LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
Limeira–SP, 02 a 06 de setembro de 2019

SIMULAÇÃO MONTE CARLO PARA AVALIAÇÃO DE TRÁFEGO EM VIA CURTA COMPARTILHADA COM PARADAS DE ÔNIBUS

Marlon da Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
Campos do Jordão-SP
marlondasilv@hotmail.com

RESUMO

Este trabalho propõe um modelo de simulação Monte Carlo que visa avaliar o tempo médio e a quantidade de veículos congestionados em um cruzamento que dá acesso a uma via localizada no Centro de Pindamonhangaba, São Paulo. A via possui paradas de ônibus com grande contingente de passageiros nos horários de pico. O modelo é implementado para avaliar se mudanças na via impactam significativamente em melhorias no tráfego.

PALAVRAS CHAVE. Simulação Monte Carlo. Tráfego de veículos. Parada de ônibus.

SIM – Simulação

ABSTRACT

This work proposes a Monte Carlo Simulation model that aims to evaluate the average time and the number of congested vehicles in a intersection that provides access to a way located in the downtown of Pindamonhangaba, São Paulo. The way has bus stops with large contingent of passengers during peak hours. The model is building to evaluate if changes in the way impact significantly in traffic improves.

KEYWORDS. Monte Carlo Simulation. Vehicle traffic. Bus stop.

SIM – Simulation

https://proceedings.science/p/107029?lang=pt-br

1. Introdução

A crescente urbanização de municípios no interior do Brasil, embora proporcione comodidade à sua população, está trazendo como consequência problemas de mobilidade já conhecidos das grandes cidades, como o caso de engarrafamentos em horários de pico. Diferentemente das grandes metrópoles, cidades menores possuem duas questões conflitantes para melhorias em sua malha urbana: o orçamento municipal é mais limitado e a capacidade das vias centrais são menores, tanto em largura quanto em extensão.

Em cidades pequenas e médias, destaca-se também a centralização de linhas de ônibus em terminais onde um dos pontos finais se concentra na região central da cidade. No entanto, nem todas as cidades dispõem de espaço para a construção de terminais centrais, o que contribui para maior limitação do tráfego em vias que concentram pontos finais de linhas urbanas, uma vez que os ônibus se concentram na rua. Um dos exemplos de município que sofre com essa limitação é Pindamonhangaba, que possui mais de 160 mil habitantes [IBGE, 2015], localizado no Vale do Paraíba, Estado de São Paulo. O município não possui terminal central para linhas urbanas, concentrando o ponto final em uma das ruas do Centro, conforme ilustrado pela Figura 1.



Figura 1: Pontos de ônibus centrais de Pindamonhangaba-SP [Pindamonhangaba, 2019]

A ausência de um terminal urbano de ônibus na região central acarreta na utilização de parte de uma das vias do Centro como ponto para embarque e desembarque de passageiros. Além disso, o aumento significativo de veículos no município nos últimos anos tem impactado diretamente na mobilidade urbana. A Figura 2 mostra o aumento da quantidade de veículos no município a partir de 2010, com base em dados fornecidos pelo Denatran (Departamento Nacional de Trânsito) [Denatran, 2019; Pindamonhangaba, 2019].

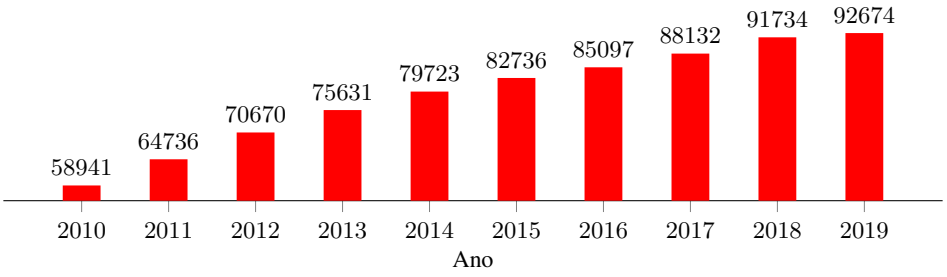

Figura 2: Quantidade de veículos em Pindamonhangaba-SP

Uma forma de auxiliar o município na organização do tráfego é implementar e aplicar

modelos de simulação antes que seja realizada alguma alteração. Embora existam simuladores próprios para trânsito, muitos deles possuem licença paga para sua utilização, além de algumas funcionalidades específicas não serem contempladas, como o tempo que a saída de um ônibus do ponto para o trânsito influencia em outros veículos.

