motoristas em relação ao tempo de resposta na partida, empregando técnicas de vídeo para registrar o comportamento dos motoristas. Os dados foram coletados em diferentes locais e horários para garantir uma amostra representativa.

Foram registradas mais de 3.000 observações individuais, divididas igualmente entre as faixas internas e externas. Os resultados mostraram que, em média, os motoristas distraídos levaram 1,5 segundos a mais para iniciar o movimento após a mudança de sinal em comparação com motoristas não distraídos. A aplicação de testes estatísticos confirmou a significância dos resultados, com um aumento de aproximadamente 20% no tempo perdido devido à distração.

Por fim, Fontes *et al* (2022) adotou um método de análise considerando o TR por posição, aplicando a distribuição que mais se adequou e analisando por posição seus valores e impactos em variáveis de desempenho. A metodologia de coleta consistiu na coleta manual dos valores de headway e TR por meio de vídeos de monitoramento de tráfego cedidos pela prefeitura de Fortaleza – CE. Em seguida realizou testes estatísticos de aderência de Kolmogorov-Smirnov (KS) e o qui-quadrado (χ^2) de Pearson nas distribuições normal, gama, weibull, log-normal e log-logística.

Para a análise do efeito no headway, Fontes *et al* (2022) classificaram o headway em três grupos para avaliar o impacto de TRs elevados no comportamento da fila. O primeiro grupo incluiu todos os headways dos veículos em ciclos sem a ocorrência de TR elevado, servindo como referência para condições típicas. O segundo grupo compreendeu os headways nos ciclos onde pelo menos um veículo apresentou TR elevado, permitindo a análise do impacto direto do TR mais longos na fila. Por fim, o terceiro grupo consistiu nos headways dos veículos que estavam imediatamente atrás dos veículos que tiveram TR elevado, com o objetivo de avaliar os efeitos do TR elevados nos veículos subsequentes.

Para a avaliação do efeito do tamanho e da frequência do TR na fila, Fontes *et al.* (2022) classificou os dados de TR de campo em três grupos, por meio da técnica de agrupamento *K-Means*, sendo eles: TR rápido, TR moderado e TR lento, tanto para a primeira posição da fila quanto para as demais posições. O limite a partir do qual o TR foi considerado elevado foi o TR médio do grupo de TR lento. Na Tabela 1 pode-se ver as médias de TR elevado por posição da fila.

Tabela 1 - Frequência e valores de TR elevado de Fontes et al (2022)

Posição	Observações	Média do TR elevado
1	3	5,5
2	4	4,8
3	1	8,7
4	3	5,2
5	2	4,4
6	14	4,7
7	3	4,3
8	6	4,2
9	1	4,3
10	3	4,6
11	6	4,6
13	3	5,0
15	2	5,0
16	1	4,2

Fonte: Adaptado de Fontes *et al* (2022)

A partir desses dados, o estudo também compreendeu a aplicação dos TRs e dos TRs elevados no microssimulador VISSIM, via programação, e posterior análise do efeito do TR nas medidas de desempenho da interseção semaforizada. O estudo coletou e utilizou uma demanda de 996 veículos por hora, sendo 144 veículos pesados, obtendo os valores de 1,9 s para o TR_1 e 1,5 segundos para o TR das demais posições, e obtendo a distribuição log-normal como a que melhor se aderiu tanto a TR_1 quanto a TR.

A Tabela 2 apresenta um resumo dos resultados dos principais estudos encontrados na literatura nos últimos 20 anos, com respeito ao comportamento do TR.

Tabela 2 - Resumo dos estudos de tempo de resposta nos últimos 20 anos

Fonte	TR utilizado (s)	Desvio Padrão (s)	Distribuição do TR
Li e Prevedouros (2002)	1,8 (em frente) 1,4 (à esquerda)	0,6 0,7	Normal
Colella (2008)	1,0	0,3	Uni caudal: beta, gama ou de valores extremos
Li <i>et al</i> (2014)	2,1 (com contador) 1,5 (sem contador)	1,1 0,7	Weibull Log-Normal
Çaliskanelli e Tanyel (2016)	1,5 (em frente) 1,3 (à direita) 1,4 (à esquerda)	0,9 0,8 0,6	Log-Normal -
Murat e Cetin (2019)	[0,85 – 1,25]	-	-
Xie <i>et al.</i> (2020)	[0,1 - 3,6]	-	-
Fontes <i>et al.</i> (2022)	1,9 (1°) 1,5 (demais posições)	0,9 0,9	Log-Normal

Fonte: Elaborado pelo autor

2.2 Modelagem do TR no VISSIM

O VISSIM permite o usuário realizar a calibração do TR somente do primeiro veículo (TR_1), ou seja, da reação à mudança do semáforo, por meio do parâmetro *reaction after end of red*. Esse parâmetro permite a alocação do tempo entre o instante de mudança do semáforo para “siga” e o início do movimento do primeiro veículo. Ele é composto por dois parâmetros: *behavior at red/amber signal* e *reaction time distribution*. O primeiro define o “siga” após a mudança de vermelho para verde. O parâmetro *reaction time distribution* se refere à distribuição do TR_1 , que pode ser uma distribuição normal, com média e desvio padrão especificados, ou uma distribuição empírica, sendo especificadas as frequências acumuladas da variável. O comportamento default do software é que o primeiro veículo da fila irá reagir instantaneamente ao sinal “siga”, ou seja, a partir do próximo passo da simulação o veículo inicia seu movimento (PTV, 2024). Portanto, o TR dos demais veículos em fila só pode ser especificado via programação.

Em relação ao tempo de resposta no modelo de *car-following* empregado pelo VISSIM, o programa não define um valor específico para a variável. Ela é resultada do tempo de transição entre os regimes de direção (MITROI *et al.*, 2016)

2.3 Modelagem do TR no AIMSUN

O AIMSUN, diferente do VISSIM, permite o usuário especificar tanto o TR_1 quanto o TR, por meio de valores associados a probabilidades. O TR_1 pode ser modelado por meio do parâmetro *tempo de reação quando parado*. O TR pode ser calibrado pelo parâmetro *tempo de reação para o veículo à frente no semáforo*, que representa o tempo que um veículo em fila leva para reagir à aceleração do veículo a sua frente. (AIMSUN, 2024)

A forma de especificação dos desses parâmetros, sem recorrer à programação, é por meio de valores pontuais (discretos) e de suas probabilidades. Uma dificuldade é que é inviável inserir todas as probabilidades dos dois parâmetros, devido ao grande número de combinações possíveis, sendo cada combinação uma linha de entrada. Por exemplo, se o usuário especifica 100 valores de probabilidades para o parâmetro *tempo de reação quando parado*, referente ao TR, ele especificará 100 linhas na janela de entrada do software para cada valor do outro parâmetro, de TR_1 . Mais detalhes sobre isso serão apresentados na seção 3.3.

Segundo Mitroi *et al.* (2016), o modelo de *car-following* do AIMSUN usa o passo da simulação como tempo de reação. Assim, o veículo seguidor reagiria a mudanças no veículo líder no próximo passo de simulação. Os autores recomendam, tanto para o AIMSUN, quanto para o VISSIM, o carregamento de tempos de respostas específicos para cada veículo na rede.

3 MÉTODO

A coleta dos dados foi feita por meio de filmagens de drone, pois essas imagens proporcionam uma visão aérea ortogonal, o que dá maior precisão à observação da movimentação dos veículos. O drone usado foi o Drone Phantom 4 Pro+ V2.0 equipado com um estabilizador motorizado de 3 eixos. A filmagem ocorreu no dia 31/05/23 e durou 60 minutos, e nesse período o fluxo médio foi de 295 veículos/h. As gravações foram capturadas durante o dia, com boas condições climáticas, a 30 metros de altura, com cadência de 30 frames/s e qualidade de vídeo Full HD (1920 x 1080 pixels).

O local selecionado foi a aproximação norte do cruzamento entre as avenidas Humberto Monte e Jovita Feitosa, cujas imagens permitem a visualização da faixa de retenção e da fila formada pelos veículos (Figura 2). A interseção escolhida tem um baixo volume de motocicletas, pois elas afetam o TR dos demais veículos e não foi objetivo deste trabalho a mensuração desse efeito. O foco semafórico foi filmado por uma câmera sobre tripé, simultaneamente à filmagem do drone, para a coleta dos instantes do início do verde.

Figura 2 - Filmagem da Interseção entre Av. Humberto Monte x Av. Jovita Feitosa

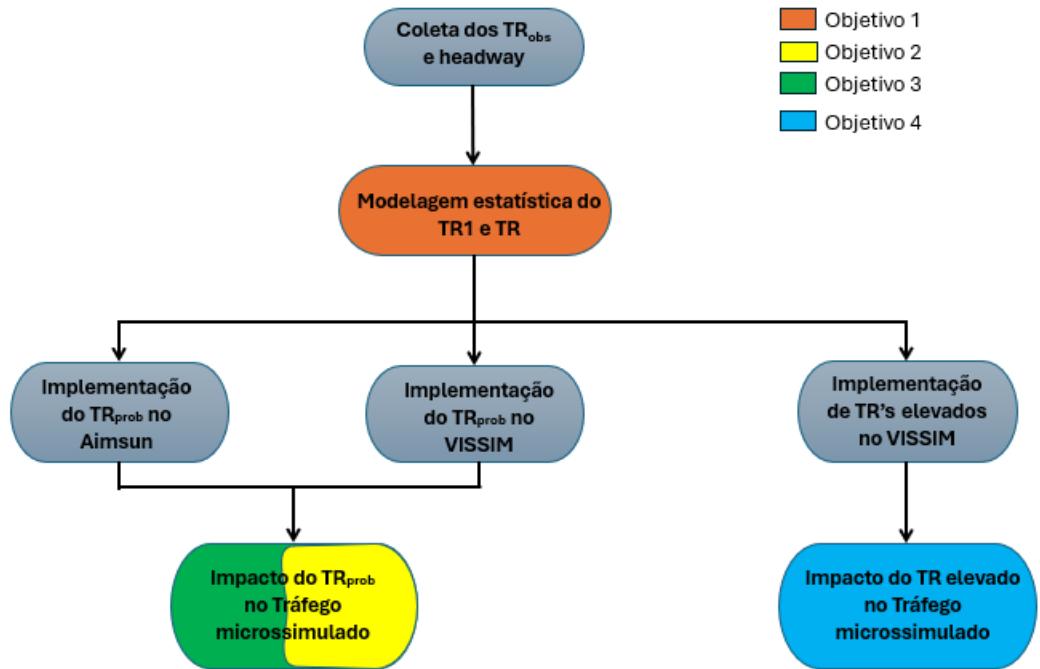


Fonte: Elaborada pelo autor.

A aproximação contém 3 faixas de tráfego misto (2,6 m de largura cada) e um canteiro central que separa a pista de sentido contrário. Ela possui área de espera para motos (*motobox*), como apresentado na Figura 2. É proibido o estacionamento em ambos os lados da via, e a velocidade máxima regulamentada é de 60 km/h.

O método usado nesta pesquisa se inicia por um caminho, que compõe o objetivo 1 e depois se ramifica em etapas, que são referentes a cada um dos objetivos de 2 a 4, conforme mostrado pela Figura 3.

Figura 3-Passos metodológicos



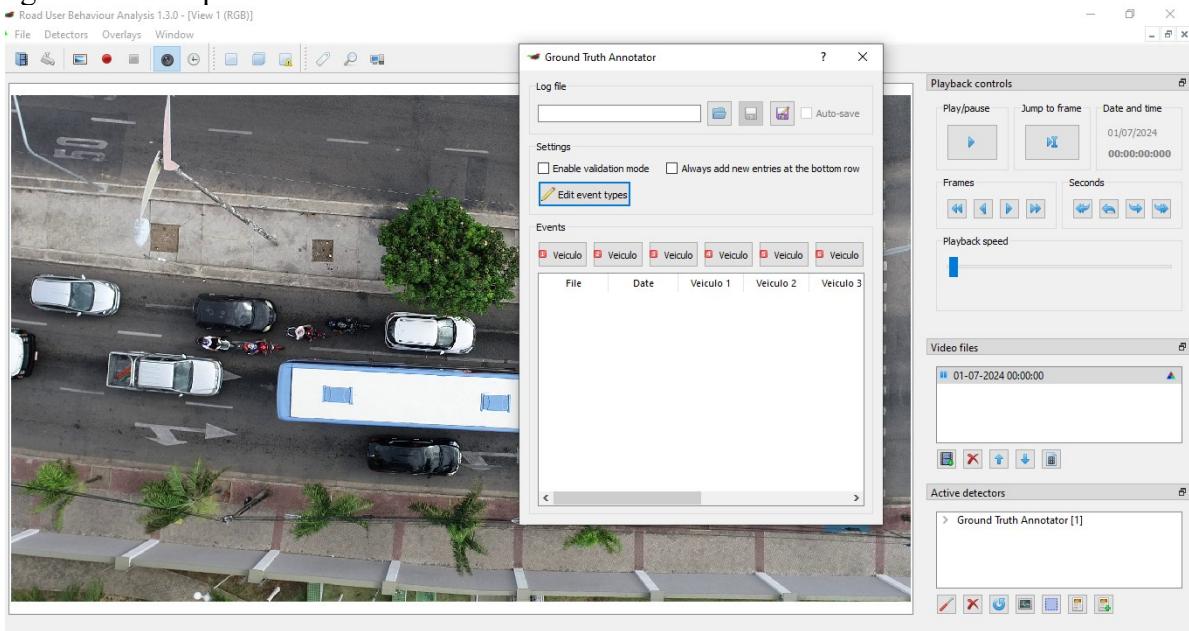
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1 Coleta dos TR_{obs} e *headway*

Para a coleta a partir dos vídeos, foi utilizado o *software Road User Behaviour Analysis* (RUBA), desenvolvido por Agerholm *et al.* (2017), que dispõe de uma ferramenta, cuja interface é apresentada na Figura 4, onde se utiliza até seis botões para marcação manual de tempos. Além disso, o programa permite pausar, avançar, retroceder e ajustar a velocidade de reprodução do vídeo como forma de ajudar na coleta dos dados.

