APLICAÇÃO DE TÉCNICA DE SIMULAÇÃO MISTA NO FLUXO DE VEÍCULOS DE UM TRECHO URBANO DA CIDADE DE NATAL/RN

Jadson Ferreira Jacob[1]
jadsonfjacob@gmail.com
Werner Kleyson da Silva Soares[2]
werner.soares@gmail.com
Ricardo Pires de Souza[2]
ripiso@gmail.com
Lucas Araújo dos Santos[1]
araujo.engprod@gmail.com

[1]Mestrando em Engenharia de Produção na Universidade Federal do Rio Grande do Norte
[2]Professor adjunto no Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Norte

RESUMO

Os congestionamentos causam prejuízos financeiros, na saúde e no meio ambiente. Assim, o estudo objetiva encontrar soluções para beneficiar o fluxo de veículos, por meio da modificação do funcionamento do semáforo em simulações. Efetuou-se modelagem e validação do modelo computacional no *software Anylogic*® e análise dos dados com ajuda de planilhas eletrônicas e *softwares* de análise estatística. Como resultado, a simulação computacional indicou a redução nos tempos e tamanhos das filas para os veículos oriundos da Avenida Bernardo Vieira nos experimentos: 75% no tempo total no sistema para os que enfrentaram a fila 2, e de 48% de tempo no sistema para os que passaram pela fila 3 ao implantar o sistema atuado. A implementação de um semáforo atuado na área simulada no estudo favoreceu a redução do tempo de fila e da quantidade de veículos presos no congestionamento local.

PALAVRAS CHAVE. Simulação computacional. Teoria das Filas. Trânsito.
Tópicos: Simulação Computacional e Teoria de Filas

ABSTRACT

Congestion causes financial damage to health and the environment. Thus, the study aims to find solutions to benefit the flow of vehicles, through the modification of the traffic lights in simulations. Modeling and validation of the computational model in Anylogic® software and data analysis with the aid of spreadsheets and statistical analysis software were carried out. As a result, the computational simulation indicated the reduction in queue times and sizes for vehicles from Avenida Bernardo Vieira in the experiments: 75% in the total time in the system for those who faced row 2, and 48% in the system for those who passed through queue 3 when deploying the actuated system. The implementation of a traffic light operated in the simulated area in the study favored the reduction of queuing time and the number of vehicles stuck in the local congestion.

KEYWORDS. Computational Simulation. Queueing Theory. Transit.
Paper topics: Computational Simulation. Queueing Theory.

1. Introdução

Nos grandes centros urbanos, os congestionamentos geram perdas de tempo e de dinheiro. Devido aos congestionamentos, é preciso hoje calcular um tempo adicional ao tempo de viagem e calcular também a possibilidade de aumento no consumo de combustível. (DOWNS, 2005). No município de Natal / RN, a zona norte representa mais de 40% da população (IBGE, 2016) e diariamente grande parte dessa população necessita deslocar-se para as demais áreas da região metropolitana tendo de enfrentar um congestionamento de aproximadamente 4km de extensão.

Um dos prejuízos gerados por esses engarrafamentos foi estimado pelo Sistema FIRJAN (2015), cujo relatório identificou que, 205 mil trabalhadores levaram, em média, 109 minutos nos deslocamentos casa-trabalho-casa, considerando apenas os deslocamentos acima de 30 minutos no ano de 2012. Segundo a instituição, isso gerou o que foi chamado de custo da produção sacrificada, isto é, quanto poderia ser produzido na economia no mesmo tempo gasto nos deslocamentos, cujos valores soma mais de R$ 537,6 milhões.

O crescimento dos congestionamentos demanda intervenções estruturais para minimizar os problemas causadores dos "gargalos" na via. Para isso é importante um estudo de viabilidade, podendo ser usadas técnicas de simulações computacionais para um investimento em melhorias tecnológicas mais assertivo, trazendo assim benefícios também à sociedade, quais sejam, a possibilidade de despender menos tempo nos congestionamentos do trânsito diário.

