

Modelagem probabilística do tempo de resposta de motoristas em interseções semaforizadas no VISSIM

Probabilistic modelling of drivers response time in signalized intersections using VISSIM

Diego Barbosa Fontes¹, Alessandro Macêdo de Araújo², Manoel Mendonça de Castro Neto³

¹Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, diegobarcarneiro@gmail.com

²Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, alessandro.araujo@det.ufc.br

³Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, manoel@det.ufc.br

Recebido:

19 de novembro de 2020

Aceito para publicação:

3 de dezembro de 2021

Publicado:

15 de março de 2022

Editor de área:

José Reynaldo Setti

Palavras-chave:

Tempo de reação.

Microsimulação.

Atraso veicular.

Capacidade de interseções.

Keywords:

Reaction time.

Microsimulation.

Vehicle delay.

Intersection capacity.

DOI:10.14295/transportes.v30i1.2501



RESUMO

O principal objetivo deste trabalho foi implementar, no microssimulador VISSIM, um modelo probabilístico para o tempo de resposta dos motoristas de uma aproximação semaforizada e avaliar os efeitos dessa modelagem no desempenho do tráfego. A partir de dados de uma interseção semaforizada localizada na cidade de Fortaleza foram realizadas análises estatísticas do tempo de resposta por posição do veículo na fila, por faixa de tráfego, por tipo de veículo e por movimento. Essas análises embasaram a modelagem do tempo de resposta pela distribuição de probabilidade encontrada, a log-normal, a qual foi implementada no VISSIM por meio de algoritmo externo de programação desenvolvido em Python. Para avaliar a importância dessa implementação, foram comparados os resultados de atraso médio, de tamanho de fila médio e de capacidade com os resultados das simulações realizadas com a modelagem *default* do VISSIM. As simulações realizadas com o modelo probabilístico do tempo de resposta resultaram em maiores atrasos e tamanhos de fila e em menores capacidades do que as obtidas com a modelagem *default* do *software*.

ABSTRACT

The main objective of this work is to implement, in the microscopic simulator VISSIM, a probabilistic model for the driver response time in signalized intersections, and to evaluate the effects of this model on traffic performance. Based on data from a signalized intersection located in Fortaleza, statistical analyses of the response time were conducted by vehicle position in the queue, traffic lane, vehicle type and movement type. These analyses led to the modeling of the response time by a probability distribution, log-normal, which was implemented in VISSIM by an external algorithm programmed in Python. To assess the importance of this implementation, the results of delay, queue size and capacity were compared with the results of the simulations performed by the default modeling of VISSIM. The simulations conducted with the probabilistic response time model resulted in higher delays and queue lengths, and in lower capacities than those obtained by the default modeling of the software.

1. INTRODUÇÃO

Numa interseção semaforizada, o tempo de resposta de uma unidade motorista/veículo é definido como o tempo entre a partida do veículo à sua frente (estímulo) e a sua partida (resposta). Para o primeiro veículo da fila, o tempo de resposta é o tempo entre o início do verde e o instante em que ele inicia o seu movimento, também denominado na literatura de tempo de resposta inicial (Çaliskanelli e Tanyel, 2018; Li e Prevedouros, 2002). Embora em muitos estudos os termos “tempo de resposta” e “tempo de reação” tenham sido empregados como sinônimos, o tempo de reação de um indivíduo é uma parcela do seu tempo de resposta (Koppa, 2001).

Como os tempos de resposta podem afetar o fluxo de saturação de interseções semaforizadas (Çaliskanelli e Tanyel, 2018), é importante que eles sejam bem representados nos modelos de tráfego. No microssimulador VISSIM, versão 2020 (PTV, 2020), o tempo de resposta só pode ser definido pelo usuário para o primeiro veículo da fila. Para os demais veículos da fila, o *software* não permite o usuário especificar os tempos de resposta. Isso motivou a questão de pesquisa deste trabalho: qual é o impacto, na fluidez do tráfego, de se modelar, no VISSIM, os tempos de resposta de acordo com a distribuição de probabilidade observada em campo?

O principal objetivo deste trabalho foi modelar o tempo de resposta em uma aproximação semaforizada real no VISSIM por meio de um modelo probabilístico e avaliar o seu efeito na fluidez do tráfego. Para isso, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos: 1) Modelar estatisticamente os tempos de resposta de uma aproximação de uma interseção semaforizada por meio de uma distribuição de probabilidades; 2) Implementar esse modelo probabilístico no VISSIM; e 3) Avaliar as diferenças entre o modelo probabilístico implementado e a modelagem *default* do VISSIM quanto aos impactos no desempenho operacional e na capacidade do tráfego.

2. TEMPO DE RESPOSTA

Neste trabalho, o tempo de resposta do veículo na primeira posição da fila é denotado por tr_1 . Para os demais veículos da fila, o tempo de resposta é $tr_{n>1}$. A seção 2.1 apresenta uma breve revisão dos tempos de resposta comumente encontrados na literatura e a seção 2.2 traz a modelagem padrão do tempo de resposta no microssimulador VISSIM, versão 2021.

2.1. Estudos existentes sobre tempo de resposta

Na revisão da literatura foram encontrados basicamente três tipos de objetivos de pesquisa nos estudos sobre tempo de resposta. Primeiro, tem-se o objetivo de investigar os fatores que afetam o tempo de resposta, como o gênero do condutor, a posição do veículo na fila, o tipo de veículo, o tipo de movimento de conversão, e a programação semaforizada. O segundo tipo de objetivo encontrado é de caracterizar o tempo de resposta em si, estimando sua tendência central, dispersão e distribuição de probabilidade. Por fim, tem-se o objetivo de estudar os efeitos do tempo de resposta no desempenho do tráfego. O presente trabalho engloba esses três tipos de objetivos.

Com relação ao primeiro tipo de objetivo, tem-se mostrado que: motoristas do gênero feminino apresentam tempo de resposta maior que os do masculino (Çaliskanelli e Tanyel, 2018; Colella, 2008); para o primeiro veículo da fila, os tempos de resposta dos que fazem movimento de conversão (à direita ou à esquerda) são menores do que os dos que seguem em frente (Çaliskanelli e Tanyel, 2018; Li e Prevedouros, 2002); o tempo de resposta em interseções com semáforos convencionais foi maior do que nas com semáforos providos de contador regressivo do tempo para abertura do verde (Li et al., 2014); e que ciclos semaforizados longos podem resultar em maiores distrações, conseqüentemente em maiores tempos de resposta (Çaliskanelli e Tanyel, 2018).