Como mostrado no exemplo da Figura 5, o arquivo de saída é um .csv que registra os instantes do vídeo em que foi apertada cada tecla. Por exemplo, para o veículo 1, o valor 00:00:17.617 representa o momento do vídeo, com aproximação de milésimos de segundo, em que foi apertada a tecla. Para este estudo, configurou-se uma tecla para cada posição de fila, com a coleta por faixa. Além disso, a obtenção do TR observado (TR_{obs}) e do *headway*, também foram realizadas separadamente. Assim, uma via de três faixas gera 6 arquivos de saída por vídeo: 2 arquivos por faixa, sendo um com os valores de TR e outro com os valores de *headway*.

Figura 4 - Exemplo da interface do RUBA



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5 - Exemplo de arquivo de saída do RUBA

File	Date	Veiculo 1	Veiculo 2	Veiculo 3	Veiculo 4	Veiculo 5	Veiculo 6
HMx_F_0001.MOV	2024/07/01	00:00:17.617	00:00:20.587	00:00:23.490			
HMx_F_0001.MOV	2024/07/01	00:03:59.339	00:04:03.376	00:04:05.044			
HMx_F_0001.MOV	2024/07/01	00:05:51.317	00:05:55.388	00:06:00.460	00:06:03.663		
HMx_F_0001.MOV	2024/07/01	00:07:42.795	00:07:46.766				

Fonte: Elaborada pelo autor.

As observações foram coletadas com vídeo a uma velocidade de reprodução de 5 frames por segundo (fps), com o TR registrado no momento que o operador nota o início do movimento do veículo. O *headway* foi registrado no momento que o pneu dianteiro de cada veículo toca na faixa de retenção.

O volume total observado foi de 295 veículos, sendo 282 (95,6%) carros, 11 (3,7%) caminhões e 2 (0,7%) ônibus. A divisão do tráfego nas faixas foram: 19% na faixa da direita, 45% na faixa central e 36% na faixa esquerda, porém ressalta-se que, neste estudo, a faixa não foi levada em consideração. A amostra de TR1 consistiu em 69 (94,5%) carros, 3 (4,1%) caminhões e 1 (1,4%) ônibus. A amostra de TR consistiu em 213 (95,9%) carros, 8 (3,6%) caminhões e 1 (0,5%) ônibus. Como as amostras de caminhão e ônibus foram muito pequenas, neste estudo foram modelados apenas carros.

3.2 Modelagem estatística do TR

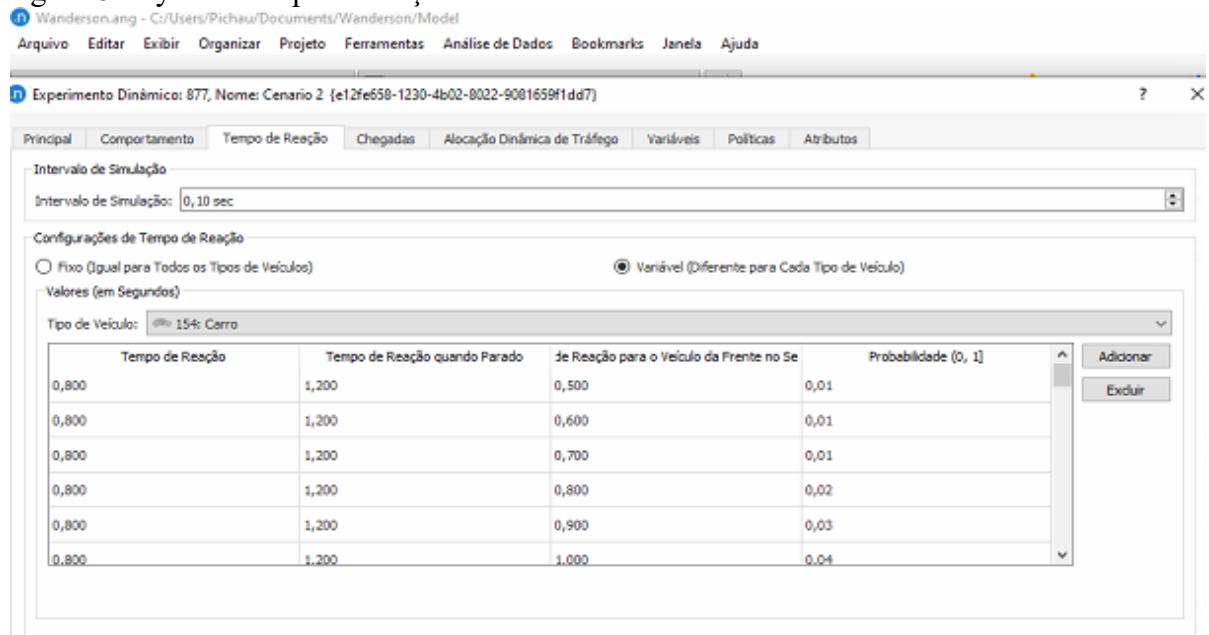
A estimativa das distribuições de probabilidade baseou-se nos estudos apresentados na revisão bibliográfica. Foram escolhidas as distribuições normal, log-normal, gamma e weibull para o TR. Os testes estatísticos de aderência usados foram o Kolmogorov-Smirnov, o Qui-quadrado e o Anderson-Darling. Após a escolha dos modelos de probabilidade mais adequados, esses foram implementados nos microssimuladores.

3.3 Implementação do modelo do TR_{prob} no AIMSUN

Para implementar o TR probabilístico (TR_{prob}), ou seja, gerado pela distribuição de probabilidade escolhida, no software AIMSUN, utilizou-se os parâmetros disponíveis, a relembrar: o parâmetro *tempo de reação quando parado*, para o TR1, e o parâmetro *tempo de reação para o veículo à frente no semáforo*, para o TR.

Como dito na seção 2.3, a forma de entrada desses parâmetros, sem recorrer à programação, é por meio das especificações de valores pontuais (discretos) dos TRs e de suas probabilidades. Uma dificuldade é que a combinação de valores possíveis de TR1 e de TR pode ser muito grande, e cada combinação é uma linha da interface, conforme mostrado na Figura 6. Por isso, nesta pesquisa, adotou-se um valor fixo de TR₁ para os cenários com o TR variável.

Figura 6-Layout de implementação no AIMSUN



Fonte: Elaborada pelo autor.

Vale ressaltar, que não foi utilizado programação para uma inserção forçada do TR no AIMSUN devido sua interface base já permitir um bom nível de modificação da variável, além do pouco tempo disponível para aprendizado mais aprofundado do software pela equipe de pesquisa.

Com o intuito de um estudo focado apenas na análise do TR e do *headway*, foi criada uma rede simples, com uma única via com duas faixas, com a mudança de faixa proibida, para tornar a descarga dos veículos no verde mais uniforme, o que facilita a análise dos efeitos do TR. Foram criados cinco cenários de simulação, conforme a Tabela 3.

O cenário 1 representa o cenário default do programa, em que a maioria dos analistas usariam caso não se atentem à modificação do TR em seus estudos. O cenário 2 representa um cenário em que apenas o TR_1 foi considerado, visto que, na maioria dos estudos, apenas esse é tratado como relevante no impacto do fluxo do tráfego. Os cenários 3 a 5 representam valores de TR elevados, para atingir o quarto objetivo do trabalho.

Tabela 3 - Cenários do TRprob no AIMSUN

Cenário	TR ₁	TR
1	Default (1,6 s)	Default (1,2 s)
2	TR_{1prob} (média = 1,9s)	Default (1,2s)
3	Default (1,6 s)	TR_{prob} (média = 1,5s)
4	Default (1,6 s)	TR_{prob} (média = 2,0s)
5	Default (1,6 s)	TR_{prob} (média = 2,5s)

Fonte: Elaborada pelo autor.

A programação semafórica teve ciclo de 80 s, sendo 57 s de verde, 3 s de amarelo e 20 s de vermelho. A velocidade desejada foi de acordo com os dados coletados, de 60km/h. Foram simulados 3 cenários de demanda veicular (1.380, 1.780 e 2.180 veículos/hora), a fim de se analisar os cenários 1 a 5 em diferentes graus de volume/capacidade (V/C): 0,50; 0,65 e 0,80, tomando como base para essas proporções o V/C do cenário 3. Para cada cenário, foram realizadas 30 réplicas de 15 minutos, mais 100 s de aquecimento da rede, utilizando-se o mesmo conjunto de sementes aleatórias entre os seis cenários. Para cada réplica, foram obtidas como variáveis de saída o atraso médio, o fluxo de saturação e a capacidade.

Para a aplicação do método proposto foi codificada uma rede com programação semafórica com ciclo de 80s, sendo 57s de verde, 20s vermelho e 3s amarelo. A rede está representada na Figura 7.

Figura 7 - Rede adotada no AIMSUN



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4 Implementação do modelo do TR_{prob} no VISSIM

Como dito na seção 2.2, o VISSIM oferece um parâmetro para o TR_1 , *reaction after end of red*, mas não para o TR. Assim, como o TR não pode ser configurado pelo usuário, faz necessário compreendê-lo por meio de análises das trajetórias simuladas. Para isso foi criado um script em python que lê o arquivo de saída com extensão *.fzp* do VISSIM e, por meio da posição, velocidade, faixa de tráfego, calcula o TR de cada veículo.

Em seguida, para realizar a modelagem probabilística do TR no VISSIM, possível apenas via programação, foi utilizado o pacote pywin32, que possibilita criar uma conexão COM (Component Object Module) entre a linguagem python e o microssimulador. A modelagem do TR_{prob} foi validada comparando-se os TRs resultantes das simulações (a partir dos arquivos *.fzp*) com os valores de TR especificados na programação.

A via construída no VISSIM foi similar à feita no AIMSUN, com duas faixas, sem a possibilidade de mudança de faixa. Foram criados 5 cenários análogos aos criados no AIMSUN, conforme a Tabela 4. A diferença no TR_1 entre os cenários 2 e os cenários de 3 a 5 é que no cenário 2 foi colocado a função probabilística (acumulada) diretamente no parâmetro “*Reaction after end of red*”, enquanto nos cenários demais a inserção foi feita via código de programação. Isso foi feito para verificar a implementação do TR_1 usando a ferramenta já proposta pelo software, além de servir como base comparativa para os resultados via programação.

Tabela 4 - Cenários do TRprob no VISSIM

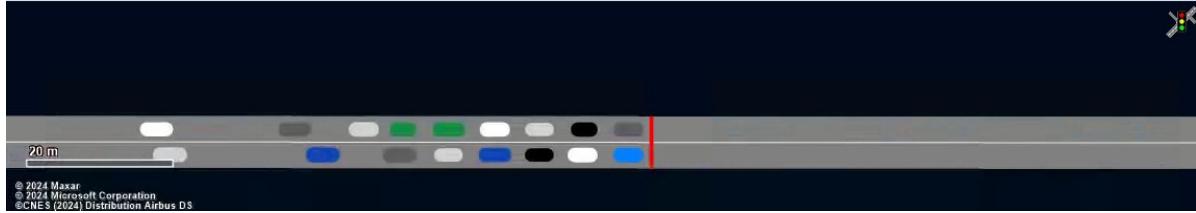
Cenário	TR ₁	TR
1	Default (0,1s)	Default (entre 0,9 s e 1,3 s)
2	TR _{1prob} (média = 1,9s)	Default (entre 0,9 s e 1,3 s)
3	TR _{1prob} (média = 1,9s)	TR _{prob} (média = 1,5 s)
4	TR _{1prob} (média = 1,9s)	TR _{prob} (média = 2,0 s)
5	TR _{1prob} (média = 1,9s)	TR _{prob} (média = 2,5 s)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dados de entrada da rede, isto é, programação semafórica e velocidade desejada foram os mesmos inseridos no AIMSUN. Além disso, foram aplicados os mesmos três níveis de demanda veicular, 1.380, 1.780 e 2.180 veículos/hora, a fim de se analisar cenários de diferentes V/C. Todos os cenários tiveram 30 replicações de 1.000 segundos, com as sementes indo de 5 a 150, sendo os 100 primeiros segundos como aquecimento da rede. Assim, as simulações tiveram um tempo de análise efetivo de 900 segundos (15 minutos), assim como feito no AIMSUN.

Para a aplicação do método proposto foi codificada a rede com programação semafórica igual a do AIMSUN: ciclo de 80 s, sendo 57 s de verde, 20 s vermelho e 3 s amarelo. A rede está representada na Figura 8.

Figura 8 - Rede construída no VISSIM



Fonte: Elaborada pelo autor.

Durante as verificações dos valores de TR obtidos das simulações foram realizados alguns ajustes em relação aos scripts de Fontes (2020):

- Devido a uma reação do VISSIM ao código, durante a aplicação da parada forçada dos veículos pelo período do TR_{prob}, esses apresentavam uma pequena movimentação de poucos centímetros, com velocidades superiores à 0 km/h, mas

inferiores à 0,2 km/h. Assim, para diminuir erros, foi adotado como instante de reação, o último instante com velocidade igual ou inferior a 0,2 km/h do veículo;

- Foi corrigido um erro que aplicava o TR_{prob} à veículos que já tinham passado pelo semáforo. Assim, foi delimitado que a região de aplicação do TR_{prob} fosse apenas à montante da interseção.
- Foi corrigido um erro em que o valor do TR diminuía em relação ao TR_{prob} especificado à medida que a posição na fila aumentava. Assim, foi criado uma interação que atualizava a aplicação do TR_{prob} a cada nova posição da fila.
- Após os ajustes, o TR_{prob} gerado pelo script e o TR gerado pelas simulações foram idênticos.

3.4.1 *Implementação de TR elevado no VISSIM*

Essa etapa visou avaliar, por meio de experimentos de microssimulação, o impacto de TR's elevados isolados, como os que ocorrem devido ao uso de smartphones, na fluidez do tráfego. Assim como na etapa anterior, esta foi feita via programação, com conexão COM (Component Object Module) entre o python e o VISSIM. Foram criados cenários em que, a cada 3 ciclos semafóricos, um veículo da faixa esquerda apresentou um valor elevado de TR especificado e, para os demais veículos, a simulação ocorreu em sua forma default, conforme a Tabela 5. A letra E que denomina o cenário vem do termo elevado.

Os dados de entrada da rede, isto é, programação semafórica e velocidade desejada foram os mesmos inseridos nas análises anteriores. Além disso, foram aplicadas as mesmas demandas veiculares (1.380, 1.780 e 2.180 veículos/hora), a fim de se analisar os cenários em diferentes V/C. Para todos os cenários, foram realizadas 30 replicações de 15 minutos com 100 s de aquecimento da rede, mantendo-se as mesmas sementes aleatórias entre os cenários.