Assim, o presente estudo tem como objetivo geral encontrar soluções para melhorar o fluxo de veículos, por meio da modificação do funcionamento do semáforo em simulações computacionais. Para isso, compõe os objetivos específicos deste trabalho: encontrar um modelo válido na simulação computacional do sistema estudado; simular a implementação de um semáforo dinâmico; analisar o comportamento do fluxo de automóveis na simulação em função das mudanças no funcionamento do semáforo.

2. Revisão Bibliográfica

Os conceitos básicos compreendem o entendimento acerca de processos estocásticos, conceitos da engenharia de tráfego, teoria de filas e simulação. São abordados alguns conceitos da Engenharia de Produção necessários ao entendimento do estudo e utilizados nas etapas de execução deste trabalho.

2.1. Teoria das filas e simulação computacional

Para Arenales *et al*. (2015), a Teoria das Filas é um ramo da Pesquisa Operacional que estuda a relação entre a demanda de um sistema e os atrasos sofridos pelos usuários desse sistema. A formação de filas ocorre quando a demanda excede a capacidade de o sistema atendê-la a um determinado tempo.

Para descrever um sistema de filas, é utilizado a notação proposta por Kendall, na forma A/B/C/D/E, onde A e B referem-se à distribuição de probabilidades do tempo entre chegadas e à distribuição do tempo de atendimento (podendo ser ou não M - Markoviano), C e D denotam o número de servidores (ou canais de atendimento) e o número máximo de clientes no sistema (finito ou infinito) e E representa a disciplina de atendimento da fila (LIFO (last in-first out), PRI (Prioridade), etc). Desse modo, uma notação poderia ser escrita nas formas M/M/1/∞/FIFO, M/D/10/20/SIRO, ou G/G/1/∞/PRI, por exemplo. Processos estocásticos Markovianos ocorrem quando o evento no instante t_0 não depende ou interfere no evento do instante t_1 para ocorrer, nem em t_2 nem em eventos nos instantes posteriores (KLEINROCK; GAIL,1996).

Com isso se pode estabelecer o modelo de filas adequado ao sistema e em seguida determinar suas medidas de desempenho. Medidas de desempenho em sistemas se encontram inter-relacionadas e sua manipulação envolve como consequências modificações em outras medidas de desempenho. Para tanto é necessário o ajuste dos parâmetros com vistas ao alcance

https://proceedings.science/p/106692?lang=pt-br

da melhor aproximação do sistema real. Esses ajustes podem ser feitos também com o auxílio de simulações computacionais, as quais podem ser utilizadas para estudo e análise de sistemas com muitas filas e processos.

Simulação é a experimentação de um sistema real através de modelos matemáticos e computacionais, e implica na modelagem de um processo ou sistema, de tal forma que o modelo imite as respostas do sistema real numa sucessão de eventos que ocorrem ao longo do tempo. Para Schmidt e Taylor (1970), sistemas podem ser definidos como "um conjunto de objetos, como pessoas ou máquinas, por exemplo, que atuam e interagem com a intenção de alcançar um objetivo ou um propósito lógico". Além disso, Modelos podem ser classificados em físicos e lógicos (ou matemáticos). São uma representação, imitação dos sistemas reais (KELTON; SADOWSKI; STURROCK, 2007; BATERMAN *et al*.,2013).

O método a ser utilizado na modelagem de simulação é função do nível de abstração do sistema, e pode ser classificado em: método da modelagem baseada em agentes, modelagem de eventos discretos e modelagem de sistemas dinâmicos. Há também a possibilidade de se trabalhar com um modelo de simulação mista, onde elementos de dois ou mais métodos são utilizados no modelo de simulação (CHWIF; MEDINA, 2006; HOOGENDOORN; BOVY,2001).

2.2. Estudo de tráfego

A fim de avaliar o desempenho de um encontro de vias urbanas sob um plano semafórico, podem ser considerados atrasos, número de paradas, comprimento de filas, atraso para pedestres, consumo de combustíveis e fila residual ao término do sinal verde (TAYLOR; BONSALL; YOUNG,1996) como indicadores de desempenho. Para o cálculo desses indicadores é utilizada uma variável chamada Fluxo de Saturação (FS), que é um "número máximo de veículos que poderia passar em uma aproximação controlada por sinalização semafórica no caso dessa aproximação receber indicação verde durante uma hora inteira", e geralmente é um valor que fica no intervalo de 1600 a 2000 carros de passeio por hora por faixa (CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO, 2014).