Os estudos com o segundo tipo de objetivo, que caracteriza o tempo de resposta, têm concluído que essa variável tem sido melhor representada por distribuições assimétricas à direita, como mostram as referências da Tabela 1, o que significa que uma menor parcela da população apresenta tempos de resposta mais elevados. A incidência de tempos de resposta mais altos pode ter sido aumentada nos últimos anos devido às distrações causadas pelo uso crescente de *smartphones* (Horrey e Wickens, 2006).

Tabela 1 – Tempo de resposta do primeiro veículo da fila – estudos anteriores

Média (s)	Desvio padrão (s)	Distribuição	Fonte
1,5 – frente	0,9	Log-Normal	Çaliskanelli e Tanyel (2018)
1,3 – esquerda	0,8		
1,4 – direita	0,6		
2,6 1,6 (demais posições)	-	-	Bonneson (1992)
1,0	0,3	Unicaudal: beta, gama ou de valores extremos	Colella (2008)
1,8 – frente	0,6	Normal	Li e Prevedouros (2002)
1,4 – esquerda	0,7		
2,1 – sem contador regressivo	1,1	Weibull	Li et al. (2014)
1,5 – com contador regressivo	0,7	Log-normal	

Dentre o terceiro tipo de estudos, que analisam o impacto do tempo de resposta na fluidez do tráfego, destaca-se o trabalho de Çaliskanelli e Tanyel (2018) que observou, por meio de simulação, que tempos de resposta elevados diminuem o fluxo de saturação. No momento da escrita deste texto, na literatura não foram encontrados trabalhos que avaliam o efeito de se modelar o tráfego, no VISSIM, usando o tempo de resposta aleatório encontrado em campo, *versus* utilizando a modelagem oferecida pelo software, a qual não permite o usuário modelá-la explicitamente, com exceção para o primeiro veículo da fila.

2.2. Modelagem do tempo de resposta no VISSIM

O VISSIM permite o usuário realizar a modelagem do tempo de resposta apenas para o primeiro veículo da fila - tr_1 , por meio do parâmetro *reaction after end of red*. Esse parâmetro é definido como o tempo entre o instante que o semáforo muda para estado *sig*a e o instante que o veículo começa a se mover. Ele é composto por dois parâmetros: *behavior at red/amber signal* e *reaction time distribution*.

O parâmetro *behavior at red/amber signal* define o estado *sig*a, e é escolhido conforme o controle semaforico desejado. Deve-se escolher entre dois comportamentos: “*stop (same as red)*”, em que a resposta do motorista se dá a partir da mudança semaforica do vermelho para o verde, e “*go (same as green)*”, em que a resposta se dá após a mudança do vermelho para o vermelho/amarelo. A opção *default* do VISSIM é a segunda, conforme o padrão de controle semaforico de alguns países da América do Sul e da Europa, que têm configurações semaforicas distintas das brasileiras. Para microssimulações que consideram o cenário brasileiro, deve-se utilizar a primeira opção, “*stop (same as red)*”.

O parâmetro *reaction time distribution* define a distribuição do tr_1 . Pode-se escolher a distribuição normal e seu valor de média e de desvio padrão, ou uma distribuição empírica, em que o analista especifica as frequências acumuladas observadas em campo. Em *default*, nenhuma distribuição é definida e o primeiro veículo da fila reage ao verde instantaneamente, ou seja, ele inicia seu movimento no próximo passo da simulação. Com relação ao tempo de resposta dos veículos da 2ª posição em diante ($tr_{n>1}$), ele não é modelado explicitamente no VISSIM 2021, é resultante do modelo *car-following* (Basak et al., 2013).

3. MÉTODO

O método adotado nesta pesquisa foi composto por quatro passos, apresentados na Figura 1. A etapa de coleta de dados iniciou com a definição da interseção semaforizada. A escolha foi baseada em três condições necessárias à análise: filas moderadas (maiores que 10 veículos), para observar o comportamento do tempo de resposta por posição da fila; boa visualização dos

veículos em todas as posições da fila, para permitir a identificação dos instantes de partida; e boa visualização das indicações luminosas do semáforo, para permitir a observação do tr_1 . A coleta foi feita com base nas filmagens gravadas pelas câmeras de monitoramento do CTAFOR – Controle de Tráfego em Área de Fortaleza. Os tempos de resposta das motocicletas foram coletados, mas desconsiderados, pois o objetivo geral do trabalho foi a implementação dos tempos de resposta no VISSIM, o qual não possui o veículo do tipo motocicleta.

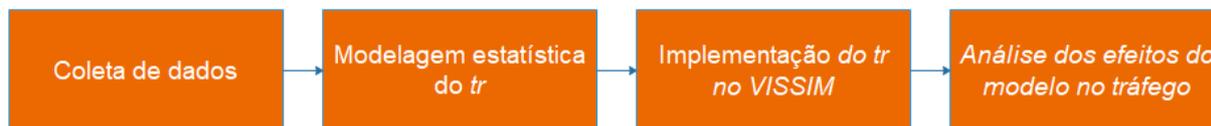


Figura 1. Método da pesquisa

A aproximação semaforizada selecionada foi a da Av. Silas Munguba, no cruzamento com a Av. Bernardo Manuel. Essas duas avenidas interligam importantes polos geradores de viagem, como um terminal urbano de ônibus (Terminal da Parangaba), um campus universitário (Universidade Estadual do Ceará), um aeroporto (Aeroporto Internacional Pinto Martins), um shopping center (Shopping Parangaba) e um estádio de futebol (Arena Castelão). A Figura 2 mostra uma imagem do vídeo usado na coleta. O semáforo observado pelo pesquisador, destacado em vermelho, serve a aproximação do sentido oposto, mas opera sob a mesma programação do semáforo da aproximação estudada. Isso permitiu observar o instante em que o semáforo fica verde para a aproximação estudada.



Figura 2. Aproximação analisada. Semáforo observado destacado em vermelho

A coleta de dados foi manual, efetuada por meio das gravações dos dias 17/05/2018 (06h50 às 09h10), 09/10/2018 (06h30 às 08h30), 09/04/2019 (06h45 às 10h00) e 11/04/2019 (06h30 às 10h00), totalizando 11 horas de filmagens. Todos os dados foram coletados por a

penas um observador, em períodos em que se sentia descansado e atento. Foram observados 220 ciclos para a faixa direita e 229 ciclos para a faixa esquerda, cujos tempos semafóricos no período estudado são mostrados na Tabela 2. A diferença entre o número de ciclos entre as faixas deve-se a ciclos em que não foram observados veículos na faixa analisada ou à ocorrência de atipicidades, com enguiço mecânico. Todas as observações foram realizadas em boas condições climáticas, sem chuvas.