3.5 Impacto do TR_{prob} e do TR elevado no Tráfego

Para avaliar os efeitos de se modelar o TR_{prob} no headway, na capacidade e no fluxo de saturação em ambos os simuladores, foi aplicada uma demanda saturada de 10.000 veículos/hora em todos os cenários propostos, realizando-se 30 replicações de 15 min, com 100s de aquecimento da rede, em cada, e, por meio de um coletor de veículos colocado logo após o semáforo, foi obtido o fluxo passante em ambas as faixas. Essa demanda muito alta,

gerou filas suficientemente longas para estimar o fluxo de saturação e a capacidade em cada cenário.

Tabela 5 - Cenários de TR elevado, aplicado a um veículo a cada 3 ciclos semafóricos.

Cenário	Posição na fila	TR
E _{1,4}	1 ^a	4 s
E _{3,4}	3 ^a	4 s
E _{5,4}	5 ^a	4 s
E _{7,4}	7 ^a	4 s
E _{9,4}	9 ^a	4 s
E _{11,4}	11 ^a	4 s
E _{1,6}	1 ^a	6 s
E _{3,6}	3 ^a	6 s
E _{5,6}	5 ^a	6 s
E _{7,6}	7 ^a	6 s
E _{9,6}	9 ^a	6 s
E _{11,6}	11 ^a	6 s
E _{1,8}	1 ^a	8 s
E _{3,8}	3 ^a	8 s
E _{5,8}	5 ^a	8 s
E _{7,8}	7 ^a	8 s
E _{9,8}	9 ^a	8 s
E _{11,8}	11 ^a	8 s

Fonte: Elaborada pelo autor.

Há uma diferença no método de coleta do *headway* em cada programa. No VISSIM, foi necessário a utilização de programação, assim como feito para a obtenção do TR, por meio da saída .fzp. Assim o headway foi calculado como a diferença de tempo entre a passagem dos veículos na faixa de retenção, que, no programa, é o próprio semáforo. Já o AIMSUN gera um arquivo .txt para cada faixa e para cada replicação, com os valores de *headway* de cada veículo, separados por posição e ciclo semafórico, como exemplificado na Figura 9.

Na Figura 9, a primeira coluna (iniciada na imagem com o valor 80) representa o instante de início do verde de cada ciclo. A segunda coluna representa os valores de *headway* dos veículos na 1^a posição de suas filas, a terceira coluna representando os valores de *headway*

dos veículos na 2^a posição e assim por diante. Nas colunas referentes aos valores de *headway*, as três últimas linhas representam, respectivamente, os valores referentes a posição da fila que ela se refere, a média dos valores de todos os *headways* da coluna e a quantidade de observações da coluna.

Figura 9 - Saída de headways do AIMSUN

Discharge record																									
File: C:/Users/Pichau/Documents/Wanderson/Model																									
Comment: Aimsun Next Wanderson																									
Date: 2024-07-08T13:12:29																									
Aimsun Next 22.0.2[939ea4a897] Seed = 5551																									
Discharge at Section 394, lane index 1, signal face 0																									
80	1.21	1.70	1.49	9.59	1.32	1.82	1.60	5.21	3.47	1.56	1.63	5.68	2.06	(12: 3.09)											
160	3.59	2.58	1.74	1.24	1.38	1.38	1.36	7.54	1.48	10.57	23.70	(10: 5.30)													
240	2.57	2.50	1.66	1.33	3.57	1.56	1.66	5.51	3.77	5.28	5.29	1.84	1.46	1.91	3.25	3.02	1.51	1.47	6.11	(18: 2.93)					
320	3.72	2.46	1.70	2.17	1.59	1.42	1.95	1.27	1.17	6.83	3.72	9.11	10.54	4.91	1.74	1.77	(15: 3.49)	1.97							
400	3.13	2.49	1.80	1.28	1.24	1.36	1.67	1.50	1.68	1.67	1.37	1.69	3.92	1.51	8.61	1.61	1.93	6.53	5.74	5.30	(19: 2.78)				
480	2.61	2.20	2.01	1.25	1.44	5.82	1.45	1.51	1.46	1.80	2.26	1.66	1.58	4.68	6.32	4.63	1.48	9.15	(17: 2.98)	4.75					
560	2.57	2.25	2.06	1.69	1.58	1.14	1.53	1.41	1.59	1.46	1.46	2.21	12.32	1.27	1.96	1.39	1.99	2.70	7.22	1.90	(19: 2.59)	7.13			
640	2.48	2.15	1.91	2.18	1.29	1.25	1.39	8.98	1.55	1.52	10.96	7.21	7.61	3.57	1.61	(14: 3.80)									
720	3.35	2.42	1.89	1.59	1.21	2.00	18.01	1.74	4.37	9.51	(9: 4.75)	11.33	1.41												
800	3.01	2.41	1.75	1.13	1.34	1.46	1.25	2.57	9.30	2.12	7.23	1.66	3.91	6.98	2.68	2.96	4.25	(16: 3.31)	2.60						
-----	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20					
-----	2.85	2.34	1.80	2.28	1.62	1.85	3.01	3.50	2.82	4.00	5.88	3.88	5.43	3.54	3.73	2.56	2.23	4.96	6.35	3.60					
-----	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	10	8	8	7	7	6	5	4	3	2					
[159: 3.22]																									

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como exemplo, o valor 1,70, localizado na primeira linha e terceira coluna, representa o valor do *headway* (em segundos) do segundo veículo da fila no primeiro ciclo semafórico e o valor 2,34, localizado na penúltima linha da terceira coluna representa o valor do *headway* médio para a segunda posição da fila, na faixa de tráfego e replicação específicas.

Para a análise dos atrasos e capacidade utilizou-se as saídas convencionais de ambos os programas. Já para a análise do fluxo de saturação foi utilizado o cálculo pelo inverso do headway de saturação. Além disso, foram feitos gráficos de dispersão para o atraso e gráficos de barra para capacidade e fluxo de saturação, assim como matrizes de comparação dos valores obtidos. Foram usados intervalos de 95% confiança t-Student para estimativa de médias.

Por fim, ressalta-se que a análise dos TRs elevados só foi realizada no VISSIM, pois apenas nele foi possível especificar os valores de TR para veículos escolhidos. Acredita-se que seria possível resolver esse problema via programação, mas até o momento deste estudo uma solução suficientemente simples não foi encontrada.

4 RESULTADOS

4.1 Modelagem estatística do TR

Para analisar as distribuições de probabilidade foi utilizado o software R, no qual foram utilizadas as bibliotecas “readxl”, “fitdistrplus”, “goftest”, “tseries” e “nortest”. Foram realizados os testes qui-quadrado (χ^2), Kolmogorov-Smirnov (KS) e Anderson-Darling (AD) para analisar a aderência das distribuições normal, log-normal, gama e weibull aos dados de TR₁ e TR. Os resultados estão apresentados nas Tabela 6 e Tabela 7. Além disso, foram gerados os gráficos comparativos entre as distribuições de probabilidade e os histogramas das amostras coletadas, conforme as Figura 10 e Figura 11.

Tabela 6 - Testes de aderência para TR1

Distribuiçã o	Teste χ^2	Valor-p	Tese KS	Valor-p	Teste AD	Valor-p
Normal	317,60	0,00	0,10	0,02	4,85	0,00
Log-normal	13,29	0,15	0,07	0,24	1,02	0,35
Gamma	25,20	0,00	0,07	0,23	0,89	0,42
Weibull	46,27	0,00	0,07	0,25	1,58	0,16

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 7 - Testes de aderência para TR

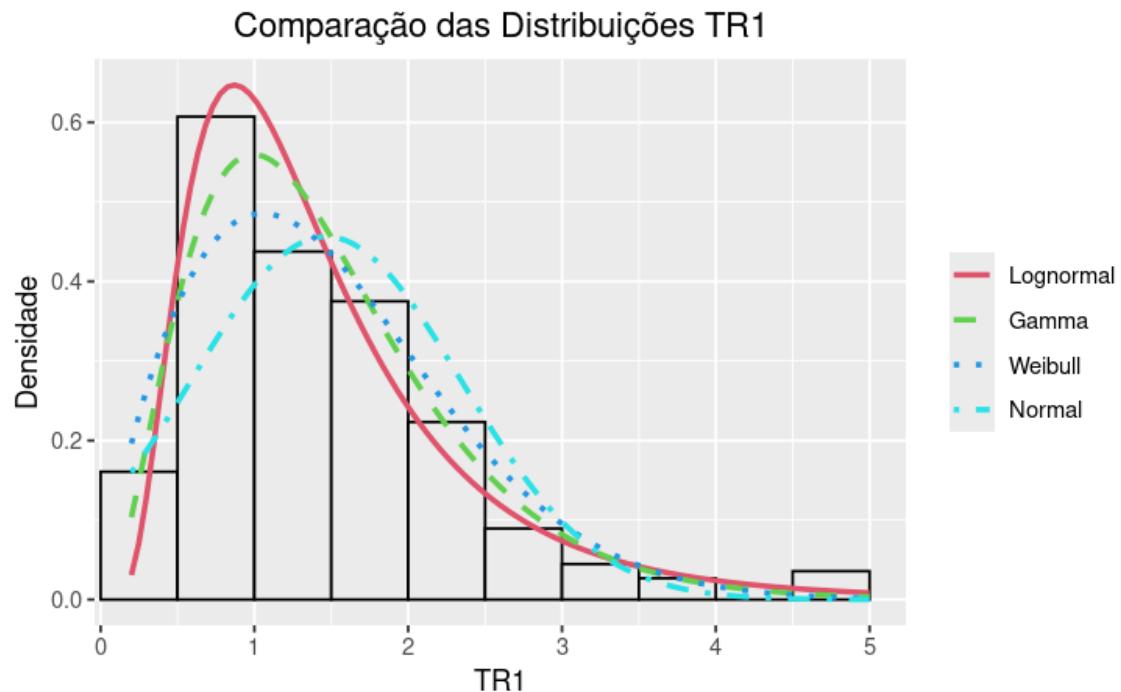
Distribuiçã o	Teste χ^2	Valor-p	Tese KS	Valor-p	Teste AD	Valor-p
Normal	7,31	0,29	0,07	0,83	0,45	0,80
Log-normal	1,67	0,95	0,1007	0,53	0,49	0,75
Gamma	2,38	0,88	0,08	0,82	0,29	0,94
Weibull	6,19	0,40	0,07	0,85	0,40	0,85

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 6 e Tabela 7 indicam que não foi possível rejeitar nenhuma das distribuições para o TR. Entretanto, para o TR₁, a distribuição normal foi rejeitada em todos os testes e a única que não foi rejeitada no teste χ^2 foi a distribuição log-normal. Isso é possível de ser visualmente notado ao se analisar as figuras 10 e 11, onde a distribuição normal destoa das demais e dos dados de campo de TR₁. Diante disso, foi realizada a modelagem probabilística de TR₁ e TR nos simuladores utilizando a distribuição log-normal, visto ter sido a única que não foi

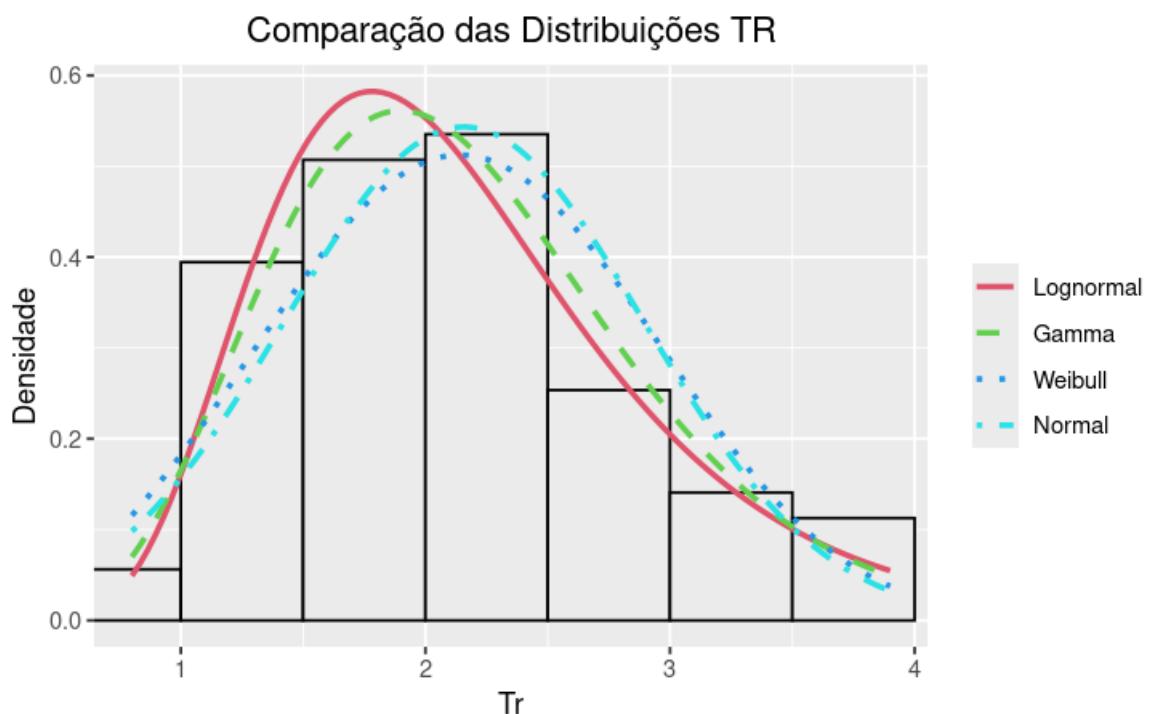
rejeitada em nenhum dos testes, além de já haver respaldo em outros estudos sobre sua aplicabilidade neste parâmetro.

Figura 10 - Comparação entre as distribuições estatísticas de TR1



Fonte: Elaborada pelo autor.