Para fins de cálculo do tempo de ciclo máximo no sistema atuado pela estratégia de corte ótimo, pode ser adotado como tempo de ciclo fixo o tempo de ciclo real. Assim, o tempo de ciclo máximo seria calculado a partir do tempo de ciclo fixo (CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO,2014):

$$t_c = 1,4 * t_{cfixo} \qquad \text{Equação } (1)$$

Em que t_c é o tempo de ciclo adotado para o cálculo do verde máximo, em segundos; e t_{cfixo} é tempo de ciclo real adotado para tempo fixo, em segundos.

3. Método

Acerca dos procedimentos metodológicos, o presente trabalho pode ser classificado como pesquisa aplicada, descritiva, modelagem e simulação, quantitativa, pesquisa de campo (OLIVEIRA,2011).

Além disso, conforme a metodologia da modelagem e simulação de problemas elaborada por Chwif e Medina (2006), tal metodologia neste estudo se deu em três etapas: concepção ou formulação do modelo; implementação do modelo; análise dos resultados do modelo.

3.1. Coleta e análise dos dados reais

Neste estudo, foram feitas gravações em vídeo com diferentes intervalos de duração para a determinação do horário de pico de movimento, entre 6h30min e 8h20min da manhã, em seis dias diferentes, escolhidos aleatoriamente, entre segunda e sexta-feira, nos meses de abril a julho de 2017, para a coleta de dados. Para fins de contagem, desprezou-se o fluxo de motocicletas, uma vez que sua agilidade no transito local favorece serem consideradas como causa pouco

https://proceedings.science/p/106692?lang=pt-br

relevante dos congestionamentos. Além do mais, elas representavam apenas 23,1% da frota total de veículos de Natal em junho de 2017, enquanto que os automóveis, caminhões, camionetas, caminhonetes e utilitários representavam cerca de 71,5% (DETRAN/RN,2017).

O tratamento estatístico dos dados foi feito em planilha eletrônica e no *software* Arena Input Analizer®. À semelhança dos procedimentos de Santos e Alves (2014), para análise dos dados dos intervalos entre chegadas e dos tempos de travessia observados in loco, foram feitos os testes estatísticos de Kolmogorov-Smirnov (aderência à distribuição normal) e o teste qui-quadrado (comparação de proporções) para validar a significancia dos dados para a representação da equação de distribuição de probabilidade. Nos testes de Kolmogorov-Smirnov, obteve-se um valor de $p<0,05$, confirmando a não aderência dos dados à distribuição normal para todos as etapas do processo; para o teste do qui-quadrado, obteve-se um valor de $p<0,05$, confirmando a significancia dos dados para a representação das equações de distribuição de probabilidade erlang de fase 2, no caso dos intervalos entre chegadas, e weibull, para o caso dos tempos de travessia.

3.2. Desenvolvimento, verificação e validação do modelo

Tendo em mente que se trata de um sistema observável, o modelo desenvolvido neste trabalho foi validado inicialmente por uma abordagem subjetiva, a análise do comportamento do modelo. Posteriormente, após adequações e correções necessárias, utilizando uma abordagem objetiva, foi possível validar o modelo por comparação de testes estatísticos e procedimentos, de modo que o comportamento do sistema simulado se confundiu com o comportamento do sistema real quanto aos tempos de travessia do semáforo e quantidade média de veículos que chegam no sistema (SARGENT, 2013).