Tabela 2 – Programação semafórica na Av. Silas Munguba x Av. Bernardo Manuel

Plano semafórico	Ciclo (s)	Aproximação	Verde (s)	Amarelo (s)	Vermelho geral (s)	Vermelho (s)
06h00 – 08h30	144	S. Munguba	63	4	3	74
		B. Manuel	67	4	3	70
08h30 – 10h30	128	S. Munguba	60	4	3	61
		B. Manuel	54	4	3	67

A Tabela 3 exhibe os tamanhos das amostras de tempo de resposta por faixa, tipo de veículo (leves e pesados, VL e VP) e posição na fila (subíndice 1 para a primeira e subíndice $n > 1$ para as demais). A amostra total foi de 4.004 observações de tempo de resposta. O tempo de resposta do primeiro veículo da fila (tr_1) é o intervalo entre o início do verde e o instante em que ele inicia o movimento; para os demais veículos da fila, o tempo de resposta ($tr_{n>1}$) tem como início a saída do veículo à frente. Em ciclo em que houve uma ou mais motos ocupando a primeira posição da fila, não havia tr_1 a ser observado, pois o veículo irá responder à saída da moto, não à luz verde. Por isso, o tamanho da amostra de tr_1 coletada em cada faixa (82+32=114 na direita e 107+7=114 na esquerda) é menor que o número de ciclos observados. Cabe destacar que a coleta pode ser susceptível a erros devido ao tempo de reação do pesquisador, principalmente para os veículos nas posições finais da fila, onde pode haver maior dificuldade para se identificar o exato instante de saída.

Tabela 3 – Tamanho das amostras de tempo de resposta

Faixa	VL ₁	VP ₁	VL _{n>1}	VP _{n>1}
Direita	82	32	1.258	404
Esquerda	107	7	2.002	112

Com relação aos motoristas que iniciaram a mudança de faixa na sua partida, o seu tempo de resposta teve como instante de referência a saída do veículo que estava a sua frente na faixa de destino, pois é a esse veículo que ele responde, e não ao veículo que estava à sua frente na sua faixa de origem. Para os motoristas que mudaram de faixa ao longo do seu percurso, nenhuma atenção era requerida, pois ele respondeu à partida do veículo que estava a sua frente.

A segunda etapa do método teve como principal objetivo modelar o tempo de resposta por meio de uma distribuição de probabilidade. Para isso, foram avaliadas as diferenças no tempo de resposta por posição na fila, faixa de tráfego, tipo de veículo e movimento de conversão, utilizando ferramental de análise exploratória e de inferência estatística: intervalos de confiança 95% e testes de hipóteses. As seguintes hipóteses de pesquisa foram investigadas:

1. O tempo de resposta médio da 1ª posição é maior do que o das demais posições, pois os motoristas das demais posições dispõem de mais tempo para se preparar para a sua saída.

2. O tempo de resposta médio na faixa direita é maior que na faixa esquerda, possivelmente devido à maior presença de veículos pesados na faixa direita.
3. O tempo de resposta médio do veículo pesado é maior que o do veículo leve, possivelmente devido à maior inércia.
4. O tempo de resposta médio entre os tipos de movimentos (em frente e conversão à direita) são diferentes para o primeiro veículo da fila. Foi decidido incluir essa hipótese de pesquisa sem hipótese prévia de como o movimento de conversão poderia afetar o tempo de resposta, por isso a hipótese é de diferença entre as médias, não de superioridade de uma delas sobre a outra.

Todos os intervalos de confiança e testes de hipóteses conduzidos neste trabalho vieram de amostras com no mínimo 30 observações. Isso assegura bom grau de normalidade das médias amostrais, premissa dos métodos estatísticos empregados, como também permitiu boas precisões das estimativas intervalares, ou seja, intervalos de confiança com erros satisfatoriamente pequenos.

Em seguida, buscou-se encontrar a distribuição de probabilidade que pudesse representar o tempo de resposta. Foram aplicados os testes de aderência Kolmogorov-Smirnov (KS) e o qui-quadrado (χ^2) de Pearson para verificar a adequação das principais distribuições de probabilidade encontradas na literatura: normal, gama, weibull, log-normal e log-logística. Também foram utilizadas as medidas Critério de Informação de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC). A avaliação da aderência também foi baseada na comparação visual das frequências observadas com as esperadas pela distribuição em análise.

A terceira etapa metodológica consistiu no desenvolvimento e implementação do modelo probabilístico do tempo de resposta no microssimulador VISSIM, realizada via programação em linguagem Python e a API do VISSIM. A principal função desse algoritmo externo foi fazer com que o tempo de resposta de cada condutor fosse um valor gerado aleatoriamente pela sua distribuição de probabilidade encontrada na etapa metodológica anterior.

A quarta e última etapa da pesquisa comparou o modelo probabilístico implementado no simulador *versus* a sua modelagem *default*, para avaliar os impactos do novo modelo de tempo de resposta na fluidez do tráfego. Para isso foram verificadas as diferenças no atraso médio (s), tamanho médio de fila (m) e capacidade (veíc/h) na aproximação, para intervalos de 15 minutos. Variou-se a demanda total da aproximação de 200 veíc/h a 1600 veíc/h, com incrementos de 200 veíc/h. Para cada nível de demanda, foram feitos intervalos de confiança *t* de Student para a média das replicações, com grau de confiança de 95%. Em seguida, como essa análise sugeriu que o modelo probabilístico apresentou maior atraso, maior fila e menor capacidade, foram realizados testes *t* de Student de cauda superior para amostras pareadas para testar as hipóteses de que, para cada nível de demanda, o modelo implementado, em comparação com o modelo *default*, apresenta maior atraso, maior fila e menor capacidade, com nível de significância de 5%.

Cada cenário de simulação foi replicado 30 vezes, novamente para garantir alto grau de normalidade das médias amostrais e boas precisões nas estimativas intervalares. Cada replicação teve duração de 17 minutos, incluídos 2 minutos para aquecimento da rede. O conjunto das 30 sementes aleatórias foi mantido entre os cenários para isolar o efeito do modelo do tempo de resposta no desempenho do tráfego, por isso as amostras (modelo vs. *default*) são pareadas. O passo da simulação utilizado foi o de 0,1 s, o mínimo permitido pelo VISSIM, para maximizar a precisão da modelagem microscópica da movimentação dos veículos.