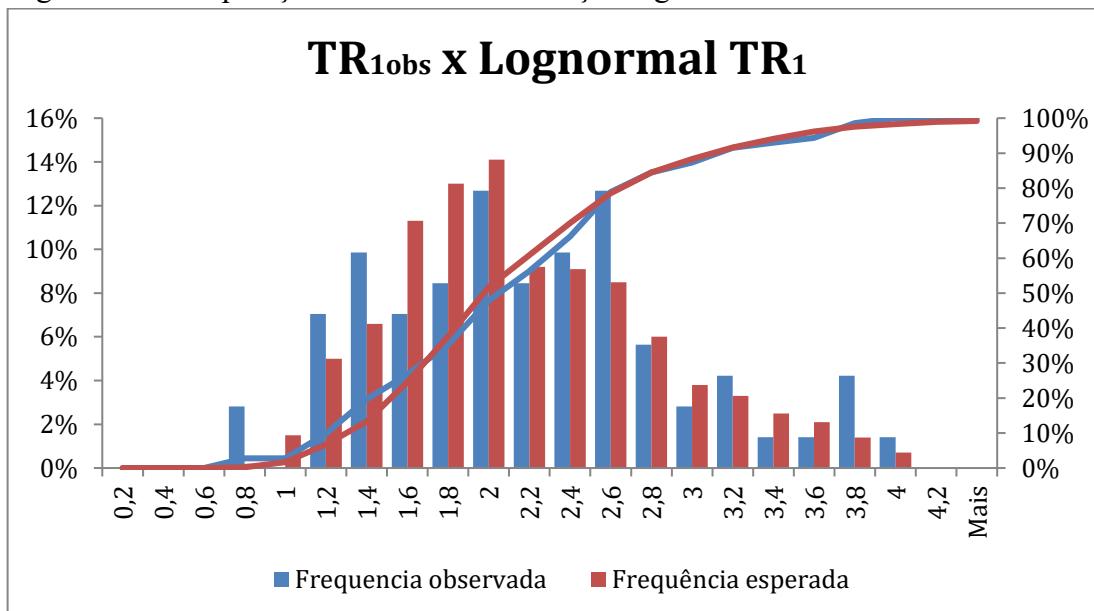
Figura 11-Comparação entre as distribuições estatísticas de TR



Fonte: Elaborada pelo autor.

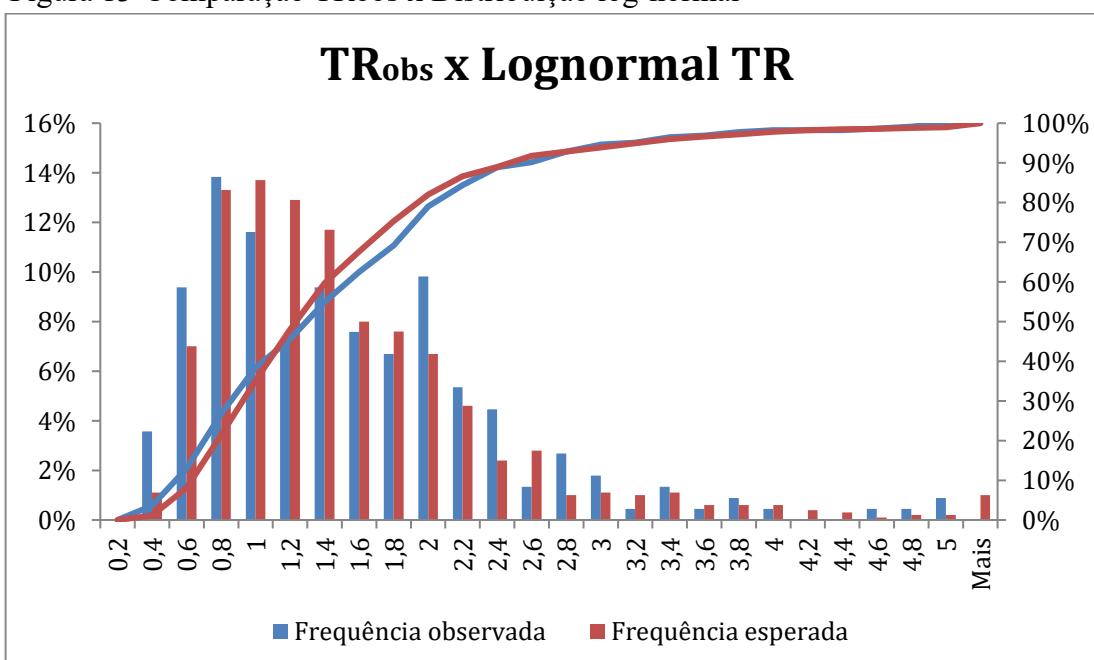
A Figura 12 e a Figura 13 comparam os dados de campo com as distribuições log-normal geradas com os mesmos parâmetros dos dados de campo. É possível notar que houve uma boa aderência tanto entre as frequências absolutas quanto entre as curvas de frequência acumulada. Portanto, a distribuição log-normal aparenta poder modelar bem os parâmetros TR_1 e TR .

Figura 12 - Comparaçao TR_{1obs} x Distribuição log-normal



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 13-Comparação TR_{obs} x Distribuição log-normal



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 Impacto do TR_{prob} no tráfego simulado

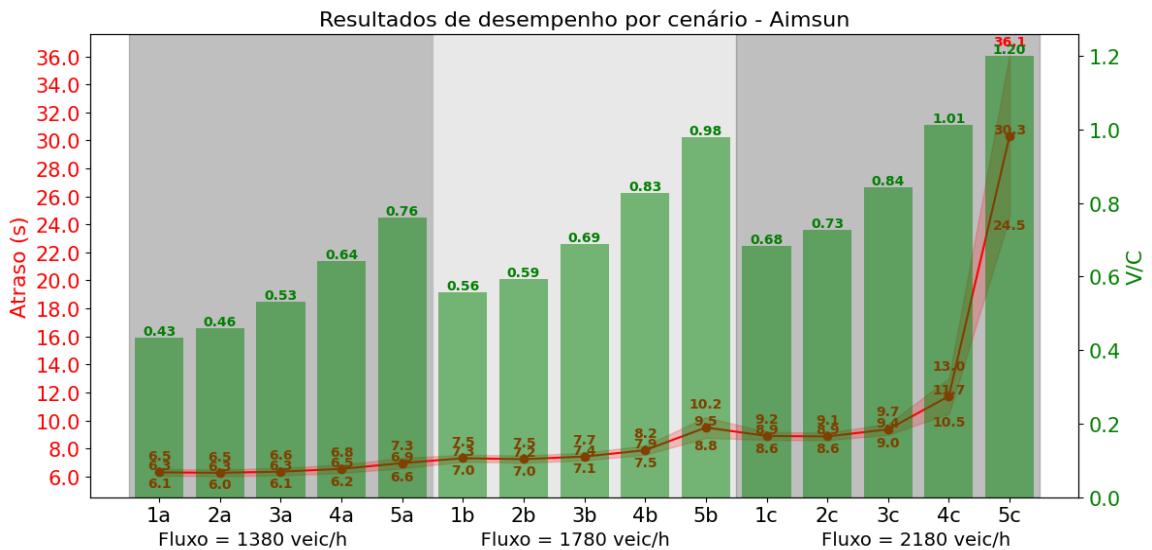
Neste tópico serão apresentados os resultados das análises dos efeitos da inserção da modelagem probabilística do TR nas simulações. Serão avaliados os impactos no atraso médio, na capacidade, no fluxo de saturação e no headway de descarga simulados em cada software, para diferentes níveis de grau de saturação e de TR médio, cujos cenários foram apresentados no capítulo 3.

4.2.1 Impacto do TR_{prob} no AIMSUN

4.2.1.1 Atraso no AIMSUN

Um compilado dos resultados de atraso e grau de saturação, por nível de demanda dos cenários propostos para o AIMSUN estão na Figura 14. A letra após o cenário significa o nível de demanda; quando não houver letra, trata-se de análise geral do cenário, independente da demanda. A faixa de valores ao longo da curva de atraso (vermelha) liga os limites dos intervalos de confiança de 95% de cada cenário.

Figura 14 - Compilado de resultados de desempenho do AIMSUN



Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível notar diferenças relevantes no V/C entre os 5 cenários de uma mesma demanda, com exceção dos dois primeiros. Quanto ao atraso, as diferenças só surgiram no cenário 5, em especial nos fluxos mais elevados. Foram realizados testes t pareados para verificar se há diferença significativa entre as médias de atraso, capacidade e fluxo de saturação

entre os cenários. Os resultados, assim como as diferenças percentuais absolutas entre seus valores estão representados nas Tabela 8, Tabela 9, Tabela 10. As células em cor cinza representam as comparações que resultaram no teste t sem diferença estatisticamente significativa entre as médias. O cálculo em cada célula foi o seguinte:

$$Diferença\ percentual = \frac{Média_{coluna} - Média_{linha}}{Média_{linha}} \times 100 \quad (4)$$

Assim, na Tabela 8, por exemplo, o valor de 4% na primeira linha e quarta coluna significa que o atraso do cenário 4a foi 4% maior em relação ao atraso do cenário 1a. As cores das células variam de verde escuro, que indica diferenças negativas (estatisticamente significativas) até vermelho, que indicam maiores diferenças positivas (estatisticamente significativas). A variação de cor engloba todos os gráficos relacionados ao estudo, ou seja, nas análises de atraso, por exemplo, que apresentam 3 cenários de fluxo, as cores de verde mais escuro ou vermelhas indicam, respectivamente, os maiores valores negativos e positivos considerando três cenários globalmente.

Tabela 8 - Comparaçao dos atrasos entre cenários p/ fluxo de 1.380 veic/hora no AIMSUN

	1a	2a	3a	4a	5a
1a		0%	1%	4%	11%
2a	0%		1%	5%	11%
3a	-1%	-1%		3%	10%
4a	-4%	-4%	-3%		6%
5a	-10%	-10%	-9%	-6%	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 9 - Comparaçao dos atrasos entre cenários p/ fluxo de 1.780 veic/hora no AIMSUN

	1b	2b	3b	4b	5b
1b		-1%	2%	8%	30%
2b	1%		3%	9%	31%
3b	-2%	-3%		6%	28%
4b	-7%	-8%	-6%		21%
5b	-23%	-24%	-22%	-17%	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 10 - Comparaçao dos atrasos entre cenários p/ fluxo de 2.180 veic/hora no AIMSUN

	1c	2c	3c	4c	5c
1c		0%	5%	32%	241%
2c	0%		6%	33%	243%
3c	-5%	-5%		25%	224%
4c	-24%	-25%	-20%		158%
5c	-71%	-71%	-69%	-61%	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como pode ser observado nas Tabelas 8 a 10, os cenários 1, 2 e 3 não apresentaram diferença estatística significativa, com exceção do caso com demanda de 2.180 veículos/h, em que houve um aumento de 6% de atraso do cenário 2c para o 3c e uma redução de 5% do cenário 3c para 1c, o que demonstra certo impacto. Entretanto, as diferenças entre o cenário default e os cenários com aumento do TR de até 1 s chegaram a mais de 241%. Esses valores de atraso elevados, refletidos em V/C superiores a 1, indicam forte sensibilidade do AIMSUN à modelagem do TR.

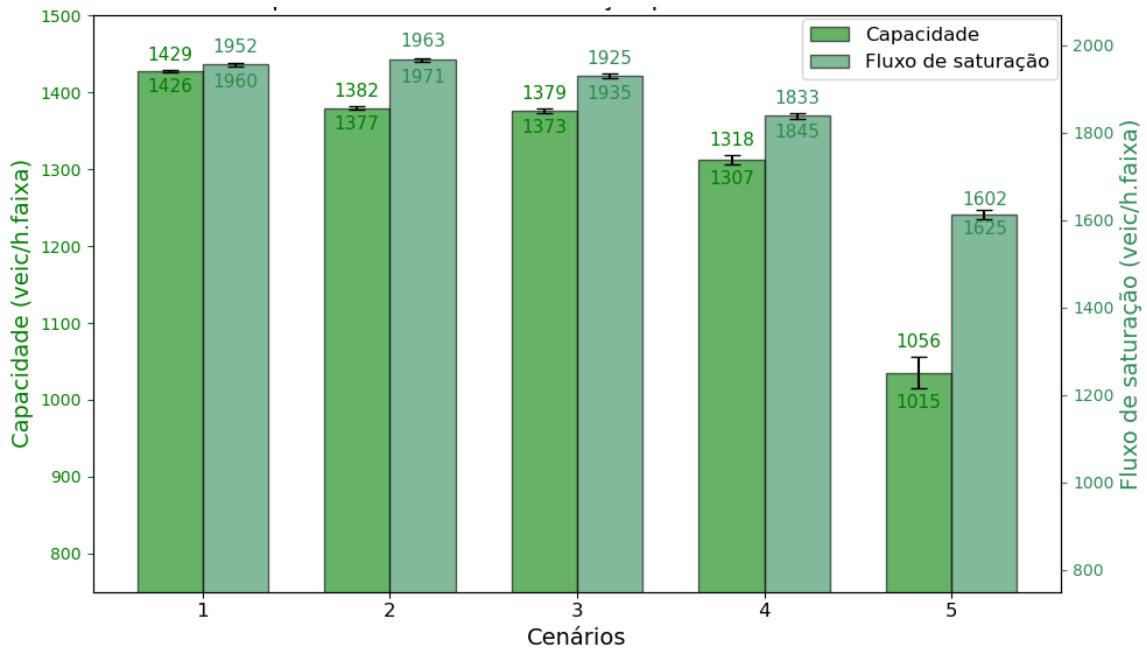
Destaca-se interesse especial à comparação entre os cenários 1 e 3, pois o cenário 1 é com todos os valores default do software e o cenário 3 é com as distribuições de probabilidade estimadas com dados de TR₁ e TR coletados de campo. Os resultados mostram que o uso do TR probabilístico não trouxe diferenças de atraso para os cenários de menor e de média demanda; no cenário de maior demanda, a modelagem probabilística aumentou o atraso médio em 5%.

4.2.1.2 Capacidade e fluxo de saturação no AIMSUN

Para a análise da capacidade e fluxo de saturação, assim como no atraso, foi gerado um gráfico com os valores por cenário (Figura 15). Além disso, as diferenças percentuais entre os cenários estão expostas na Tabela 11e Tabela 12.