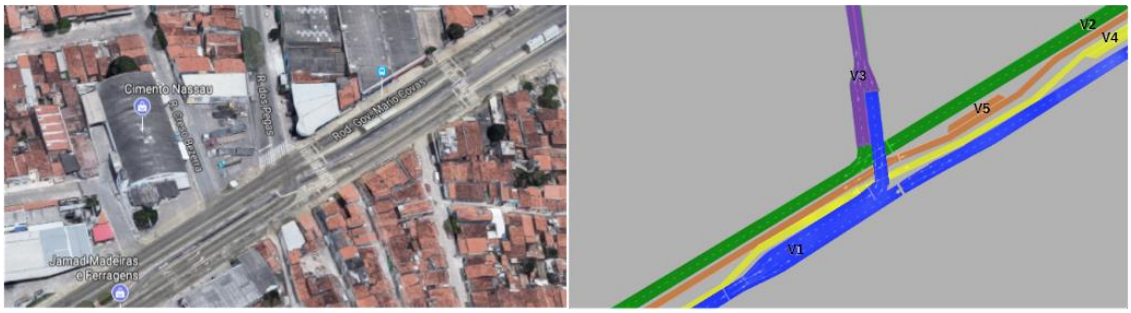
O cálculo da quantidade de replicações necessárias para a estabilização do sistema se deu por meio do método empírico de determinação do tamanho da amostra e proposto por Montgomery (2017):

$$n^* = [n(h/h^*)^2] \qquad \textit{Equação (2)}$$

Onde n* é o número de replicações necessárias para uma dada precisão h*, ou seja, a nova estimativa para n; h* é a precisão pretendida, isto é, a semi-amplitude do intervalo de confiança desejado; n é o número de replicações inicialmente efetuadas; e h é a precisão calculada para as replicações inicialmente efetuadas, isto é, a semi-amplitude do intervalo de confiança obtido.

3.3. Implementação

Baseado nos estudos de Sousa (2011), as taxas máximas de aceleração e desaceleração dos veículos no sistema simulado foram fixadas em 2,0 m/s2 e 4,2 m/s2, respectivamente. A Figura 1 apresenta uma nova nomenclatura para simplificar a interpretação dos movimentos.



(a) (b)

Figura 1: (a): Imagem de satélite do local de estudo. (b): Destaque das vias 1, 2, 3, 4 e 5.
Fonte: Adaptado de Google Maps, 2019

https://proceedings.science/p/106692?lang=pt-br

A Figura 1a ilustra a vista superior do encontro da Rua dos Pegas com Av. Bernardo Vieira em Natal/RN. Na Av. Bernardo Vieira há vias exclusivas para ônibus urbano nos dois sentidos, além das vias para automóveis de passeio. Desse modo, a Figura 1a introduz a substituição dos nomes das vias por códigos: V1, V2, V3, V4 e V5 mostrado na Figura 1b, onde V1 (em azul) e V2 (em verde) representam os dois sentidos da Avenida Bernardo Vieira para carros de passeio, V3 (em lilás) representa a Rua dos Pegas, e V4 (em amarelo) e V5 (em laranja) representam os dois sentidos das raias exclusivas para ônibus urbano na Avenida Bernardo Vieira.

No sistema estudado, uma parte dos veículos cruzam a intersecção, outra segue direto na Av. Bernardo Vieira. O tempo de travessia da interseção pelo agente pode ser entendido como tempo de processamento. Quando este tempo termina significa que o veículo cruzou a intersecção. O agente segue na via, completando assim o tempo total no sistema. Ao fazer a modelagem, foi possível identificar a formação de três filas na V1, como mostra a Figura 2.