Todos os parâmetros comportamentais do software (ex.: *car-following*) foram mantidos em valores *default*, pois suas calibrações demandariam esforços que seriam desnecessários tendo em vista o foco deste trabalho. Os valores desses parâmetros podem afetar a fluidez do tráfego, portanto os resultados desta pesquisa avaliam o impacto do tempo de resposta apenas para a condição em que os demais parâmetros estão com valores *default*. A próxima seção traz os resultados da aplicação do método.

4. RESULTADOS

4.1. Modelagem estatística do tempo de resposta

A modelagem estatística iniciou-se pela avaliação do tempo de resposta por posição na fila e por faixa de tráfego. Os *boxplots* da Figura 3 mostram que alguns tempos de resposta foram bastante elevados, maiores do que 5 segundos, talvez causados por distrações do motorista, como ocorre durante o uso de *smartphones*. Os valores extremos não foram removidos porque eles poderiam ser contemplados pelas distribuições de probabilidade assimétricas a serem testadas, o que ocorreu.

Os intervalos de confiança para a média dos tempos de resposta, apresentados na Figura 4, sugerem duas hipóteses: a primeira é que o tr_1 médio é maior do que o das demais posições, pois os motoristas das demais posições dispõem de mais tempo para se preparar para a sua saída. Essa hipótese é avaliada na Tabela 4, onde são mostrados um teste de hipóteses e um IC *t* unilateral de 95% com limite inferior para a diferença das médias. Pelo intervalo, estamos 95% confiantes de que o tr_1 médio é pelo menos 0,3 s maior do que tempo de resposta das demais posições.

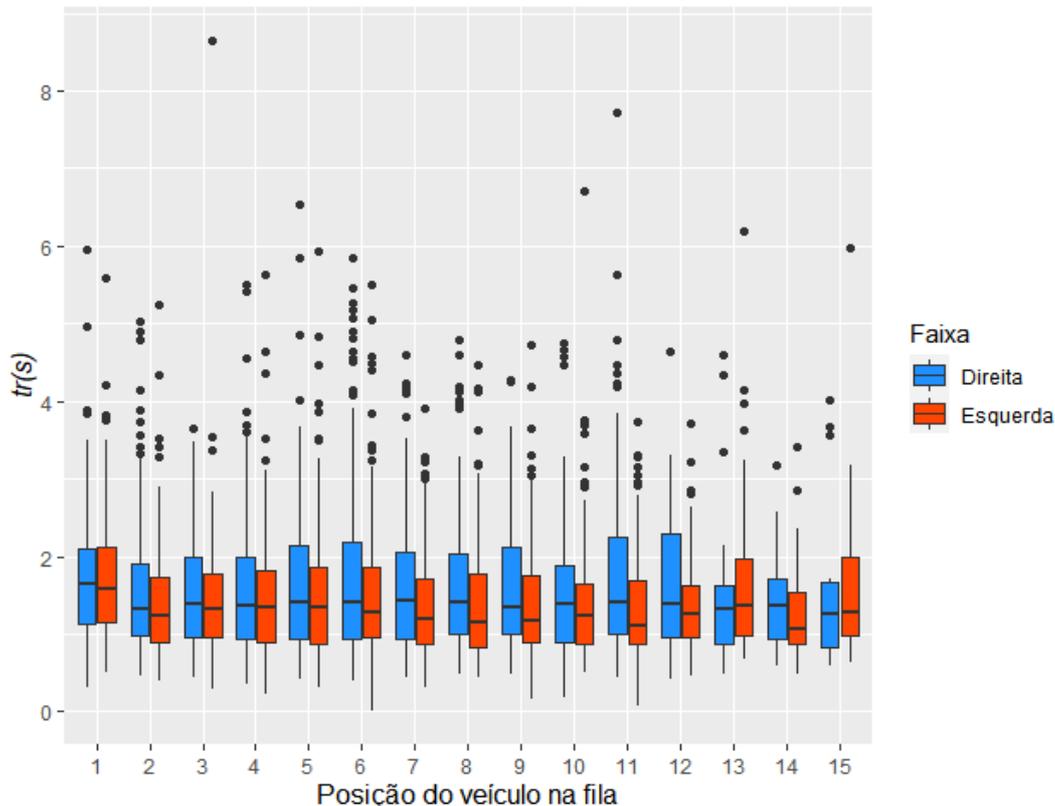


Figura 3. *Boxplots* do tr por posição na fila e por faixa de tráfego

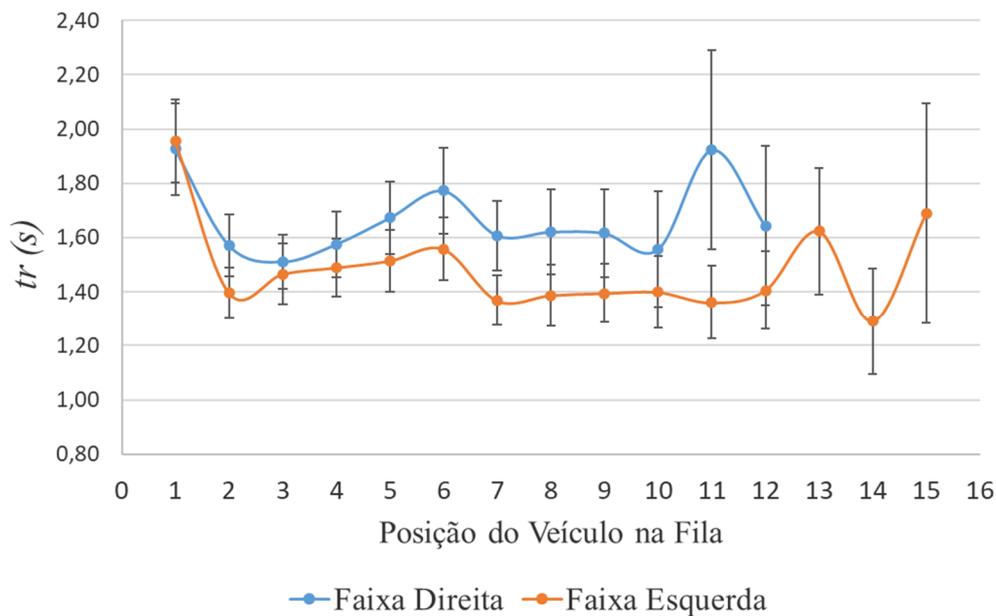


Figura 4. Intervalo de confiança 95% para a média do *tr*, por posição na fila e por faixa

Tabela 4 – Teste de hipóteses para o *tr* médio por posição na fila

Hipótese nula	Hipótese alternativa	<i>tr</i> ₁ médio (s)	<i>tr</i> ₂₋₂₀ médio (s)	Valor-p	IC (s)
$tr_1 \leq tr_{2-20}$	$tr_1 > tr_{2-20}$	1,94	1,53	1,1E-11	$\Delta tr > 0,3$

A segunda hipótese avaliada é que o tempo de resposta médio na faixa direita é maior do que na faixa esquerda. Os resultados mostram que essa hipótese não pôde ser concluída para a primeira posição (Tabela 5). Para as demais posições, apesar de o teste ter apontado significância estatística, o IC unilateral apresentou limite com pouca relevância prática (0,1 s). Cabe ressaltar o motivo do subíndice na faixa da direita ser 2-17 e da faixa esquerda ser 2-20: na faixa direita só ocorreram filas até a 17ª posição e na faixa da esquerda até a 20ª posição.