Para essas análises, vale relembrar as diferenças entre os cenários. Os cenários 1 e 2 se diferem pela modelagem do TR₁ no cenário 2, enquanto o cenário 1 é com todos os valores default. Além disso, os cenários 3 a 5 do AIMSUN modelam apenas o TR, mantendo o valor de TR₁ fixo e default.

Figura 15 - Capacidade e Fluxo de Saturação - AIMSUN



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nos resultados da Tabela 11, a modelagem probabilística do TR gerou uma diminuição significativa na capacidade, com o cenário 3 divergindo do default (cenário 1) em 19% e com diferenças entre os cenários 2 e 3 de 13%.

Tabela 11 - Comparaçao dos valores de capacidade por cenário no AIMSUN

	1	2	3	4	5
1		-6%	-19%	-33%	-43%
2	6%		-13%	-28%	-39%
3	23%	16%		-17%	-30%
4	48%	40%	21%		-15%
5	75%	65%	42%	18%	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, uma diferença significativa entre os cenários 1 e 2 sugere um impacto do TR1 na capacidade no AIMSUN. Mas o aumento ainda maior na diferença nos demais cenários em relação ao cenário 1 sugere que o TR também apresenta um impacto expressivo na capacidade neste software, sendo ainda mais relevante que o TR1.

Nos resultados do fluxo de saturação, Tabela 12, nota-se que não há relevância na inserção da modelagem probabilística do TR1, mas o TRprob exerceu impacto expressivo, especialmente quando elevamos seu valor médio. Isso ocorre porque o cálculo do fluxo de saturação leva em consideração apenas os veículos da 5^a posição em diante.

Tabela 12-Comparação dos valores de fluxo de saturação por cenário no AIMSUN

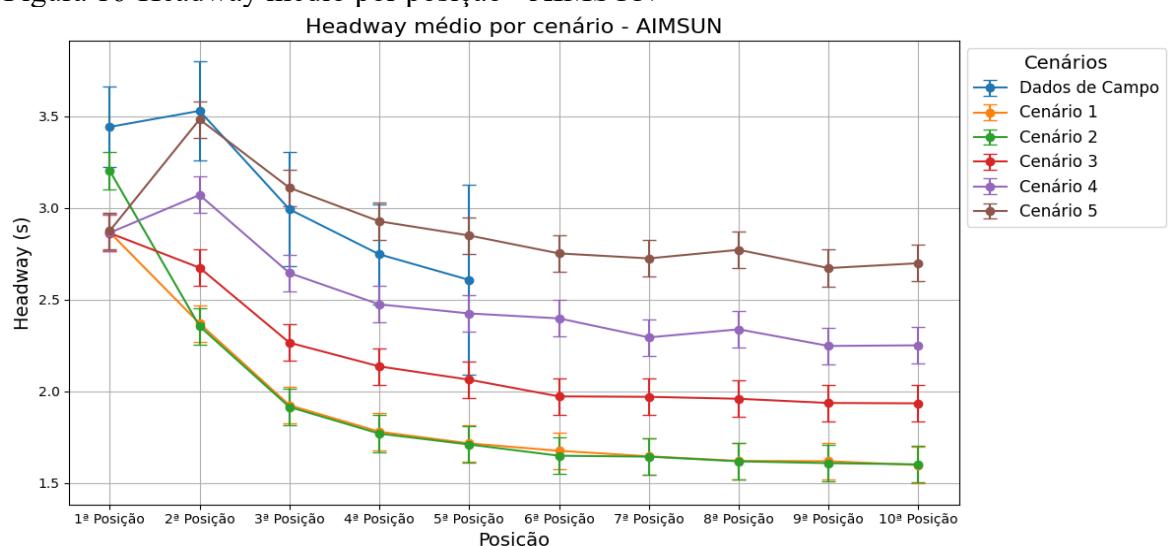
	1	2	3	4	5
1		0%	-13%	-28%	-40%
2	0%		-13%	-28%	-40%
3	15%	15%		-17%	-31%
4	39%	39%	21%		-17%
5	67%	68%	46%	21%	

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.1.3 Headway de descarga no AIMSUN

A fim de avaliar o comportamento do headway (de descarga) médio por posição do veículo na fila, foi elaborado um gráfico com os valores médios de headways por posição em cada cenário simulado, além dos dados obtidos de campo (Figura 16).

Figura 16-Headway médio por posição - AIMSUN



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao analisar o gráfico é possível notar que os dados de campo só foram considerados até a 5^a posição, visto que só existiam 6 observações com veículo na posição 6, o que poderia

gerar muita incerteza na estimativa. Um fato a ser destacado é que a curva de valores médios dos dados de campo foi muito próxima à curva do Cenário 5 ao invés do que era esperado, que seria do Cenário 3. Isso provavelmente ocorreu pela não calibração dos parâmetros comportamentais de car-following, visto que não era objetivo do estudo

Por fim, é necessário esclarecer que o valor médio do headway da primeira posição do cenário 2 ter sido maior, enquanto todos os outros foram praticamente iguais é devido ao fato que o TR1 adotado no cenário 2 foi o TR1prob de média 1,9s, enquanto nos demais cenários foi o valor default de 1,6s.

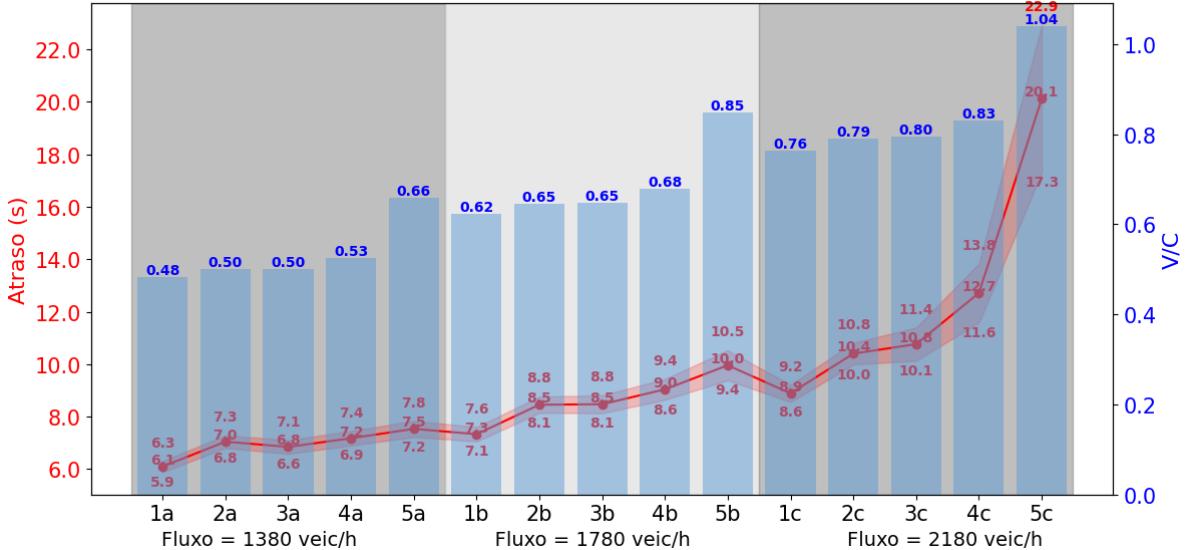
4.2.2 *Impacto do TR_{prob} no VISSIM*

4.2.2.1 Atraso no VISSIM

Assim como no AIMSUN, um compilado dos resultados de atraso e v/c, por nível de demanda de todos os cenários propostos para o VISSIM está demonstrado na Figura 17.

Figura 17 - Compilado de resultados de desempenho do VISSIM

Resultados de desempenho por cenário - Vissim



Fonte: Elaborada pelo autor.

Visualmente é possível notar que as maiores diferenças, tanto no atraso quanto no valor de V/C ocorrem no cenário 5, em especial nas situações de maior demanda. Porém, para uma análise mais aprofundada, foram realizados testes t pareados para verificar se há diferença significativa entre os resultados de atraso, capacidade e fluxo de saturação entre os cenários.

As diferenças percentuais entre os cenários estão representados na Tabela 13, Tabela 14, Tabela 15. As caixas em cinza representam as comparações em que o resultado do teste t não foi significativo. Para a leitura das matrizes, o cálculo em cada célula foi feito de acordo com a equação 4 seguinte:

$$Diferença\ percentual = \frac{Média_{coluna} - Média_{linha}}{Média_{linha}} \times 100 \quad (4)$$

Assim, na Tabela 13, por exemplo, o valor de 16% na primeira linha e segunda coluna significa que o atraso do cenário 2a foi 16% maior do que atraso do cenário 1a.

Tabela 13- Comparaçao dos valores de atraso por cenário p/ fluxo de 1380 veic/hora no VISSIM

	1a	2a	3a	4a	5a
1a		16%	12%	18%	24%
2a	-14%		-3%	2%	7%
3a	-11%	3%		5%	10%
4a	-15%	-2%	-5%		5%
5a	-19%	-6%	-9%	-5%	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 14 - Comparaçao dos atrasos por cenário p/ fluxo de 1780 veic/h no VISSIM

	1b	2b	3b	4b	5b
1b		15%	16%	23%	36%
2b	-13%		0%	7%	18%
3b	-13%	0%		7%	18%
4b	-19%	-6%	-6%		10%
5b	-26%	-15%	-15%	-9%	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 15 - Comparaçao dos atrasos por cenário p/ fluxo de 2180 veic/hora no VISSIM

	1c	2c	3c	4c	5c
1c		17%	21%	43%	126%
2c	-15%		4%	22%	93%
3c	-17%	-3%		18%	87%
4c	-30%	-18%	-15%		58%
5c	-56%	-48%	-46%	-37%	

Fonte: Elaborada pelo autor.

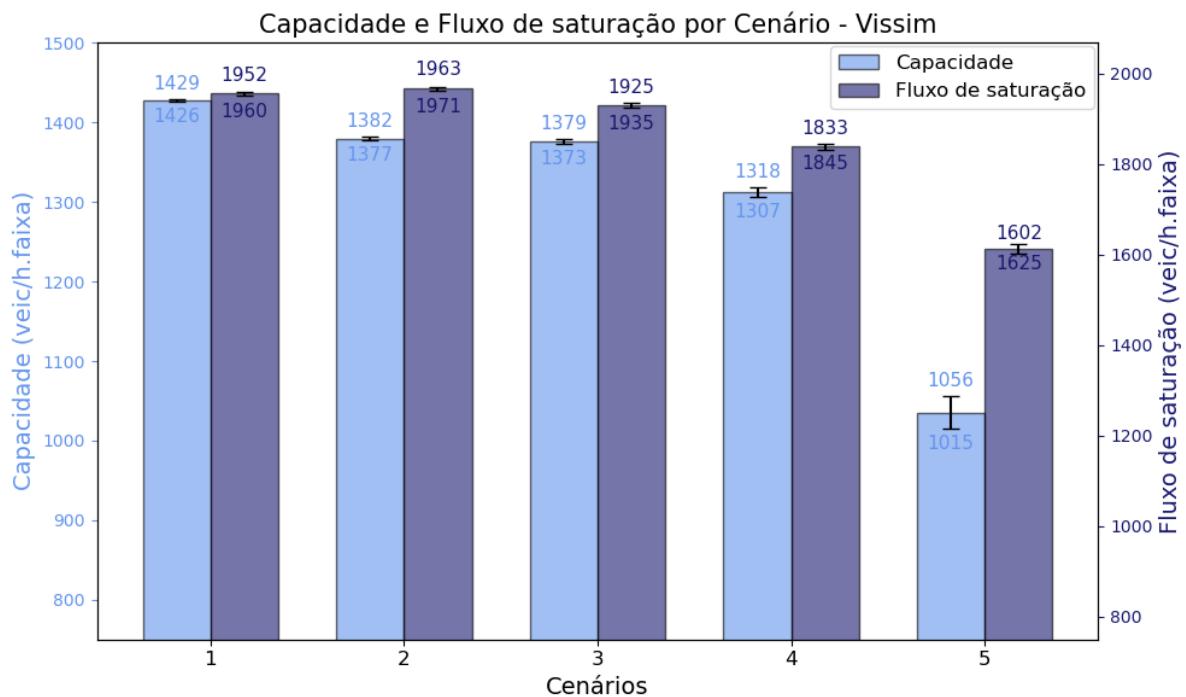
Na Tabela 14 percebe-se que não houve diferença estatística apenas entre os cenários 2b e 3b, que são os cenários com fluxo de 1.780 veículos/h e que se diferenciam pela não aplicação de TR_{prob} no cenário 2, enquanto no cenário 3 é aplicado. Porém, mesmo havendo uma diferença entre seus valores de média nos demais níveis de demanda, os cenários 2 e 3 apresentaram diferenças pequenas do ponto de vista prático (3%, 0% e -3%).

Isso sugere pouco impacto da modelagem probabilística de TR no atraso, pelo menos para os casos em que seja implementada a modelagem de TR_1 via parâmetro “Reaction after end of red” e que o valor médio do TR seja inferior a 2s. Por outro lado, caso o valor médio de TR seja igual ou maior que 2s (cenários 4 e 5), os atrasos aumentaram de 22% até 93% em relação ao cenário 2 na situação de maior fluxo (Tabela 15). Em comparação com cenário 1, em que o TR_{1prob} não é aplicado, os aumentos no atraso vão de 21% se considerarmos o TR de campo (cenário 3) até 126%, para TR_{prob} médio de 2,5s.

4.2.2.2 Capacidade e fluxo de saturação no VISSIM

Para a análise da capacidade e fluxo de saturação, assim como no atraso, foi gerado um gráfico com os valores por cenário (Figura 18). Além disso, as diferenças percentuais entre os cenários estão expostas na Tabela 16 e Tabela 17.

Figura 18 - Capacidade e Fluxo de saturação por cenário- VISSIM



Fonte: Elaborada pelo autor.

Similar ao que aconteceu na análise dos atrasos, a comparação dos cenários 2 e 3 não resultaram em diferença estatística, o que sugere não haver impacto significativo do ponto de vista estatístico da modelagem probabilística do TR₁ na capacidade simulada (Tabela 16). Além disso, diferente do caso do atraso, os efeitos da modelagem de TR_{1prob} (cenário 2) ou de ambos TR_{1prob} e TR_{prob} (cenário 3) em comparação às simulações default são de pequena redução na capacidade (3% e 4%). Porém, o aumento do valor médio de TR_{prob} para até 2,5s reduziu em 27% a capacidade da via na simulação.