Este trabalho propõe avaliar o tráfego em uma via, localizada no Centro de Pindamonhangaba, composta por pontos de ônibus. Atualmente, esta via possui duas faixas de rodagem e, em seu final, uma bifurcação para três sentidos distintos. A extensão total do trecho é considerada curta (próximo a 120 metros), impactando no consgestionamento de cruzamentos subsequentes.

Para identificar e propor correções em gargalos no trecho, a avaliação do tráfego será realizada por um modelo de simulação Monte Carlo. O modelo de simulação é implementado de modo a avaliar três cenários distintos que podem ser adotados na via. O objetivo da aplicação destes cenários é verificar se possíveis alterações no trânsito são capazes de apresentar melhorias significativas no fluxo de veículos.

O trabalho está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta alguns trabalhos existentes na literatura sobre modelos que apresentam soluções viáveis para a melhoria do tráfego no Brasil. A Seção 3 apresenta a modelagem baseada na simulação Monte Carlo proposta para o problema. Os resultados computacionais são apresentados e discutidos na Seção 4. Conclusões e propostas de trabalhos futuros são apresentadas na Seção 5.

2. Trabalhos Relacionados

Uma das preocupações relacionadas ao tráfego urbano é a otimização de custos associados a elementos como manutenção de vias, desgaste de veículos, tempo de viagem etc. Algumas metodologias foram desenvolvidas para a melhoria da qualidade do serviço ofertado para a população em termos de mobilidade urbana. Diante das propriedades estocásticas do tráfego de veículos, uma das metodologias maistitle difundidas para a avaliação de suas condições é a simulação.

Um exemplo é proposto por Santos [2017], que aplicou um modelo de simulação em um cruzamento com interseções semaforizadas em João Monlevade, Minas Gerais. Outra exemplo é proposto por Witte [2015] que avaliou o impacto do trânsito de Gaspar, Santa Catarina, cujo congestionamento é provocado pelo tráfego na rodovia de acesso ao perímetro urbano do município. Ambos exemplos desenvolveram seus modelos em simuladores exclusivos para tráfego. Os simuladores de trânsito são classificados em três tipos:

- *microscópicos*: os veículos são avaliados individualmente e as medidas são coletadas a partir de todos os veículos que transitam na região;
- *macroscópicos*: o fluxo é tratado como um fluido e características individuais dos veículos são desprezadas;
- *mesoscópicos*: combinação dos métodos anteriores, considerando os veículos de forma agrupada. Muito aplicada em redes semafóricas.

Boa parte dos simuladores de trânsito possuem algumas dificuldades para serem operacionalizados, tais como a dependência de treinamentos extensos e sofisticados para manuseio e ausência de ferramentas de previsão em casos mais específicos [Porto, 2015; Witte, 2015]. Além disso, grande parte dos simuladores de trânsito possuem licença paga, o que dificulta a aquisição dos mesmos por parte dos poderes municipais.

Como alternativa para estes casos, alguns modelos computacionais foram desenvolvidos, tendo como objetivo resolver problemas específicos de contextos urbanos. Tavares [2010] elaborou um simulador de trânsito que contempla características como vias de múltiplas faixas, diferentes

veículos, cruzamentos, paradas de ônibus e congestionamentos. Santana [2015] propõe uma abordagem microscópica na distribuição de usuários no sistema de transporte público em Curitiba, Paraná, para calcular o tempo médio de embarque do passageiro. Ambos os trabalhos utilizaram autômatos celulares como técnica para modelagem computacional, tendo como base propriedades estocásticas encontradas no trânsito.