Tabela 5 – Teste de hipóteses do *tr* médio por faixa de tráfego

Hipótese nula	Hipótese alternativa	<i>tr</i> _{FD} (s)	<i>tr</i> _{FE} (s)	Valor-p	IC (s)
$tr_{1,FD} \leq tr_{1,FE}$	$tr_{1,FD} > tr_{1,FE}$	1,93	1,96	0,60	$\Delta tr > -0,2$
$tr_{2-17,FD} \leq tr_{2-20,FE}$	$tr_{2-17,FD} > tr_{2-20,FE}$	1,62	1,45	1,3E-09	$\Delta tr > 0,1$

Para averiguar se os maiores tempos de resposta da faixa da direita podem ter sido causados pela maior presença de veículos pesados nessa faixa, verificou-se a hipótese de que o *tr* médio dos veículos pesados é maior do que o dos veículos leves, cujos resultados estão na Tabela 6. Não houve indícios para concluir essa hipótese para a 1ª posição da fila. Para as demais posições, a diferença foi estatisticamente significativa, porém a diferença pode ser muito pequena, de apenas 0,1 s.

Tabela 6 – Teste de hipóteses do *tr* médio por tipo de veículo

Hipótese nula	Hipótese alternativa	<i>tr</i> _{VP} (s)	<i>tr</i> _{VL} (s)	Valor-p	IC (s)
$tr_{1,VP} \leq tr_{1,VL}$	$tr_{1,VP} > tr_{1,VL}$	1,86	1,95	0,72	$\Delta tr > -0,4$
$tr_{2-17,VP} \leq tr_{2-20,VL}$	$tr_{2-17,VP} > tr_{2-20,VL}$	1,66	1,50	0,0005	$\Delta tr > 0,1$

Também foi realizada uma análise por movimento de conversão, considerando apenas o primeiro veículo da fila, pois para as demais posições não haveria motivos para supor a hipótese de que a conversão fizesse efeito no tempo de resposta. A Tabela 7 mostra que não houve evidências de diferença entre os movimentos de conversão.

Tabela 7 – Teste de hipóteses do tr médio por tipo de veículo

Hipótese nula	Hipótese alternativa	tr_1 médio – em frente (s)	tr_1 médio – direita (s)	Valor-p	IC (s)
$tr_{1,Fre} = tr_{1,Dir}$	$tr_{1,Fre} \neq tr_{1,Dir}$	2,09	2,04	0,84	[-0,4, 0,5]

Diante dos resultados apresentados, decidiu-se modelar o tempo de resposta por posição na fila: um modelo para primeira posição (tr_1) e outro para as demais ($tr_{n>1}$), sem diferenciação de faixa nem de tipo de veículo.

Os testes de aderência KS e χ^2 para as distribuições analisadas – normal, log-normal, gama, weibull e log-logística – foram realizados usando a biblioteca *fitdistrplus* do *software* R. Os resultados estão na Tabela 8. Para o tr_1 , nenhum teste de aderência foi rejeitado. Para o $tr_{n>1}$, somente a distribuição log-normal passou no teste χ^2 e nenhuma distribuição passou no teste KS. Uma possível justificativa para a rejeição dos testes para $tr_{n>1}$ deve-se ao tamanho da amostra (3.776, enquanto para tr_1 é de 228), pois amostras muito grandes tendem a rejeitar a hipótese nula (Lin et al., 2013). Mesmo quando a variável puder ser satisfatoriamente bem representada por uma distribuição de probabilidade, testes de aderência com amostras muito grandes irão rejeitar a hipótese nula de que a variável segue o modelo testado (Johnson e Wichern, 2018).

Tabela 8 – Valores-p dos testes de aderência para tr_1 e $tr_{n>1}$.

Distribuição	tr_1				$tr_{n>1}$			
	χ^2 Valor-p	KS Valor-p	AIC	BIC	χ^2 Valor-p	KS Valor-p	AIC	BIC
Normal	0,17	0,047	582,97	589,82	< 0,00005	< 0,00005	9506,65	9519,12
Log-Normal	0,71	0,485	548,09	554,94	0,156	0,004	7928,35	7940,83
Gamma	0,98	0,966	542,85	549,70	< 0,00005	< 0,00005	8092,20	8104,67
Weibull	0,34	0,325	561,16	568,01	< 0,00005	< 0,00005	8560,10	8572,57
Log-Logit	0,81	0,958	545,69	552,54	< 0,00005	0,00005	7962,57	7975,05

Na Figura 5 e Figura 6 percebe-se boa aderência das distribuições log-normal ao tr_1 e ao $tr_{n>1}$ observados em campo – as linhas contínuas representam as distribuições acumuladas. Com relação aos critérios AIC e BIC, para o tr_1 a log-normal apresentou o segundo melhor valor em ambos os parâmetros, próximos aos valores da distribuição gama. Para o $tr_{n>1}$ a log-normal ofereceu o melhor ajuste para ambos os critérios.

Como conclusão desta etapa de modelagem estatística, o tr_1 é modelado pela distribuição log-normal, com parâmetros logarítmicos de localização $\mu = 0,56$ e escala $\sigma = 0,46$, correspondentes a uma média de 1,9 s e desvio padrão 1,3 s. Para o $tr_{n>1}$, os parâmetros foram $\mu = 0,28$ e $\sigma = 0,51$, relativos à média 1,5 s e desvio padrão 1,0 s.