Tabela 16 - Comparaçao das capacidades por cenário no VISSIM

	1	2	3	4	5
1		-3%	-4%	-8%	-27%
2	3%		0%	-5%	-25%
3	4%	0%		-5%	-25%
4	9%	5%	5%		-21%
5	38%	33%	33%	27%	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na análise do fluxo de saturação, na Tabela 17., os cenários 2 e 3 não exerceram efeito em comparação com o cenário 1. Isso era esperado para o caso do cenário 2, pois o fluxo de saturação não depende do TR1. O TR_{prob} médio alto, de 2,5s, resultou em uma redução de 18% no fluxo de saturação da via.

Tabela 17 - Comparaçao dos valores de fluxo de saturação por cenário no VISSIM

	1	2	3	4	5
1		1%	-1%	-6%	-18%
2	-1%		-2%	-7%	-18%
3	1%	2%		-5%	-16%
4	6%	7%	5%		-12%
5	21%	22%	20%	14%	

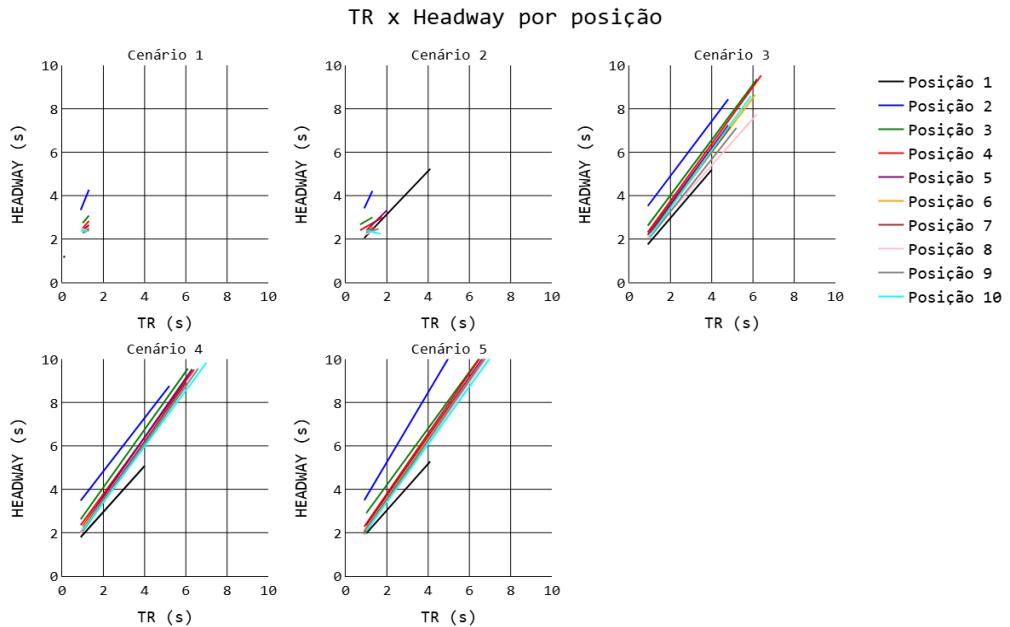
Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.2.3 Headway de descarga no VISSIM

Para avaliar o efeito dos TRs nos headway de descarga simulados, a Figura 19 mostra um gráfico, para cada cenário, com as retas de tendência ajustadas de *headway* x TR, por

posição da fila, até a 10^a posição. A demanda veicular na simulação foi de 10.000 veículos/h, para assegurar que todos os *headways* simulados são de descarga.

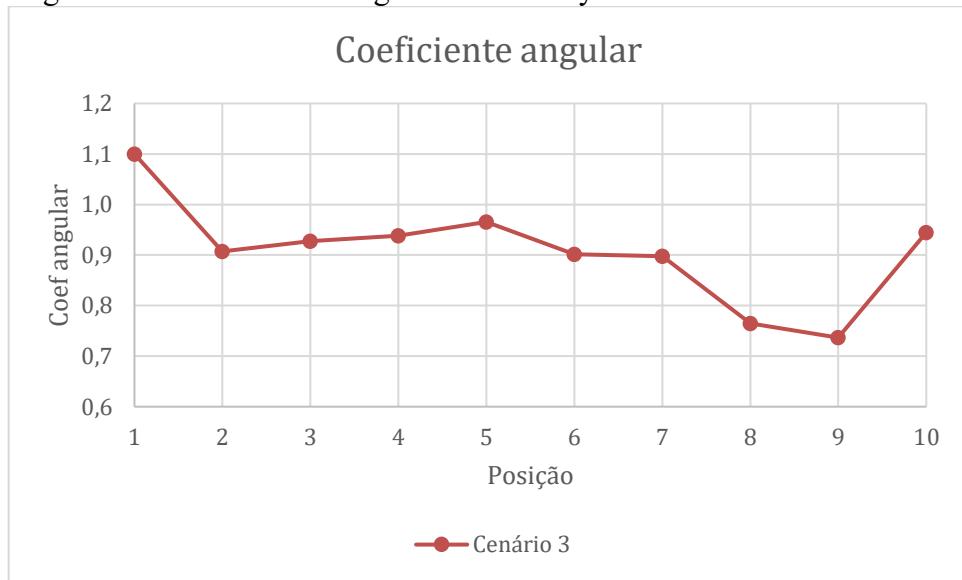
Figura 19 - Linhas de Tendência HEADWAY x TR, por posição - VISSIM



Fonte: Elaborada pelo autor.

Além disso, foi gerado um gráfico com os coeficientes angulares do cenário 3, por posição. Os resultados estão expostos na Figura 20.

Figura 20 - Coeficientes Angulares Headway x TR – Cenário 3

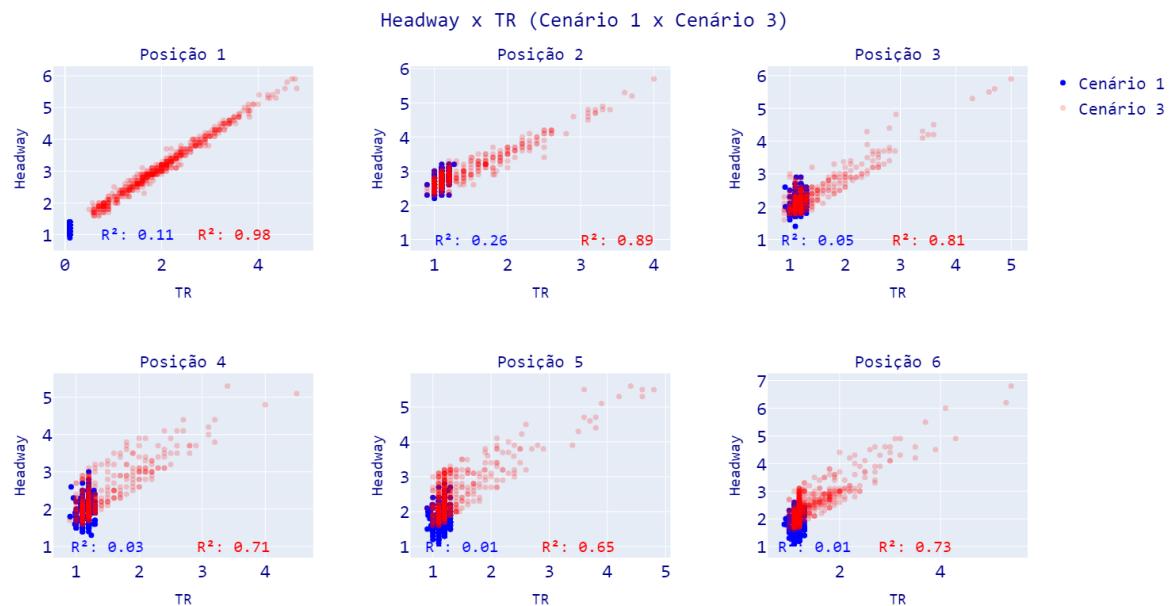


Fonte: Elaborada pelo autor.

No cenário 1, todas as retas estão bem menores que nos demais cenários porque os valores default de TR_1 e de TR do programa são menores. No cenário 2, como sua única diferença para o cenário 1 é a modelagem probabilística de TR_1 , a única reta que se destaca é a referente à primeira posição. Para os outros cenários, houve um padrão em que as todas as retas ficaram próximas entre si e com angulações similares, mas com a reta da posição 2 tendendo a ficar levemente acima das demais. No cenário 3, de maior interesse nesse estudo, todas as retas possuem praticamente o mesmo coeficiente angular, variando de 0,8 a 1,2 s, como mostra a figura 20. Isso significa que, em temos gerais, cada 1 segundo a mais de TR implica num aumento médio de 1,0 s no headway, independentemente da posição.

Ao analisar os gráficos com os coeficientes, nota-se que, para todos os cenários, o aumento do TR causa aumento no *headways* de descarga, o que era esperado. Os coeficientes angulares mostram que o aumento do headway em função do aumento de TR é praticamente constante entre as posições, porém, com exceção da segunda posição, a modelagem de TR apresentou um maior impacto do TR nos valores de headway, especialmente em posições mais distantes. Enquanto os coeficientes lineares demonstram que, para valores de TR tendendo a 0, o default do VISSIM apresenta valores mais elevados de headway em relação a simulações que modelam o TR .

Figura 21 - Comparação Headways Cenário 1 x Cenário 3, no VISSIM



Fonte: Elaborada pelo autor.

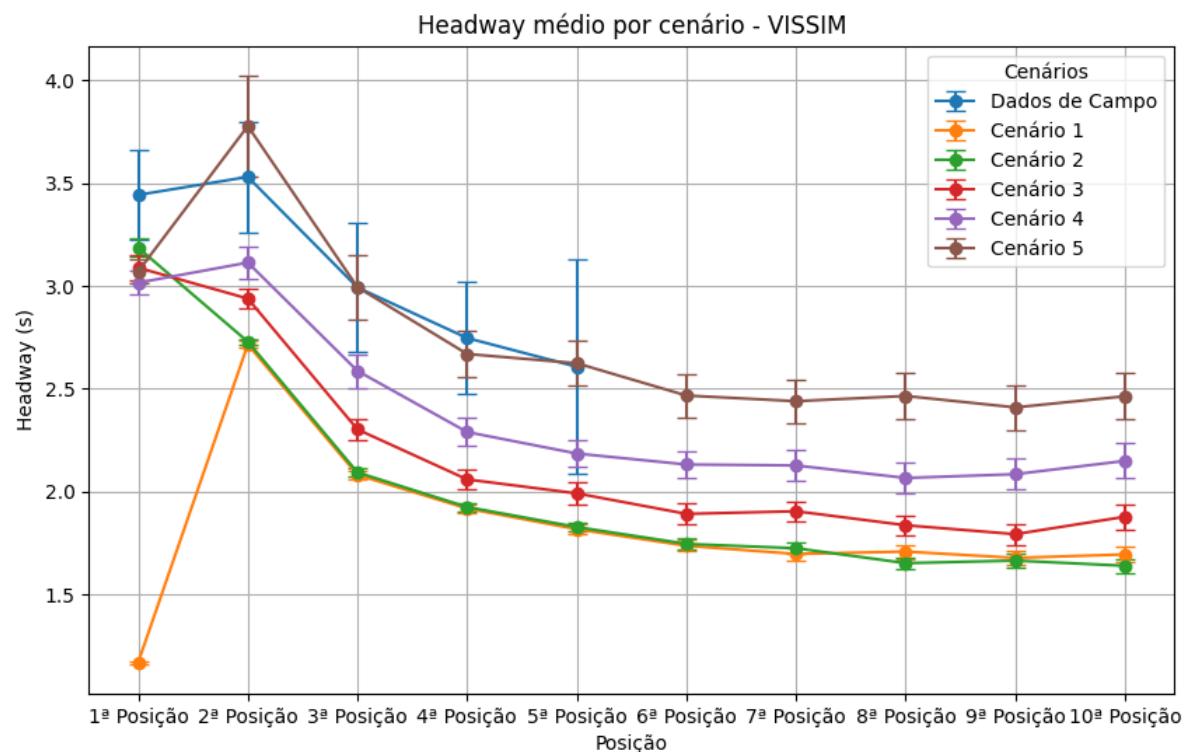
Ademais a fim de se obter os resultados do objetivo 2 deste estudo, que é estimar o efeito do TR no headway, considerando a posição do veículo na fila, foram feitos gráficos de

dispersão (com seus respectivos R^2) entre os valores dessas variáveis, dos cenários 1 e 3, que representam, respectivamente, a microssimulação com TR1 e TR default e a que modela ambos probabilisticamente. A comparação está exposta na Figura 22.

Como é possível visualizar, há grandes diferenças entre os dois cenários, tanto entre as nuvens de pontos quanto entre os valores de R^2 . Em todas as posições de fila, o cenário 3 apresentou R^2 maior, indicando que a modelagem probabilística do TR apresenta uma maior relação linear TR x *headway* do que a modelagem *default* do programa, assim como os valores elevados de R^2 no cenário 3 corroboram com estudos anteriores que mostraram efeito positivo do TR no *headway*.

Para avaliar o comportamento do headway de descarga médio por posição, foi elaborado um gráfico com os valores médio obtidos por posição em cada cenário, além dos dados obtidos de campo e expostos na Figura 23. Os dados de campo só foram considerados até a 5 posição porque só existiam 6 observações na posição 6, o que poderia gerar muita incerteza na estimativa

Figura 22 - Headway de descarga médio por posição - VISSIM



Fonte: Elaborada pelo autor.