As propriedades estocásticas em um sistema de trânsito podem ser representadas pela simulação Monte Carlo, o que permite extrair medidas de desempenho para avaliação de um sistema [Silva et al., 2012]. Em Rashid et al. [2015], por exemplo, a simulação Monte Carlo é empregada como método de avaliação em um modelo de agrupamento aplicado em um conjunto de semáforos inteligentes, como forma de avaliação do sistema.

O modelo de simulação Monte Carlo proposto por Enright e O'Brien [2013] apresenta soluções para a capacidade de peso de veículos em pontes de diferentes rodovias europeias. Neste trabalho, a simulação apresentou resultados efetivos a longo prazo a partir de coleta de dados referentes a períodos curtos. Tal coleta permitiu que a simulação obtivesse resultados para maiores intervalos de tempo.

Li et al. [2016] apresenta um modelo de simulação Monte Carlo para avaliação de ruídos emitidos por veículos no trânsito. Uma das principais justificativas para o uso do método é a possibilidade de simplificação de modelos microscópicos em relação a simuladores disponíveis no mercado, uma vez que tal simplificação é importante em termos de desempenho computacional e adaptação a contextos específicos da modelagem frente a outras aplicações que não contemplam tais especificidades.

Apesar dos trabalhos arrolados proporem soluções para diversos problemas de tráfego, este artigo tem como objetivo apresentar um modelo de simulação Monte Carlo aplicado sobre um problema de tráfego em uma via curta de mão única. A extensão da via está entre dois cruzamentos subsequentes, dado que apenas o primeiro cruzamento é semaforizado e o segundo não pode ser. Além disso, a via principal abriga uma área reservada para embarque e desembarque de passageiros de transporte coletivo, o que torna este trecho pontualmente complexo. Por tais peculiaridades, destaca-se a importância de desenvolver um modelo próprio para este problema.

3. Modelagem Proposta

A proposta principal deste trabalho é apresentar um modelo de simulação Monte Carlo para avaliar um trecho de uma via que possui um espaço reservado para paradas de transporte coletivo. No estudo de caso, este trecho conta com duas faixas e que possui congestionamentos frequentes, principalmente por conta da alta presença de ônibus entrando nas vias a partir dos pontos. Os congestionamentos são frequentes em horários de pico, embora existam filas de veículos também nos demais horários do dia. A Figura 3 ilustra os elementos presentes no trecho estudado.

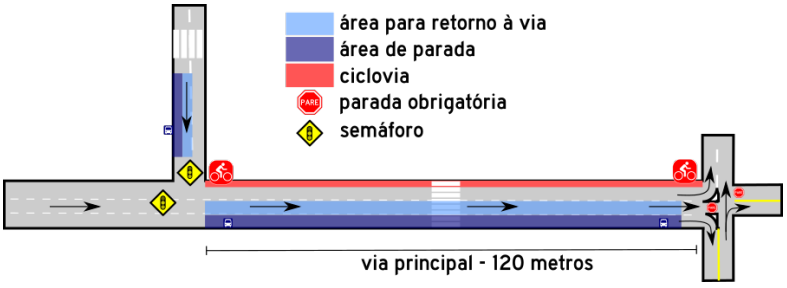

Figura 3: Esboço da área estudada

Nota-se que a via principal possui duas faixas para veículos, uma ciclofaixa e um trecho reservado para os pontos de ônibus. No final do trecho, os veículos podem realizar três tipos de conversão: à esquerda, reto e à direita. Para veículos que seguirem no sentido reto, a parada é obrigatória. A extensão dos pontos vai até a esquina, muito próximo ao espaço reservado para a conversão à direita.

A ideia do modelo é apresentar o comportamento da via em diferentes cenários e verificar se haverá melhoria significativa no fluxo de veículos comparado com o cenário atual.

Para representar os elementos do trecho a ser estudado, alguns parâmetros são definidos matematicamente. Seja m o número de vias de acesso à via principal e n o número de opções que um veículo possui para sair da via. Computa-se como via de acesso o espaço reservado para a parada de transporte coletivo, dado que os ônibus também permanecem estacionados por um tempo antes do término do embarque.