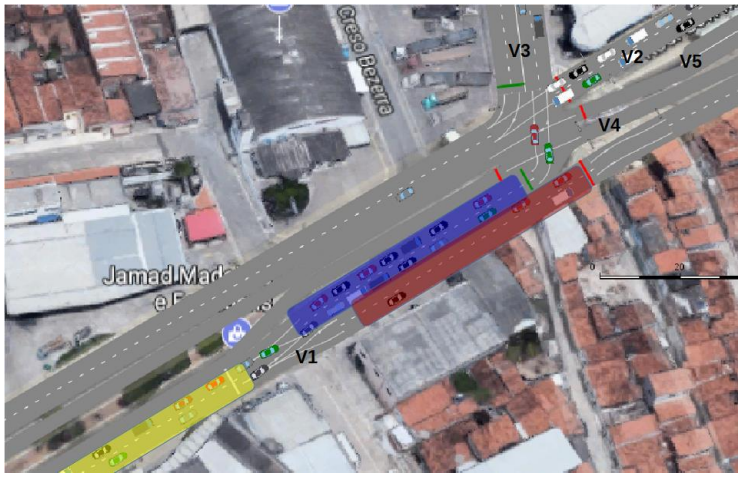


Figura 2: Imagem da formação de filas.
Fonte: Adaptado de Google Maps,2019

No horário de maior movimentação na Avenida Bernardo Vieira pela manhã, os veículos da Fila 2 (destacada em azul) se acumulavam quando o semáforo para estes carros se encontrava "fechado" e o semáforo da Fila 3 (em vermelho), com indicação de verde, isto é, "aberto", chegando ao ponto de, na fila 1 (em amarelo), os autos que fossem desta para a Fila 3 se encontrarem impedidos pelos carros que ainda passariam para a Fila 2. Esse era o momento em que ocorria de a Fila 3 estar vazia e a Fila 2, completamente cheia. O oposto também ocorria, gerando acúmulos constantes de veículos na Fila 1.

Após a execução de 200 simulações de 59 minutos cada, todos os dados do sistema alcançaram o estado estacionário, apresentando uma chegada média de 1.274 agentes no sistema por hora. O período de *warm-up*, ou período de "aquecimento" segundo Chwif e Medina (2006), terminou antes de 200 replicações corroborando os cálculos efetuados com a equação 2 que aponta para um número de replicações adequado de 184 para o alcance do estado estacionário, usando o número de replicações iniciais n = 20. As equações de distribuições de probabilidade geradas a partir dos dados coletados em campo foram erlang (0.851, 2) para intervalo entre chegadas e weibull(4.31, 3.34) para tempos de travessia. Após os testes estatísticos, o tempo médio de travessia calculado para o sistema real, 10,87s, foi semelhante ao tempo médio encontrado na simulação de 11,81s, com isso o modelo foi devidamente validado.

Assim, a partir das expressões das distribuições de probabilidade geradas e devido ao limite de carros na fila imposto pelo comprimento da pista onde a fila 2 é formada, localizada entre a fila 1 e a intersecção, foi possível identificar que o modelo de filas do sistema estudado é do tipo E2/Weibull/1/16/FIFO, apenas para a Fila 2, na V1, assumindo que entre os para-choques dianteiros de dois veículos parados na fila haja um espaço médio de 5 metros.

https://proceedings.science/p/106692?lang=pt-br

3.4. Experimentos

Doravante, ao referir o sistema de semáforos dinâmicos, será utilizado o termo atuado, conforme nomeia o Conselho Nacional de Trânsito (2014). A partir do modelo validado, foram construídos 3 outros sistemas, um para cada experimento.

3.*4.1. Experimento 1*

Inicialmente foi verificado a possibilidade de aumentar do fluxo caso fosse alterado apenas as simultaneidades dos tempos de verde, sem implementação do sistema dinâmico. A Figura 3 a seguir traz um comparativo entre quatro cenários possíveis.