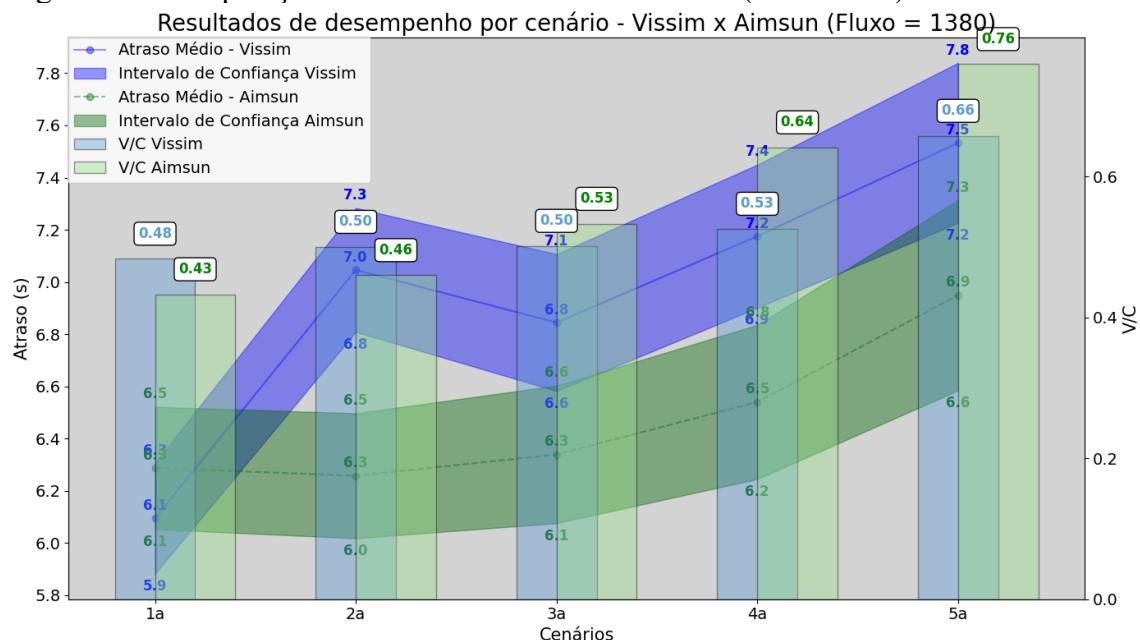
Ao analisar o gráfico é percebe-se que todas as curvas seguem o mesmo padrão, com a maior diferença no cenário 1, que apresentou o headway médio da primeira posição muito

inferior, devido ao valor default de TR1 no VISSIM ser de 0,1s. Um fato a ser destacado é que a curva de valores médios dos dados de campo foi muito próxima à curva do cenário 5, e não do cenário 3. Isso provavelmente ocorreu pela não calibração dos parâmetros comportamentais do simulador, visto que não era objetivo do estudo.

4.2.3 Diferenças dos resultados VISSIM x AIMSUN

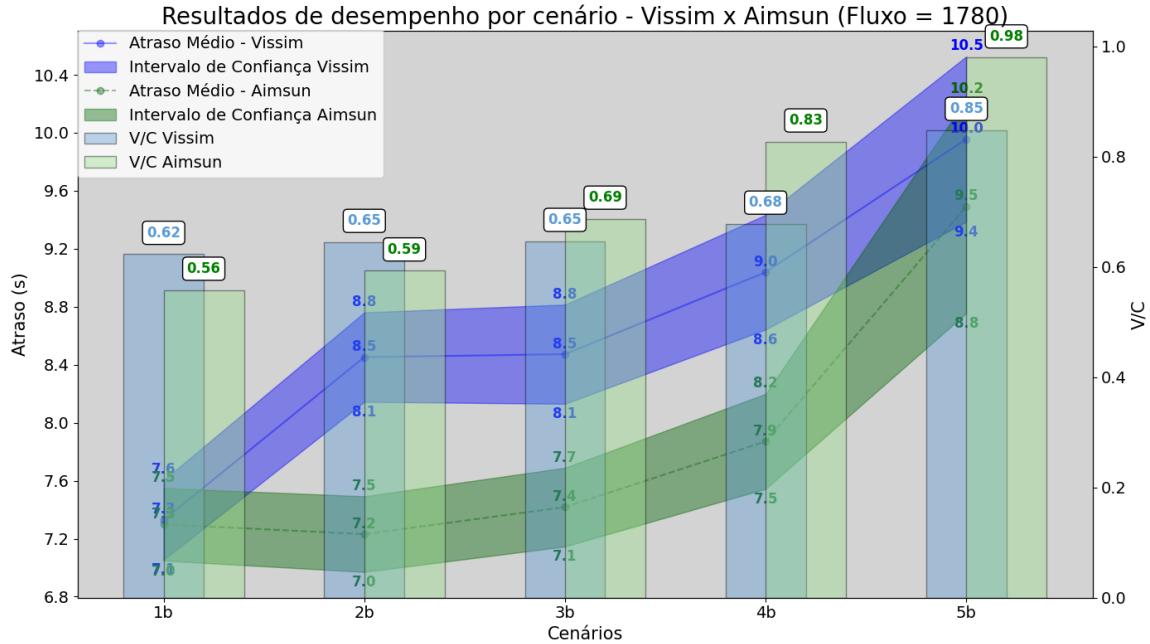
Neste tópico será feita uma comparação entre os resultados referente aos efeitos que os cenários causaram dos microssimuladores. Na Figura 24, Figura 25 e Figura 26 são apresentados os gráficos sobrepostos com os valores de atraso (curvas) e de V/C (barras) de ambos os programas. Com o padrão de cor azul para o VISSIM e o de verde para o AIMSUN.

Figura 23 - Comparação resultados VISSIM x AIMSUN (1380veic/h)



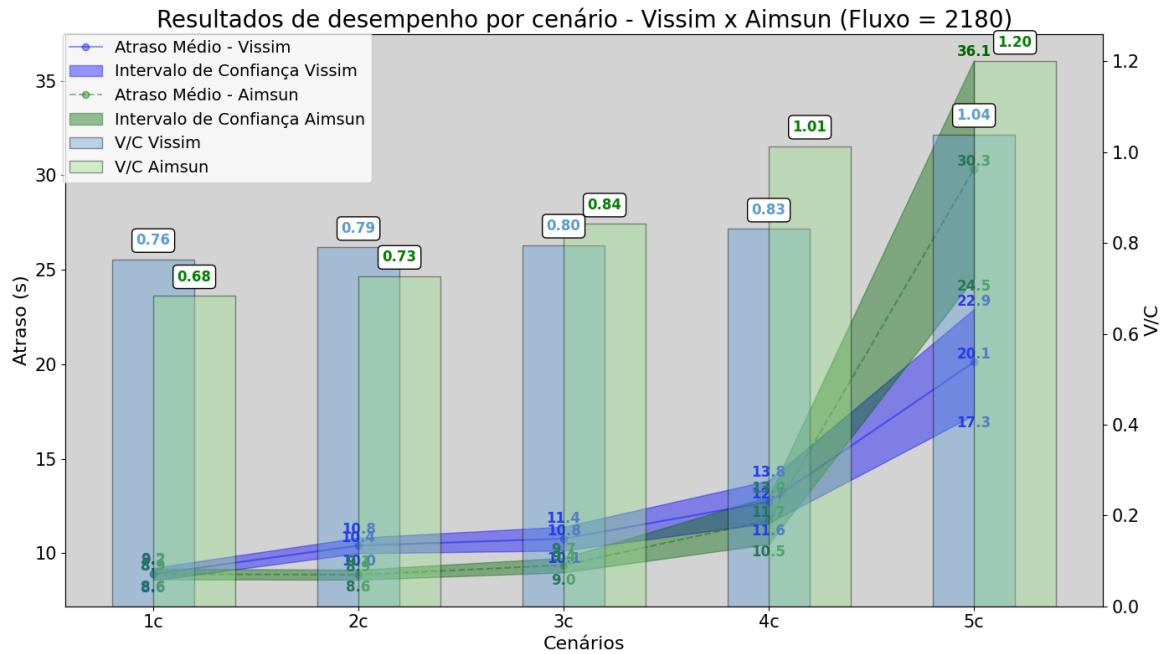
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24 - Comparação resultados VISSIM x AIMSUN (1780veic/h)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 25 - Comparação resultados VISSIM x AIMSUN (2180veic/h)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na análise da situação de demanda média, que representa a demanda de campo, pode-se destacar:

- No cenário 1b, que é o cenário default de ambos os programas, os valores de atraso foram praticamente idênticos entre ambos os pacotes computacionais.

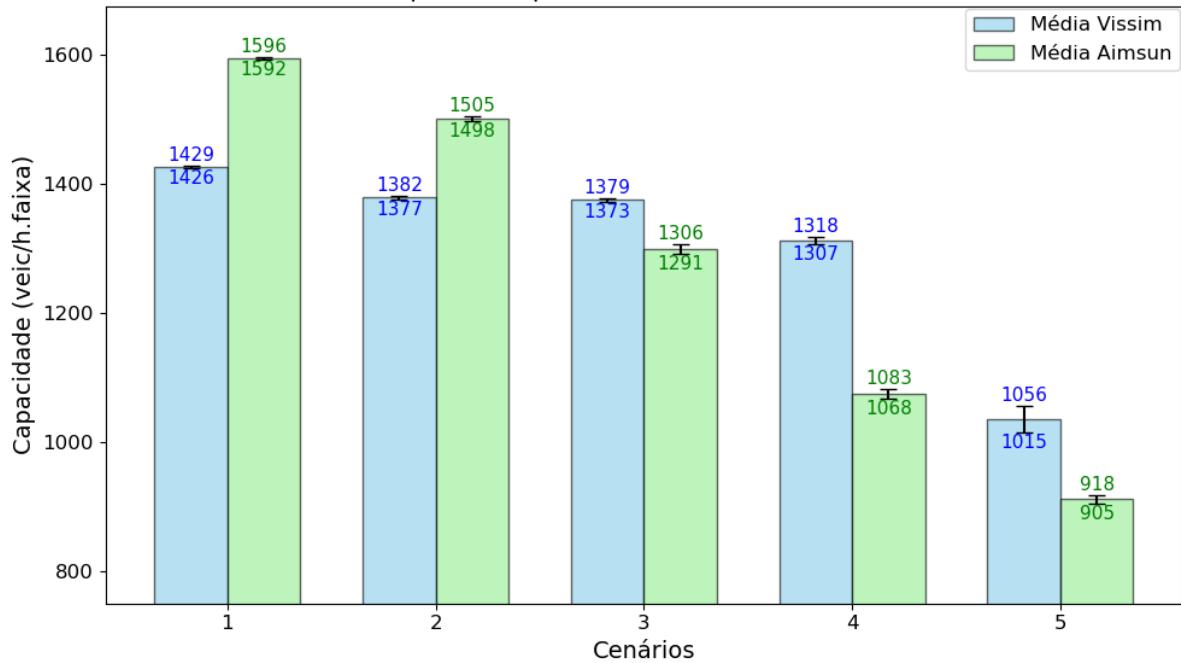
Para os demais cenários, de 2b a 5b, as diferenças entre os atrasos médios entre os dois simuladores foram similares, com o valor do Vissim aproximadamente 1,0 s maior que o do Aimsun;

- A passagem do cenário 1 para o cenário 2 (inserção TR_{1prob}) ocasionou aumento no atraso apenas no Vissim, ainda assim pequeno, de 7,3 s para 8,5 s;
- A passagem do cenário 2 para o cenário 3 (inserção TR_{prob}) praticamente não afetou o atraso em nenhum simulador (apenas de 7,2 para 7,4 s no Aimsun);
- Com relação ao V/C, o do VISSIM foi superior para os cenários 1 e 2, e o do Aimsun foi superior nos cenários de 3 a 5, o que sugere uma maior sensibilidade do AIMSUN ao TR;
- O cenário 2 (TR_{1prob} e TR default) gerou resultados similares aos do cenário 1, com a diferença que o VISSIM apresentou um atraso médio de 1s maior que o AIMSUN em todos os três níveis de demanda (2a, 2b e 2c). Isso pode se justificar pelo fato de que, no AIMSUN, entre o cenário 1 e 2 há um aumento na média de TR_1 de 0,3s, e no VISSIM, o aumento é de 1,8s;

Esses resultados encontrados para a demanda média também são, em menor ou maior grau, observados para os casos de demanda baixa (Figura 24) e de demanda alta (Figura 26). Com relação à capacidade e ao fluxo de saturação, as comparações dos simuladores estão na Figura 27 e Figura 28. Pode-se destacar que nos cenários 1 e 2, houve o mesmo padrão tanto para a capacidade quanto para o fluxo de saturação, com diferenças pouco significativas entre os cenários. O VISSIM resultou em menores valores de capacidade e de fluxo de saturação que o AIMSUN. Porém, isso se inverte ao longo dos cenários, com o VISSIM passando a apresentar maiores valores nos últimos cenários.

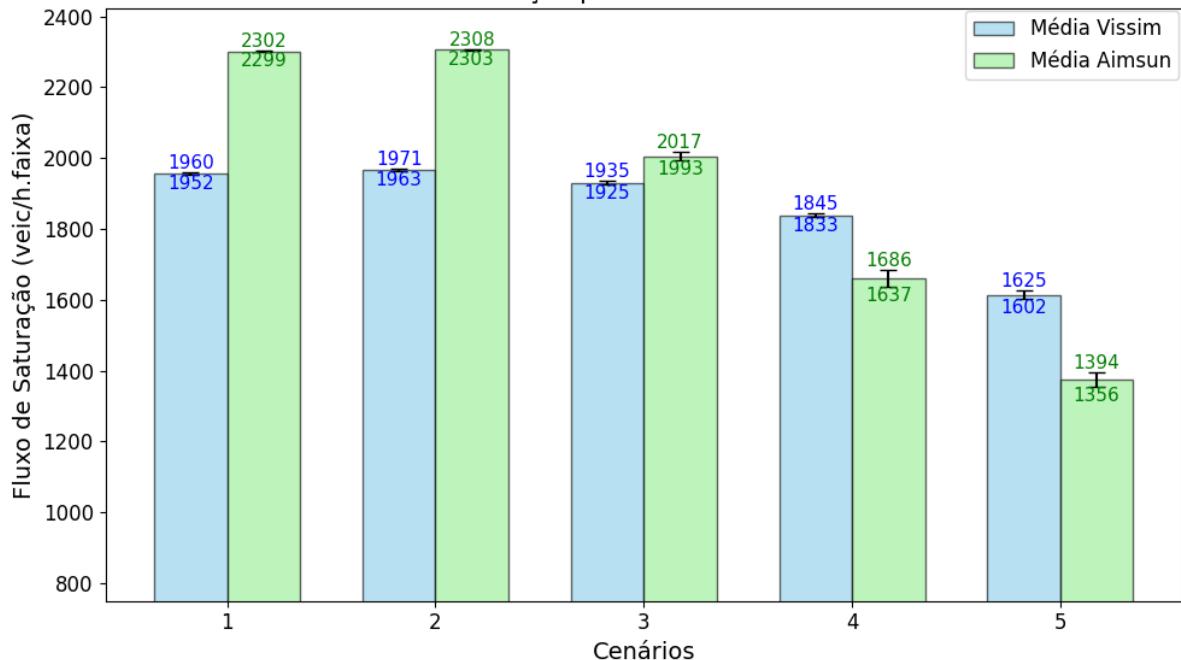
Por fim, essas comparações, somadas aos resultados apresentados nos tópicos anteriores sugerem um baixo efeito da modelagem de TR_1 na capacidade e no fluxo de saturação, porém um forte efeito da modelagem TR no software AIMSUN especialmente em cenários de maior demanda. Além disso, o software AIMSUN apresentou uma maior sensibilidade, em sua capacidade e fluxo de saturação, ao aumento de TR que o VISSIM.