Seja $\mathbf{\Lambda} = \{\lambda_1, ..., \lambda_m\}$ o conjunto de taxas de chegada de veículos que saem de m vias até a via principal, obedecendo a distribuição de Poisson. Cada via de acesso provê a entrada de veículos que comporão as filas das faixas de trânsito.

Seja $\mathbf{M} = \{\mu_1, ..., \mu_n\}$ o conjunto de taxas de saída correspondente a cada faixa da via principal. Cada faixa corresponde a um dos possíveis sentidos que os veículos poderão prosseguir. No estudo de caso abordado pelo modelo, existem três direções possíveis para um veículo: esquerda, em frente e direita. Porém, apenas o sentido reto conta com uma parada obrigatória.

Seja k o instante em que as variáveis de contagem das filas poderão assumir um determinado valor. Cada faixa da via $j \in \{1, ..., n\}$ é composta por uma fila $v_j^{(k)}$ com capacidade máxima de c_j veículos. Seja $V_i^{(k)}$ a quantidade de veículos a espera para seguir viagem a partir da via de acesso $i \in \{1, ..., m\}$. Para contabilizar a quantidade de veículos que não conseguem seguir em frente no semáforo, utiliza-se a variável γ^k.

Para a comparação probabilística da simulação, seja $\Theta^{(k)}$ o somatório das taxas de saída de veículos referentes apenas a faixas no instante k e $\Lambda = \sum_{i=1}^{m} \lambda_i$ o somatório de todas as taxas de chegada de veículos na via principal. A Figura 4 apresenta um diagrama que ilustra os respectivos locais das variáveis em relação ao sistema.

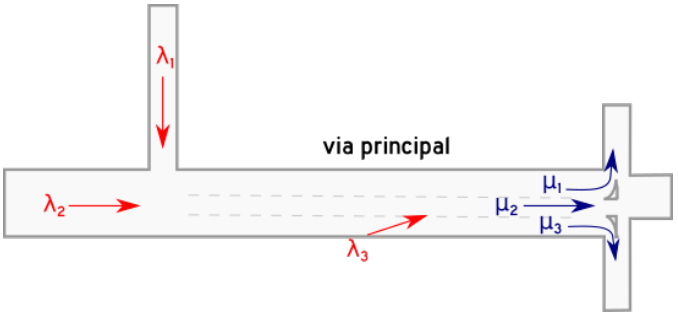

Figura 4: Representação das variáveis em relação a via

A partir da definição dos elementos no modelo, o algoritmo de simulação Monte Carlo para o problema segue os seguintes passos:

1. Definição dos valores iniciais: $\gamma = 0$; $k = 0$; $\Theta^{(k)} = 0$; $\Lambda = \sum_{i=1}^{m} \lambda_i$;

2. Gerar um valor aleatório para $\omega \in [0, 1]$, seguindo a distribuição uniforme;

3. Se $\omega < \frac{\Lambda}{\Lambda+\Theta^{(k)}}$, então ocorre a entrada de veículos na via principal:
   - Inclua um veículo em uma faixa j aleatoriamente, de acordo com um valor probabilístico. Automóveis e vans ocupam uma vaga na fila, enquanto cada ônibus ocupa duas vagas. Motocicletas não serão consideradas para efeito de tráfego;
   - Se não houver congestionamento na faixa j, ou seja, se $v_j^{(k)} = 0$, então o veículo segue trafegando na velocidade da via e $v_j^{(k)} = v_j^{(k)} + 1$;
   - Se houver fila de carros, então verificar se a fila não está totalmente preenchida, ou seja, se $v_j^{(k)} < c_j$ e incluir o veículo na via $v_j^{(k)} = v_j^{(k)} + 1$ e o tempo na fila é computado;
   - Senão, o veículo deve aguardar antes do semáforo (ou seja, perde o acesso à via, mesmo em sinal verde), $V_i^{(k)} = V_i^{(k)} + 1$ e $\gamma = \gamma + 1$.
4. Se $\omega > \frac{\Lambda}{\Lambda+\Theta^{(k)}}$, então ocorre a saída de veículos da via principal:
   - Se o veículo estiver em $v_1^{(k)}$, então ele poderá sair da fila imediatamente;
   - Para o cenário atual, se o veículo estiver em $v_2^{(k)}$, então verifica-se a direção ele seguirá. Caso vire à direita, irá para $v_3^{(k)}$ e sairá da via. Senão, deverá aguardar a liberação da via para seguir em frente. Para outros cenários, $v_2^{(k)}$ e $v_3^{(k)}$ são filas idênticas e independentes;
   - Se $V_j^{(k)} > 0$, então $V_j^{(k)} = V_j^{(k)} - 1$, para $j \in \{1, ..., m\}$;
5. Se $v_j^{(k+1)} > 0$, para algum $j \in P$, então