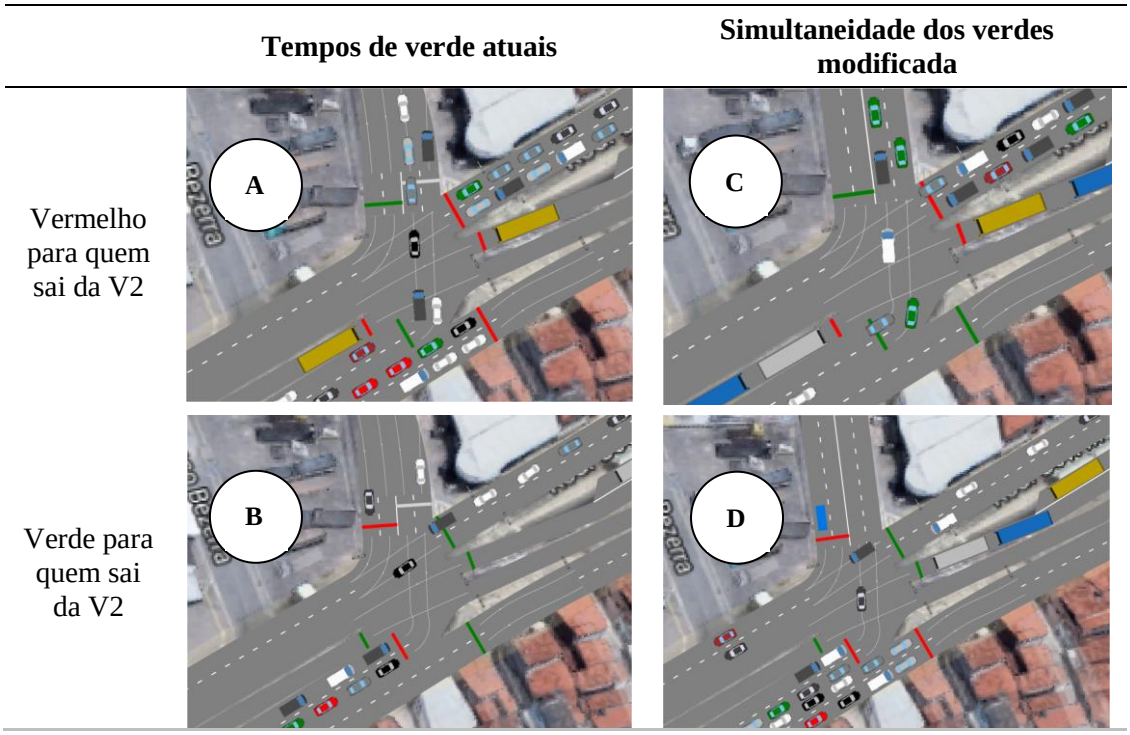


Figura 3: Experimento 1: modificação na simultaneidade dos tempos de verde
Fonte: Autores, 2019

No sistema real, para os veículos da V1 acessarem a V3, o trânsito em todas as demais vias precisa ser interrompido, inclusive o fluxo de veículos da V1 que se mantêm nas duas faixas da direita, ou seja, não pretendem acessar a V3, continuando na mesma avenida após a intersecção semafórica (Figura 3A). Quando o semáforo está vermelho para os carros na V2, para os tempos de verdes atuais, fica verde para a Fila 2 e vermelho para a Fila 3, na V1. Quando o semáforo está verde para os carros na V2, para os tempos de verdes atuais, fica vermelho para a Fila 2 e verde para a Fila 3, na V1 (Figura 3B). A hipótese inicial era a de que apenas a alteração na sincronização dos verdes traria benefícios para o fluxo de veículos no local. Assim foi elaborado o experimento 1, cujo funcionamento está descrito na coluna "Simultaneidade dos verdes modificados" da Figura 3, no qual quando o semáforo está vermelho para os carros na V2, o sinal fica verde para as Fila 2 e para a Fila 3 ao mesmo tempo, na V1 (Figura 3C). Analogamente, quando o semáforo está verde para os carros na V2, o sinal fica vermelho para a Fila 2 e para a Fila 3 na V1 (Figura 3D).

3.4.2. Experimento 2

A Figura 4 mostra o algoritmo desenvolvido para simulação do funcionamento do semáforo atuado no experimento.

https://proceedings.science/p/106692?lang=pt-br

```
if(stopLine5.getSignal().SIGNAL_YELLOW.equals(SIGNAL_YELLOW)){
    i=0;
    detector=0;
}
if(stopLine5.getSignal().SIGNAL_RED.equals(SIGNAL_RED)){
    pIdaVerde=acPIdaVerde(tempo3, tempo2, Media,2);
    ciclo=acCiclo(pIdaVerde); //Determina o tempo de ciclo
    tempo3=acTempo3(pIdaVerde); //Calcula o tempo de verde
        Media=60*detecMedio;
    if (ciclo==168){
        if(pIdaVerde>=145){
            pIdaVerde=145;
        }
    }
    pIdaVermelho=ciclo-(pIdaVerde+3);
    pVoltaVerde=pIdaVermelho-3;
    pVoltaVermelho=pIdaVerde+3;
}
```

Figura 4: Algoritmo do funcionamento do semáforo atuado.
Fonte: Autores, 2019

O comando if(stopLine5.getSignal().SIGNAL_RED.equals(SIGNAL_RED)) da Figura 4 controla a coleta e processamento dos dados para alimentação da equação (1) e determinação dos tempos de verde para cada semáforo do sistema, com tempo de verde máximo de 145 segundos e tempo de amarelo fixo de 3 segundos.