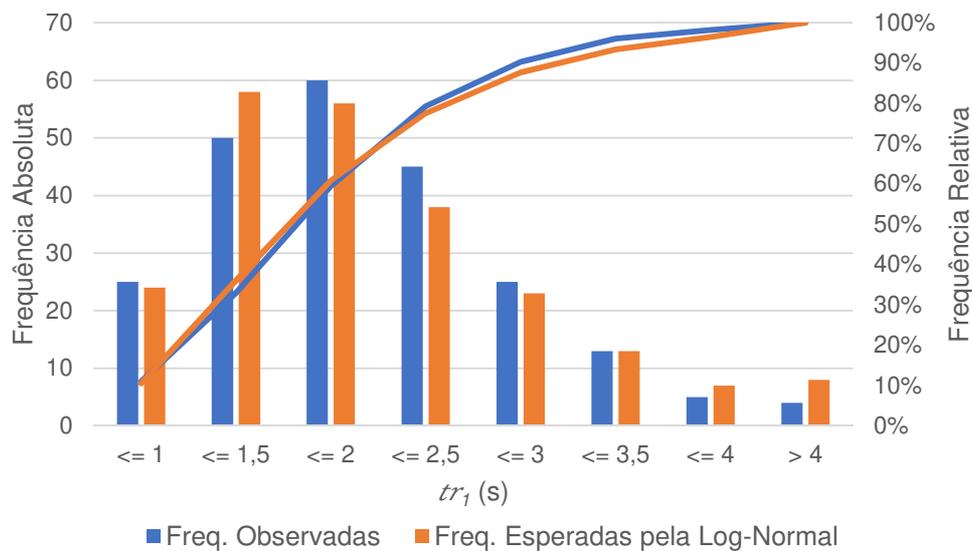


Figura 5. Aderência da distribuição log-normal aos dados de tr_1

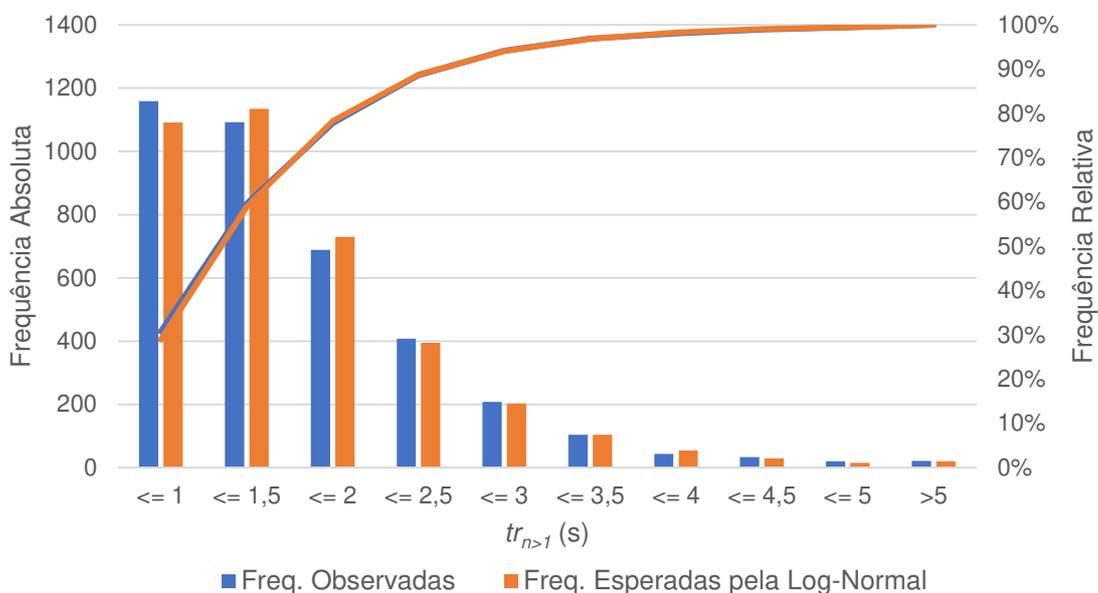


Figura 6. Aderência da distribuição log-normal aos dados de $tr_{n>1}$

4.2. Implementação do modelo de tempo de resposta no VISSIM

Os modelos probabilísticos log-normal foram implementados no VISSIM utilizando-se o pacote *pywin32*, que possibilita a conexão COM (*Component Object Module*) entre o *python* e o VISSIM. A lógica do algoritmo foi atribuir os valores de tempo de resposta gerados pelas distribuições log-normais aos intervalos de tempo em que os veículos devem ter velocidade igual zero, utilizando os atributos *des_speed* (velocidade desejada do veículo) e *speed* (velocidade do veículo ao final do passo da simulação). Seguindo a definição do tempo de resposta, o instante de referência para os primeiros veículos da fila foi o início do verde semaforico. Para os demais veículos da fila, o instante de referência foi a saída do veículo à frente.

A verificação da implementação se iniciou pela comparação entre os parâmetros da distribuição logarítmica das amostras resultantes das simulações e os valores μ e σ especificados nos

modelos. A verificação foi bem-sucedida, pois os valores amostrais simulados de 1,9 s e 1,3 s para tr_1 e 1,5 s e 1,1 s para $tr_{n>1}$, para média e desvio padrão, respectivamente, foram similares aos valores teóricos (1,9 s e 1,3 s para tr_1 e 1,5 s e 1,0 s para $tr_{n>1}$, como apresentados na seção 4.1). Por fim, na Figura 7 e Figura 8 são apresentadas as distribuições de frequência dos tempos de resposta coletados em campo, os simulados no VISSIM com o modelo probabilístico implementado (log-normal) e os simulados com o modelo *default* do tempo de resposta do VISSIM.

Como pode ser observado na Figura 7, na amostra *default* do VISSIM, o primeiro veículo reage instantaneamente à abertura do verde, e para as demais posições (Figura 8) o modelo *default* também não representa adequadamente o tr dos motoristas. Já o modelo implementado representou bem os dados de campo tanto para a 1ª quanto para as demais posições.