$$\Theta_{k+1} = \sum \mu_i \tag{1}$$

   para todas as faixas. Repete-se a partir da etapa 2 até que o critério de parada seja satisfeito. Para este caso, será utilizado um número limitado de iterações.

Ao final da simulação, calcula-se quantos veículos não conseguiram prosseguir para a via principal e o tempo médio na espera até a saída da via. Pretende-se, desta forma, realizar testes explorando três diferentes cenários de tráfego. Além disso, deseja-se que a obtenção dos resultados sejam realizadas em tempo computacional viável.

4. Resultados Computacionais

O algoritmo foi aplicado utilizando diferentes cenários. Em cada cenário, aplica-se uma política distinta na estruturação da via. Para os resultados, são adotados os seguintes nomes e as respectivas descrições:

- *Cenário 1*: cenário atual, descrito na Seção 3. Existem apenas duas filas (v_1 e v_2), v_1 abriga a taxa μ_1 e v_2 corresponde às taxas μ_2 e μ_3. Há uma taxa de chegada $\lambda_3 \neq 0$ de ônibus que saem do ponto para a pista;
- *Cenário 2*: os pontos de ônibus são removidos, formando uma terceira pista. Neste caso, o atendimento da fila v_i é realizado em uma taxa μ_i, com $i \in \{1, ..., n\}$. Neste caso, $\lambda_{m+1} = 0$;
- *Cenário 3*: aumenta-se a largura da via, formando três faixas. O regime de atendimento é realizado de modo análogo ao Cenário 2. Contudo, acrescenta-se a taxa de chegada dos ônibus para a via $\lambda_{m+1} \neq 0$.

https://proceedings.science/p/107029?lang=pt-br

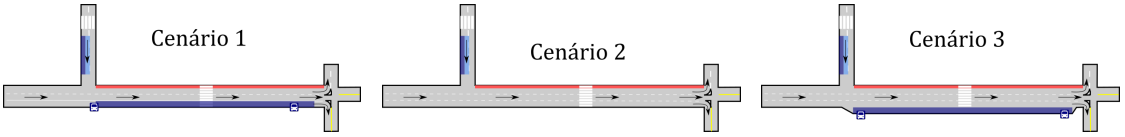

Figura 5: Ilustração dos cenários a serem simulados

A Figura 4 ilustra os três cenários com base na descrição.

Os valores das taxas de chegada e atendimento serão distintos em função de faixas de horários ao longo do dia, conforme mostra a Tabela 4. O critério utilizado para a separação dos intervalos é o comportamento do trânsito ao longo do dia, agrupando-os de acordo com a quantidade aferida de veículos ao longo do dia. É importante observar que não haverá avaliação da via no período entre 0 e 5 horas da manhã devido ao baixo fluxo de veículos e a ausência de ônibus.

Tabela 1: Valores das taxas de acordo com horários ao longo do dia (veículos/minuto)

Horário	λ_1	λ_2	λ_3	μ_1	μ_2	μ_3
05h - 08h	3,3511	3,2900	0,4222	28	18	24
08h - 11h	4,2411	3,1811	0,3222	28	14	24
11h - 14h	8,6888	8,6888	0,3444	28	12	20
14h - 16h	7,8700	7,8700	0,3000	28	12	20
16h - 19h	9,4580	8,9580	0,4799	25	10	18
19h - 00h	5,3133	4,3133	0,1267	28	18	24

Observa-se que os valores das taxas de chegada e saída para cada intervalo de tempo serão distintas. Esta diferença se dá pela presença de uma parada obrigatória para $j = 2$ e a circulação de pedestres em uma faixa localizada no final da via, dada a respectiva prioridade de passagem. Todos os cenários utilizarão os valores de taxas de chegada e saída da via. A única exceção será em relação ao Cenário 2, em que $\lambda_3 = 0$, dado que não haverá paradas de ônibus na via e, consequentemente, não haverá saída de veículos a partir de tal ponto.