O controle semafórico foi caracterizado como totalmente atuado, haja vista que todos os estágios dependem do reconhecimento da demanda de veículos. A duração mínima do tempo de verde adotada na programação foi de 17 segundos (CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO, 2014).

O trecho estudado apresenta as condições adequadas para a leitura correta da demanda, pois é possível posicionar a detecção em trecho retilíneo, sem estacionamentos eventuais ou irregulares, nem via transversal; o trecho entre a seção de detecção e a linha de retenção é livre de interferência de ponto de ônibus. Como o objetivo foi minimizar o atraso total da intersecção através da identificação do melhor instante de corte do verde, a determinação da extensão do verde se deu pela estratégia de corte ótimo. Uma vez que o fluxo de saturação estudado foi de 1810 ucp/h, ou seja, FS = 0,5ucp/s por faixa, e o trecho estudado possui duas faixas, adotou-se o tempo de extensão de verde para corte ótimo de 1,8s (CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO, 2014).

Com o intuito de testá-lo, foi inserida a ferramenta Slider do *software* Anylogic substituindo a distribuição de intervalos entre chegadas por valores constantes determinados pelo analista através do manuseio da ferramenta durante a simulação. Dessa forma, o analista pode alterar os intervalos entre chegadas e verificar o funcionamento do sistema atuado, observando a influência nos tempos de ciclo e das fases do semáforo.

Uma vez comprovada pelo Slider a resposta do sistema à variação da demanda, o *Slider* foi desativado e o bloco *CarSource* voltou a ter o parâmetro erlang(0.851, 2, 0.12) como tempo entre chegadas para que fosse possível prosseguir com os testes para os dados em estado estacionário e elaboração de relatórios.

3.4.3. Experimento 3

O experimento 3 consistiu em manter o sistema atuado, mas com as configurações de sincronia dos verdes do sistema real. Foram gerados os dados para um sistema semafórico atuado com o funcionamento análogo ao experimento 2, mas com a sincronia dos tempos de verde sendo a mesma do modelo do sistema real.

4. Resultados e discussão

Ao fazer as implementações dos experimentos 1, 2 e 3 neste estudo, foi possível encontrar os valores esperados para os tempos médios de espera na fila, quantidade média de agentes nas filas e tempos totais médios no sistema da V1 descritos na Tabela 1.

https://proceedings.science/p/106692?lang=pt-br

Tabela 1: Resultados esperados das simulações.

Médias (em min)	Real	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3
Tempo no sistema Fila 2	3,16	2,27	0,77	0,76
Tempo no sistema Fila 3	1,75	2,12	0,90	4,11

Fonte: Autores, 2019

A Figura 5 a seguir apresenta um gráfico *boxplot* comparativo entre os tempos (em verde) dos agentes nas filas 1, 2 e 3 e os tamanhos (em azul) das filas 1, 2 e 3 para os quatro modelos: o modelo do sistema real, e os modelos dos experimentos 1, 2 e 3.