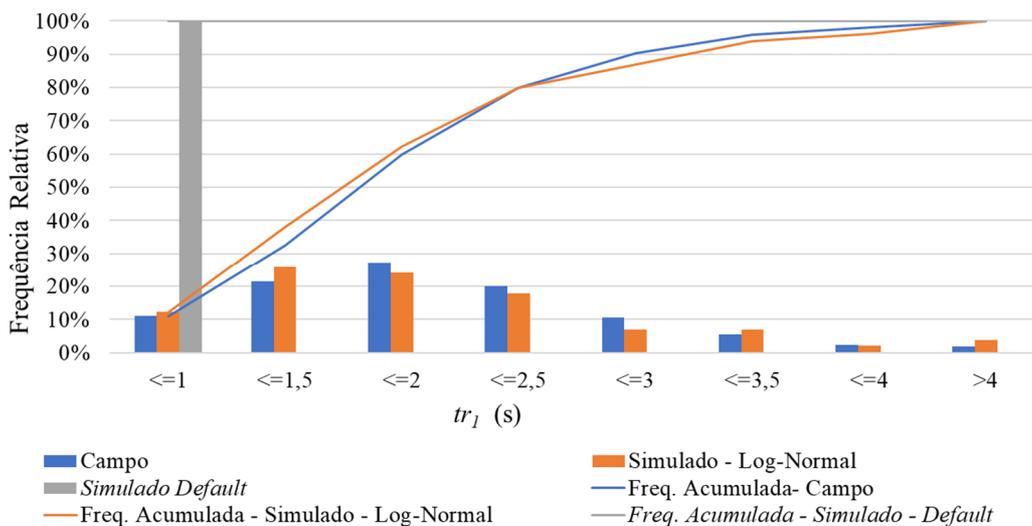


Figura 7. Distribuições de frequência relativa e acumulada do tr_1

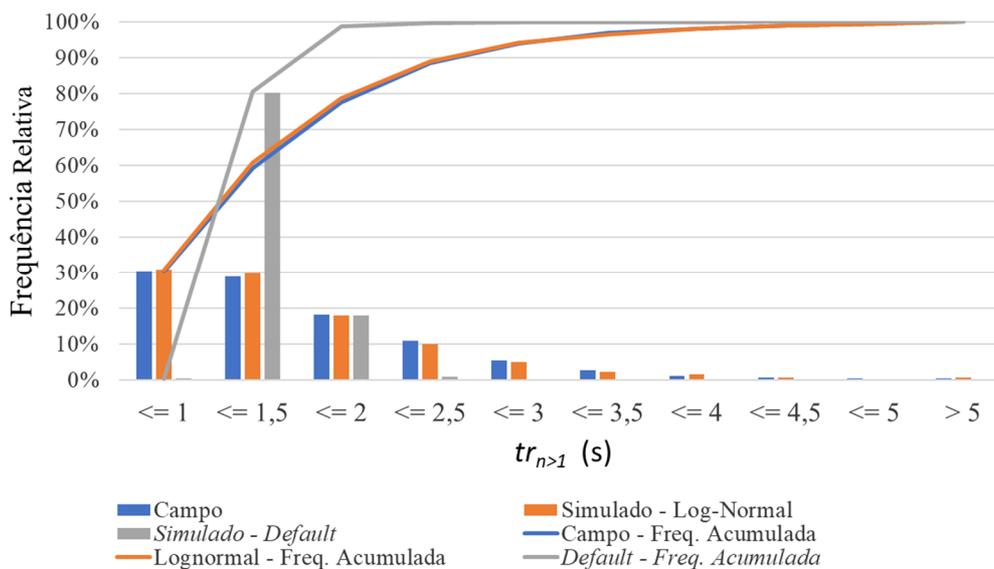


Figura 8. Distribuições de frequência relativa e acumulada do $tr_{n>1}$

4.3. Efeitos do novo modelo na fluidez do tráfego

A última etapa consistiu na análise dos resultados dos experimentos para avaliar os impactos da modelagem do tempo de resposta nas medidas de desempenho atraso médio (s), fila média (m) e na capacidade viária da aproximação (veíc/h), comparando-os com os resultados obtidos com a modelagem *default* dos tempos de resposta do VISSIM. Na Figura 9 são mostrados os resultados para o atraso médio, com intervalos de confiança de 95%. Todos os testes-t (um para cada nível de demanda) para testar a hipótese de que os atrasos do modelo log-normal são maiores que os atrasos do modelo default foram significativos, com o maior valor-p igual 4,3E-10.

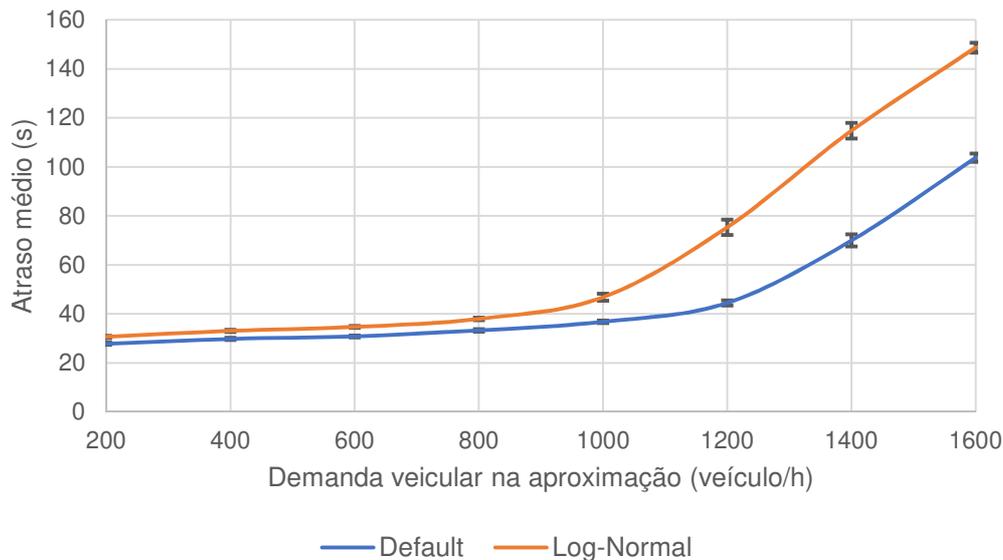


Figura 9. Diferença do atraso médio entre o modelo implementado e o *default*

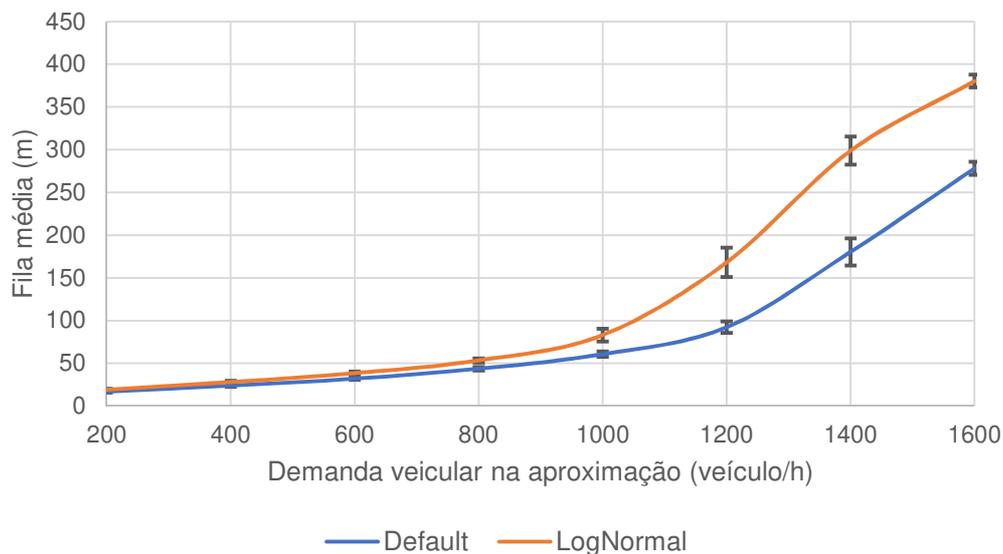


Figura 10. Diferença da fila média entre o modelo implementado e o *default*

Na Figura 10 são mostrados os resultados de fila média, com intervalos de confiança de 95%. Todos os testes-t para testar a hipótese de a fila média do modelo log-normal é maior que a fila média do modelo *default* foram significativos, com o maior valor-p igual 7,3E-10.