O algoritmo foi implementado na linguagem de programação C++. Alguns valores iniciais são estabelecidos para a execução do algoritmo, como a capacidade da fila $c_j = 18$ veículos. Dada uma variável aleatória $\zeta \in [0, 1]$ para definir a escolha da faixa à qual os veículos irão seguir, os intervalos de valores cuja probabilidade de um veículo que entra na via principal escolher um determinado sentido é dada por:

- se $0 \leq \zeta < 0,12$, então o veículo seguirá por v_1;
- senão se $0,12 \leq \zeta < 0,565$, então o veículo seguirá por v_2;
- senão o veículo seguirá por v_3.

Para cada cenário, o algoritmo foi executado 200 vezes e foram coletados a média e o valor máximo das medidas de desempenho para a via. A Tabela 4 apresenta o somatório dos valores obtidos dos tempos médios de espera para cada cenário, em segundos. As Figuras 4, 4 e 4 mostram os gráficos referentes aos tempos médios para cada faixa da via principal.

Nota-se que, para o Cenário 1 (atual), ocorreu um tempo significativamente maior de espera, devido a menor taxa de saída de veículos. No Cenário 1, o tempo médio de espera para saída

https://proceedings.science/p/107029?lang=pt-br

Tabela 2: Somatório dos tempos médios de tráfego para os cenários propostos

	05-08h	08-11h	11-14h	14-16h	16-19h	19-00h
Cenário 1	33,556	48,741	70,476	68,355	76,236	44,225
Cenário 2	2,117	7,135	47,161	42,517	61,122	4,641
Cenário 3	2,393	7,859	49,038	43,4	63,038	4,775

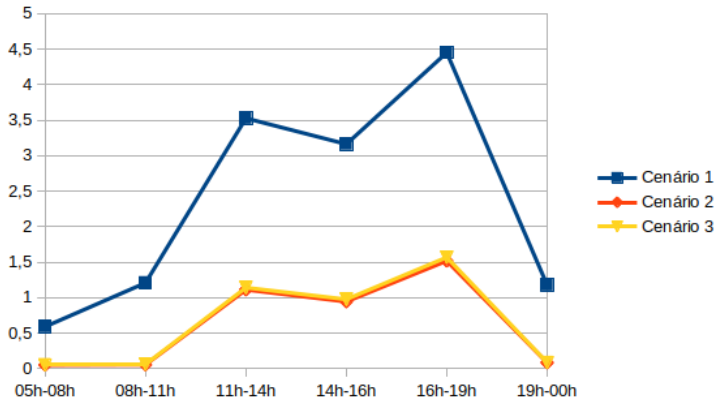

Figura 6: Médias coletadas de tempo de espera na faixa 1

pela faixa 3 foi significativamente maior com a inclusão de uma faixa adicional. Consequentemente, ter uma faixa exclusiva para a faixa 2 aumentou o tempo médio de espera em horários com maior movimento. Os veículos que prosseguiam reto possuíam mobilidade menor, devido a menor vazão de veículos para saírem da fila.

O algoritmo também avaliou a quantidade de veículos que não conseguiram acessar a via principal com o sinal verde. A impossibilidade de atravessar o sinal por conta de congestionamentos para a via de destino provoca um tempo de espera ainda maior, uma vez que o veículo fica impossibilitado de prosseguir viagem devido a capacidade máxima da fila de veículos. A Tabela 4 apresenta os valores relacionados a quantidade de veículos engarrafados, de acordo com a execução do algoritmo.