Figura 26-Comparação resultados VISSIM x AIMSUN (Capacidade)
Capacidade por Cenário - Vissim x Aimsun



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 27 - Comparação resultados VISSIM x AIMSUN (Fluxo de saturação)
Fluxo de Saturação por Cenário - Vissim x Aimsun



Fonte: Elaborada pelo autor.

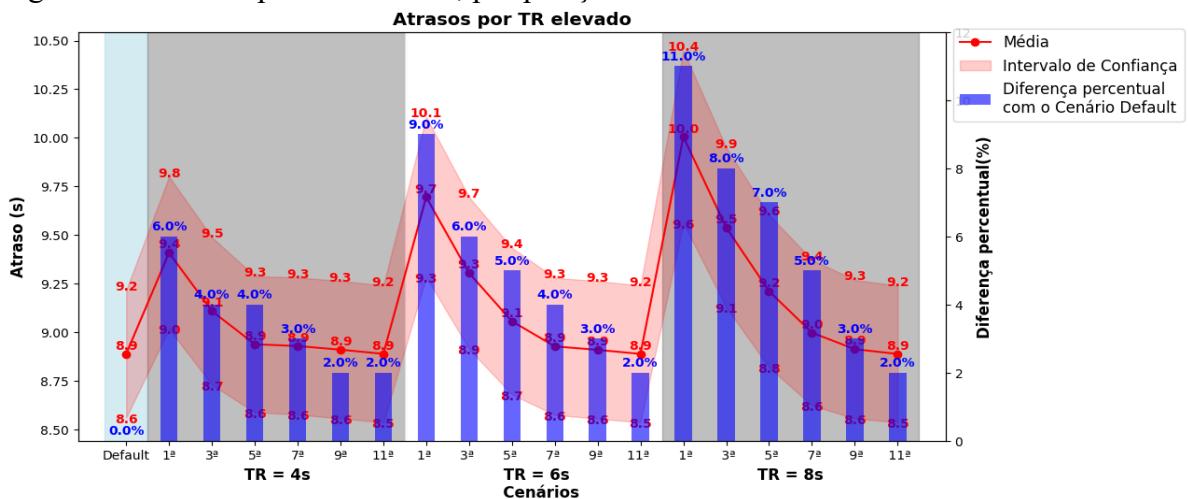
4.3 Impacto do TR elevado no Tráfego

Seguindo o método proposto, foram analisados os resultados de atraso, capacidade e fluxo de saturação. Entretanto, como o impacto dos cenários propostos de TR elevado na capacidade e no fluxo de saturação foram muito baixos (aumentos de até 3%), este tópico apresenta apenas os resultados de atraso, representados na Figura 29. Lembra-se que o TR elevado foi aplicado a um único veículo da fila, a cada 3 ciclos semafórico. Como exemplo de interpretação do gráfico, o atraso médio das simulações em que o TR elevado de 4s foi aplicado ao primeiro veículo da fila a cada 3 ciclos foi de 9,8s.

Como é possível visualizar no gráfico, os maiores impactos ocorreram com o TR elevado na 1^a posição e, como esperado, quanto maior o TR, maior o atraso. O efeito do TR elevado no atraso diminuiu com o aumento da posição do veículo na fila. Considerando que apenas aumentos no atraso maiores que 5% são consideráveis, o TR elevado de 4s só impactaram quando ocorreram na 1^a posição, enquanto valores mais altos de TR (6,0 ou 8,0 s) impactaram o atraso médio total se ocorrem até a 5^a posição na fila.

Os motivos para a redução do efeito do TR elevado no atraso com o aumento da posição na fila em que o TR elevado ocorre podem ser: para posições de fila maiores, há menos veículos atrás, portanto menos veículos afetados; e para posições de filas maiores, há uma maior distância a ser percorrida até o semáforo, portanto maior proporção do tempo em que o veículo trafegará com velocidade desejada, o que pode compensar parte do tempo perdido ocasionado pelo TR elevado.

Figura 28 - Atrasos por TR elevado, por posição na fila



Fonte: Elaborada pelo autor.

5 CONCLUSÕES

Embora a literatura apresente várias pesquisas sobre o tempo de resposta (TR) de motoristas, especialmente em relação ao tempo de resposta do primeiro veículo em fila (TR₁), há uma lacuna significativa quanto ao impacto dessa variável nas interseções semaforizadas, especialmente no contexto da fluidez do tráfego. Este estudo teve como objetivo preencher essa lacuna ao modelar e analisar o impacto do TR dos motoristas em interseções semaforizadas utilizando microssimulação com os softwares AIMSUN e VISSIM.

Para atingir esse objetivo, foram coletados dados de TR e de *headways* em uma interseção na cidade de Fortaleza, realizada a modelagem da distribuição de probabilidade do TR e sua implementação nos simuladores AIMSUN e VISSIM. A coleta de dados foi realizada em Fortaleza, onde foram filmados e analisados os tempos de resposta dos motoristas nas diferentes faixas de tráfego. Além disso, foram utilizados testes de aderência para identificar as distribuições de probabilidade que melhor representassem os TRs coletados, com a distribuição log-normal se destacando como a mais adequada.

Em relação aos resultados, a modelagem probabilística demonstrou que, quando o TR foi implementado nos simuladores, o desempenho do tráfego foi prejudicado, com maiores atrasos, além de uma diminuição da capacidade das interseções. Além disso, foi possível verificar, separadamente, os impactos da modelagem de TR₁ e de TR, tendo o primeiro um maior impacto em medidas como atraso e capacidade, o que vai de acordo com estudos anteriores, mas o TR também apresentou efeitos nessas medidas e desempenho, além do impacto no fluxo de saturação da via.

Os cenários simulados com diferentes frequências e durações de TR elevado revelaram que quanto maior a duração e a frequência do TR elevado, maior o impacto nas métricas de desempenho do tráfego. Isso foi especialmente observado nos cenários onde o TR elevado ocorreu nas primeiras posições da fila, em que os veículos não possuíam espaço suficiente para recuperar o tempo perdido. No entanto, para os veículos em posições mais avançadas, o impacto do TR elevado foi mitigado, possivelmente devido à maior liberdade para o condutor tentar compensar o tempo perdido com uma maior aceleração.

A comparação entre os simuladores VISSIM e AIMSUN também mostrou diferenças importantes na sensibilidade ao TR. O AIMSUN demonstrou maior sensibilidade ao aumento do TR, refletindo maiores atrasos e, consequentemente, filas mais longas em relação ao VISSIM, o que sugere que o tratamento do TR nesses simuladores pode influenciar significativamente os resultados das simulações.

Diante dos resultados obtidos, este estudo reforça a importância de se modelar adequadamente o TR em estudos de tráfego para obter previsões mais realistas do desempenho em interseções semaforizadas. Além disso, sugere-se que estudos futuros ampliem a análise para incluir diferentes condições de tráfego e veículos, como motocicletas e veículos pesados, e considerem coletas mais robustas de TR para refinar ainda mais os modelos de distribuição probabilística.

Embora a calibração seja uma etapa essencial em estudos de simulação de tráfego para aumentar a aderência dos modelos à realidade, esta pesquisa opta por avaliar e comparar diretamente os resultados obtidos pelos softwares VISSIM e AIMSUN sem a realização desse ajuste. Essa escolha se justifica pelo interesse em observar o comportamento padrão dos modelos em suas configurações iniciais, refletindo o desempenho e a lógica interna de cada ferramenta sob as mesmas condições de demanda veicular.

Ao realizar essa comparação sob cenário default, busca-se compreender se existem diferenças estruturais ou sistemáticas entre os dois simuladores que possam influenciar a interpretação dos resultados, mesmo antes de qualquer adaptação ao cenário real. Dessa forma, os achados deste trabalho podem servir como base para futuros estudos de calibração, além de fornecer subsídios a pesquisadores e profissionais na escolha da ferramenta mais adequada às suas necessidades específicas.

Por fim, este trabalho abre oportunidades para investigações futuras, como:

- a) o impacto da modelagem do TR em diferentes tipos de veículos,
- b) a análise do comportamento dos motoristas frente a atrasos prolongados,
- c) análise da modelagem do TR em outros softwares de microssimulação do mercado.

REFERÊNCIAS

AIMSUN. **Aimsun Next Users Manual - next version 24.0.1.** [S.l.], 2022. Disponível em: <https://docs.AIMSUN.com/next/24.0.1/>, Acesso em: 07 fev, 2024.

AGERHOLM, Niels; TØNNING, Charlotte; MADSEN, Tanja K. O.; BAHNSEN, Chris H.; MOESLUND, Thomas B.; LAHRMANN, Harry S. Road user behaviour analyses based on video detections: status and best practice examples from the RUBA software. In: **24th ITS World Congress (ITS 2017)**, 2017, Montreal, Canada. Proceedings of ITS World Congress, p. 1-10, 2017.

AMRUTSAMANVAR, R. B.; MUTHURAJAN, B. R.; VANAJAKSHI, L. D. Extraction and analysis of microscopic traffic data in disordered heterogeneous traffic conditions. **Transportation letters**, [s.l.], v. 13, n. 1, p. 1-20, 2021. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19427867.2019.1695563>, Acesso em: 07 out, 2024.

BARMPOUNAKIS, E. N.; VLAHOGIANNI, E. I.; GOLIAS, J. C. Vision-based multivariate statistical modeling for powered two-wheelers maneuverability during overtaking in urban arterials. **Transportation Letters**, [s.l.], v. 8, n. 3, p. 167-176, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1942786722002375>, Acesso em: 04 mar, 2024.

ÇALIŞKANELLI, Pelin; TANYEL, Serhan. Investigating the driver's response time at signalized intersections. **Transport**, [s.l.], v. 33, n. 2, p. 380-388, 2018. Disponível em: <https://journals.vilniustech.lt/index.php/Transport/article/view/191>, Acesso em: 05 de nov, 2023.

COLELLA, Diogo Artur Tocacelli. **Comportamento dos motoristas em interseções semafORIZADAS**. 2008. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Operação de Sistemas de Transporte) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. doi:10.11606/D.18.2008.tde-07042008-085004. Acesso em: 02 jul. 2024.

DAS, Sanhita et al. Multivariate analysis on dynamic car-following data of non-lane-based traffic environments. **Transportation in Developing Economies**, [s.l.], v. 5, p. 1-13, 2019.

FITCH, Gregory; SOCCOLICH, Susan; GUO, Feng; McCLAFFERTY, Julie; OLSON, Rebecca; PÉREZ-TOLEDANO, Miguel; HANOWSKI, Richard; HANKEY, Jon; DINGUS, Thomas. **The impact of hand-held and hands-free cell phone use on driving performance and safety-critical event risk**. [s.l.: s.n.], 2013.

FONTES, Diego Barbosa; DE ARAÚJO, Alessandro Macêdo; DE CASTRO NETO, Manoel Mendonça. Modelagem probabilística do tempo de resposta de motoristas em interseções semafORIZADAS no VISSIM. **Transportes**, [s.l.], v. 30, n. 1, p. 2501-2501, 2022.

HURWITZ, David S. et al. Implications of distracted driving on start-up lost time for dual left-turn lanes. **Journal of transportation engineering**, [s.l.], v. 139, n. 9, p. 923-930, 2013.

- LI, Zhenlong et al. Measurement and comparative analysis of driver's perception–reaction time to green phase at the intersections with and without a countdown timer. **Transportation research part F: traffic psychology and behaviour**, [s.l.], v. 22, p. 50-62, 2014.
- LI, Honglong; PREVEDOUROS, Panos D. Detailed observations of saturation headways and start-up lost times. **Transportation Research Record**, [s.l.], v. 1802, n. 1, p. 44-53, 2002.
- MENENDEZ, Oisy Hernandez; SILVA, Natalia Assunção Brasil; PITANGA, Heraldo Nunes. Análise estatística aplicada à gestão do tráfego em interseção semafórica. **Research, Society and Development**, [s.l.], v. 11, n. 3, p. e0511326178-e0511326178, 2022.
- MITROI, Ionuț-Sorin; CIOBÎCĂ, Ana-Maria; POPA, Mihaela. Car-following models comparison between models used by VISSIM and AIMSUN. **UPB Sci. Bull. Ser. D**, [s.l.], v. 78, p. 71-82, 2016.
- MURAT, Yetis Sazi; CETIN, Murat. A new perspective for saturation flows at signalized intersections. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, [s.l.], v. 63, n. 1, p. 296-307, 2019.
- NOURZAD, S. H. H.; SALVUCCI, D. D.; PRADHAN, A. Computational modeling of driver distraction by integrating cognitive and agent-based traffic simulation models. In: **Computing in Civil and Building Engineering 2014**, 2014, Orlando, Fl. Anais [...], [s.l.], p. 1885–1892, 2014.
- RODRIGUES, F. Avaliação de Interseções Semaforizadas Utilizando Softwares de Microssimulação: Comparação entre Metodologias Utilizadas. In: **21º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, 2007, Rio de Janeiro. Anais do XXI ANPET, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- WOJKE, Nicolai; BEWLEY, Alex; PAULUS, Dietrich. Simple online and realtime tracking with a deep association metric. In: **2017 IEEE international conference on image processing (ICIP)**. [s.l.], p. 3645-3649, 2017. DOI: 10.1109/ICIP.2017.8296962.
- XIE, Dong-Fan; ZHU, Tai-Lang; LI, Qian. Capturing driving behavior heterogeneity based on trajectory data. **International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing**, [s.l.], v. 11, n. 03, p. 2050023, 2020.