Como pode ser observado, a não implementação do modelo probabilístico dos tempos de resposta resulta em atrasos e filas médias significativamente menores.

Com relação à capacidade da aproximação, as replicações com o modelo log-normal resultaram no valor médio de capacidade de 1491 veíc/h e as com o modelo default resultou em 1691 veíc/h. O intervalo de 95% de confiança para a média das diferenças entre as capacidades foi de 185 a 213 veíc/h. O testes-t para testar a hipótese de que a capacidade do modelo log-normal é menor que a do modelo *default*, foi significativo, com valor-p igual 3,0E-23. Portanto, o modelo probabilístico implementado resultou em menor capacidade viária.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo principal implementar um modelo probabilístico do tempo de resposta dos motoristas em interseções semaforizadas no microssimulador VISSIM e avaliar seus efeitos no desempenho do tráfego simulado. O modelo probabilístico decorreu de análises estatísticas dos dados coletados em campo.

O tempo de resposta do primeiro veículo da fila foi superior ao dos demais veículos. Com relação à faixa de tráfego, o tempo de resposta dos veículos da faixa direita foi estatisticamente superior ao da faixa esquerda, mas a diferença foi muito pequena. Como a faixa direita possui mais veículos pesados e é a única faixa que permite conversão, foram comparados os tempos de resposta por tipo de veículo e por tipo de movimento. Os resultados não sugerem haver diferenças relevantes.

A distribuição que melhor representou os tempos de resposta da aproximação foi a log-normal, corroborando alguns estudos da literatura (Çaliskanelli e Tanyel, 2018; Li *et al.*, 2014). A assimetria à direita dessa distribuição contemplou os valores altos de tempos de resposta observados em campo.

Como o VISSIM não permite o usuário definir os valores dos tempos de resposta dos motoristas, com exceção do primeiro veículo da fila, para esta pesquisa foi desenvolvido um algoritmo externo de programação, cuja função principal foi fazer com que o tempo de resposta individual de cada condutor fosse o valor gerado aleatoriamente pela sua distribuição de probabilidade log-normal.

A implementação dos tempos de resposta segundo a log-normal causou diferenças significativas na fluidez do tráfego simulado. Comparada à modelagem com tempos de resposta *default*, a modelagem implementada resultou em maiores atrasos e filas, e em menores capacidades. Isso reforça a importância de modelar adequadamente o comportamento aleatório dos tempos de resposta.

Recomenda-se que trabalhos futuros investiguem outros fatores que afetem o tempo de resposta, como o atraso, uma vez que longos tempos de espera podem aumentar impaciência dos condutores, o que pode causar reduções nos tempos de resposta. Tais trabalhos podem também ajudar a explicar por que os estudos realizados em outros locais encontraram outras distribuições de probabilidade para o tempo de resposta. Além disso, recomenda-se que outros estudos em interseções da cidade de Fortaleza – e em outras cidades – sejam realizados a fim de se investigar quão generalizável é a distribuição encontrada, log-normal, para o tempo de resposta. Por fim, estudos futuros podem conduzir mais experimentos de simulação para investigar os efeitos de modelar o tempo de resposta segundo o modelo probabilístico no desempenho do tráfego para diferentes condições de demanda e de oferta, como para diferentes valores de parâmetros comportamentais do VISSIM.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq. Os autores também são gratos à PTV por disponibilizar a licença tese do *software* VISSIM e ao CTAFOR por disponibilizar os dados necessários para realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Basak, K.; S. N. Hetu; Z. Li; C. Azevedo; H. Loganathan; T. Toledo; R. Xu; Yan Xu; L-S. Peh e M. Ben-AkivaA. (2013) Modeling Reaction Time within a Traffic Simulation Model. In *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation System*, p. 302-309. DOI: 10.1109/ITSC.2013.6728249
- Bonneson, J. A. (1992) Modeling queued driver behavior at signalized junctions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1365, p. 99-107. Disponível em: <<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1992/1365/1365.pdf#page=103>> (acesso em 30/11/2021).
- Çaliskanelli, P. e S. Tanyel (2018) Investigating the driver's response time at signalized intersections. *Transport*, v. 33(2), p. 380-388. DOI: 10.3846/16484142.2016.1250106
- Colella, D. A. T. (2008) *Comportamento dos motoristas em interseções semaforizadas*. Dissertação (mestrado). Departamento de Transportes. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, Brasil. DOI: 10.11606/D.18.2008.tde-07042008-085004
- Horrey, W. J. e C. D. Wickens (2006) Examining the impact of cell phone conversations on driving using meta-analytic techniques. *Human Factors*, v. 48, n. 1, p. 196-205. DOI: 10.1518/001872006776412135
- Johnson, R. e D. W. Wichern (2018) *Applied multivariate statistical analysis* (6ª ed.), p. 187. Pearson.
- Koppa, R. (2001). Human Factors. In Gartner, N.; C. J. Messer e A. K. Rathi. *Traffic flow theory – A state-of-the-art-report*, p. 3-3. Disponível em: <<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/tft/chap3.pdf>> (acesso em 30/11/2021)
- Li, H. e P. D. Prevedouros (2002) Detailed observations of saturation headways and start-up lost time. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1802, p. 44-53. DOI: 10.3141/1802-06
- Li, Z.; J. Zhang; J. Rong; J. Ma e Z. Guo (2014) 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*, v. 22, n. 0, p. 50-62. DOI: 10.1016/j.trf.2013.10.012
- Lin, M.; H. C. Lucas Jr. e G. Shmueli (2013) Too big to fail: Large samples and the p-value problem. *Information Systems Research, Articles in advance*, p. 1-12. DOI: 10.1287/isre.2013.0480
- PTV (2020) VISSIM 2020 Manual do Usuário. Karlsruhe, Germany: Planung Transport Verkehr AG.