Tabela 3: Número de veículos engarrafados para os cenários propostos

	05h-08h		08h-11h		11h-14h		14h-16h		16h-19h		19h-00h	
	Média	Maior	Média	Maior	Média	Maior	Média	Maior	Média	Maior	Média	Maior
Cenário 1	0,02	2	0,64	7	2,99	11	2,41	13	3,81	15	0,32	4
Cenário 2	0	0	0	0	0,42	4	0,44	5	0,67	6	0	0
Cenário 3	0	0	0,01	3	0,41	8	0,25	4	0,77	5	0	0

De acordo com os resultados apresentados, é possível concluir que também houve uma melhoria significativa na aplicação dos cenários 2 e 3. Isto é notoriamente visto em intervalos de maior circulação de veículos (entre 11 e 19 horas). A redução de tempo de espera no semáforo é atribuída principalmente pela adição de uma faixa adicional para veículos que optam pela conversão à direita, uma vez que, no Cenário 1, a fila de veículos é compartilhada com a fila para quem opta pelo sentido reto.

Apesar deste trabalho não tratar do impacto causado na região pelas alterações, notou-se

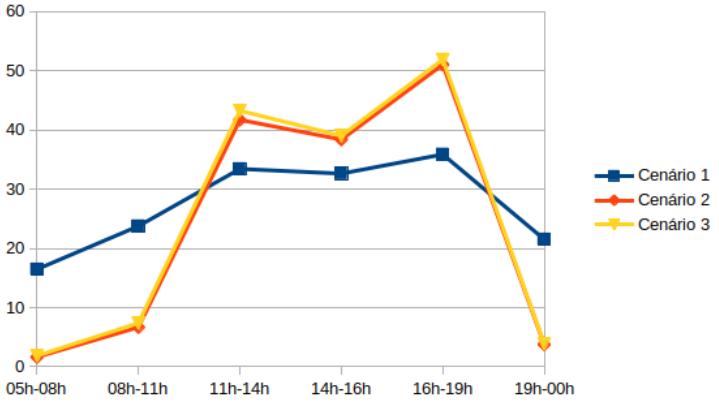

Figura 7: Médias coletadas de tempo de espera na faixa 2

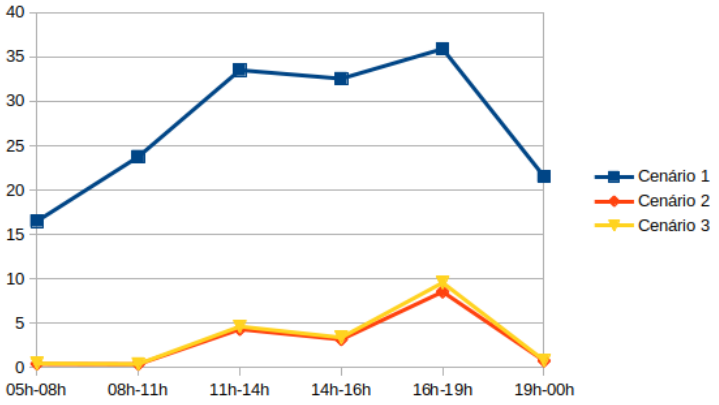

Figura 8: Médias coletadas de tempo de espera na faixa 3

significativa redução na quantidade de veículos engarrafados no cruzamento consecutivo. A Tabela 4 apresenta a porcentagem de redução de veículos que não puderam prosseguir comparado com o Cenário 1.

Tabela 4: Porcentagem de redução de veículos engarrafados em relação ao Cenário 1

%	05h-08h	08h-11h	11h-14h	14h-16h	16h-19h	19h-00h
Cenário 2	100	100	85,95	81,74	82,41	100
Cenário 3	100	98,44	86,27	89,63	79,79	100

A drástica redução apresentada pela Tabela 4 mostra que ambas as alterações são capazes de melhorar a dificuldade de tráfego na via. No entanto, é importante destacar que qualquer uma das alterações propostas exige um custo de implementação e a avaliação do impacto das mudanças na rotina dos munícipes. Tais cenários, portanto, requerem um estudo mais amplo da região, algo a ser explorado em trabalhos futuros. O modelo de simulação proposto mostra-se um importante componente na avaliação de mudanças no trânsito, podendo ser expansível para um conjunto maior de vias e como ferramenta de avaliação para modelos de planejamento urbano.

5. Conclusão

Este trabalho apresentou um componente para avaliação de tráfego em um pequeno trecho localizado na região central de Pindamonhangaba, São Paulo. A avaliação foi proposta utilizando um modelo de Simulação Monte Carlo como uma forma viável para avaliar diferentes cenários nas políticas de tráfego neste trecho, inclusive o cenário atual.

Os resultados computacionais apresentaram efetividade significativa nos cenários que propuseram mudanças na via principal, evitando gargalos em cruzamentos subsequentes – algo que ocorre frequentemente no trecho, principalmente em horários de pico. Notou-se, também, que o principal gargalo na via, mesmo com a redução significativa de tempo de espera, se concentra na faixa 2 da via principal. Por conter uma parada obrigatória, chegou a apresentar tempo de espera maior do que o cenário atual, mesmo com o restante da via apresentando tempos significativamente menores. A partir disso, será possível definir como implementar as mudanças e avaliar os impactos causados tanto na dinâmica do transporte coletivo quanto no comportamento do restante da malha viária do município.

Como sugestões para trabalhos futuros, pretende-se ampliar a área de avaliação para a malha viária central, podendo utilizar o Centro de Pindamonhangaba como estudo de caso, inclusive na busca de melhorias no tempo de espera de veículos na via estudada no presente artigo. Além disso, pretende-se utilizar a metodologia proposta neste trabalho como um componente para um algoritmo de replanejamento urbano para cidades cuja vazão de veículos em regiões centrais seja limitada, de modo a propor soluções de baixo custo utilizando métodos de otimização.

Agradecimentos

O autor agradece a Prefeitura Municipal de Pindamonhangaba pela disponibilidade dos dados e a Escola Estadual Dr. Alfredo Pujol pelo suporte para a realização deste trabalho.

Referências

Denatran, B. (2019). Frota de veículos. URL `http://www.denatran.gov.br/index.php/estatistica/237-frota-veiculos`.

Enright, B. e O'Brien, E. J. (2013). Monte carlo simulation of extreme traffic loading on short and medium span bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(12):1267–1282.

IBGE (2015). Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1 de julho de 2015. Technical report, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. URL `ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2015/estimativa_dou_2015_20150915.pdf`.

Li, F., Liao, S. S., e Cai, M. (2016). A new probability statistical model for traffic noise prediction on free flow roads and control flow roads. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 49:313–322. ISSN 1361-9209.

Pindamonhangaba (2019). Oficinas temático-setoriais: Desenvolvimento Urbano. revisão do Plano Diretor de Pindamonhangaba-SP.

Porto, E. R. (2015). Análise dos impactos gerados pela restrição de tráfego de veículos de carga em ambiente urbano através de microssimulação. Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Rashid, H., Ashrafi, M. J. F., Azizi, M., e Heydarinezhad, M. R. (2015). Intelligent traffic light control based on clustering using vehicular ad-hoc networks. In *2015 7th Conference on Information and Knowledge Technology (IKT)*, p. 1–6, Urmia. IEEE.

https://proceedings.science/p/107029?lang=pt-br

Santana, A. F. (2015). Simulação computacional da distribuição de usuários em sistemas de transporte coletivo via autômatos celulares. Master's thesis, UFPR, Curitiba.

Santos, M. L. M. (2017). Utilização da simulação computacional para análise do fluxo de veículos em um cruzamento com interseções semaforizadas da região central do município de joão monlevade.

Silva, M., Senne, E. L. F., e Vijaykumar, N. L. (2012). Wireless mesh networks planning based on parameters of quality of service. In *1st International Conference on Operations Research and Enterprise Systems*, p. 441–446, Vilamoura.

Tavares, L. D. (2010). Um simulador de tráfego urbano baseado em autômatos celulares. Master's thesis, UFMG, Belo Horizonte.

Witte, A. C. (2015). Análise do tráfego na região central da cidade de Gaspar através de simulações.