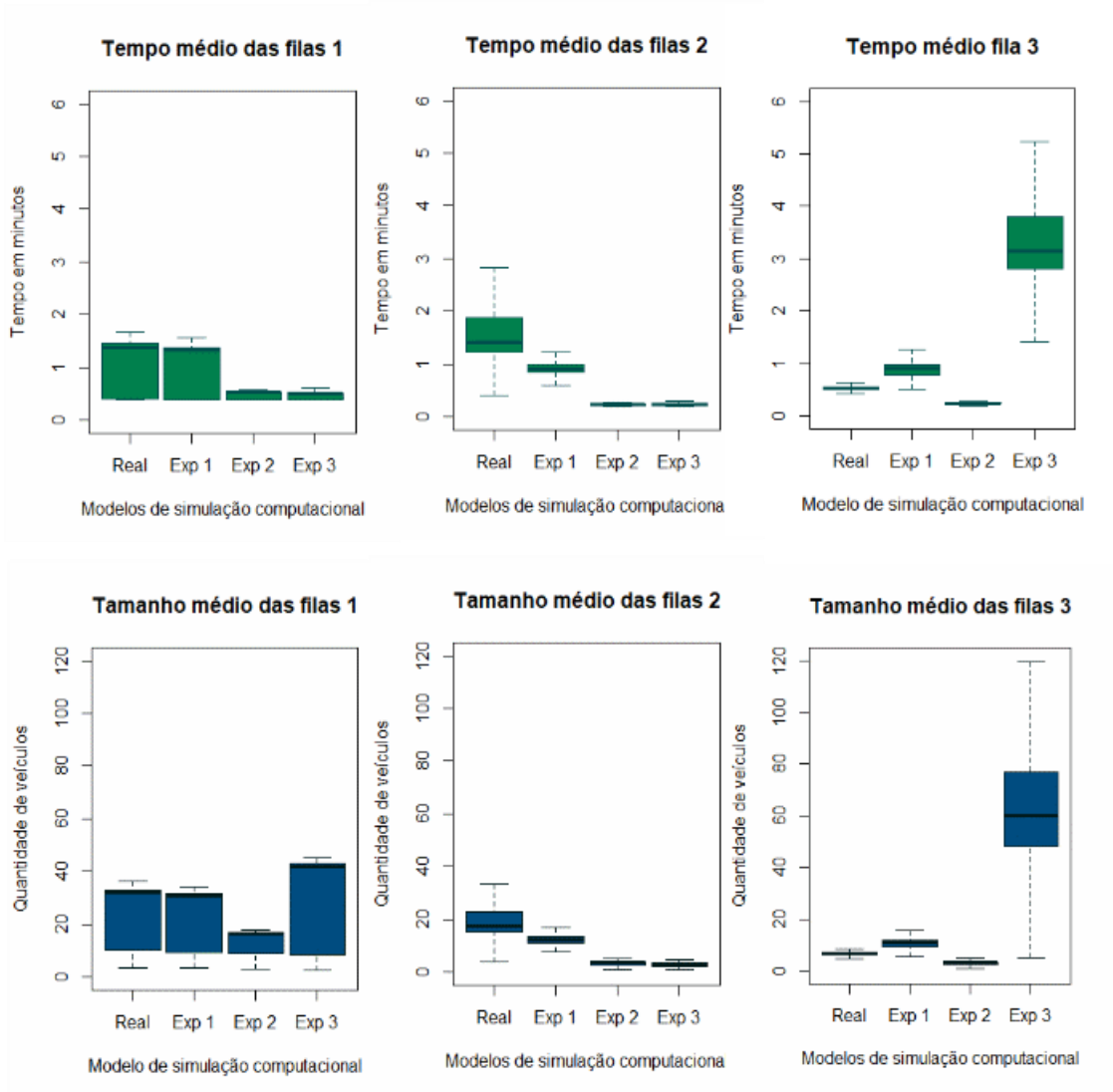


Figura 5: Dados filas 1, 2 e 3.
Fonte: Autores, 2019

Entretanto, essas mudanças interferiram também no fluxo de outros veículos que passaram em sentido oposto (V2) ao fluxo objeto do estudo, incluindo também perturbações no tráfego de ônibus urbano. Dentre estas filas afetadas, nas faixas exclusivas para ônibus urbano nas V4 e V5, não ocorreram mudanças significativas nos três experimentos para os tempos (variações de menos de 0,03 min) e tamanhos das filas (variações de até 0,05 ônibus). A Figura 6 a seguir mostra os dados gerados para as filas na V2.

https://proceedings.science/p/106692?lang=pt-br

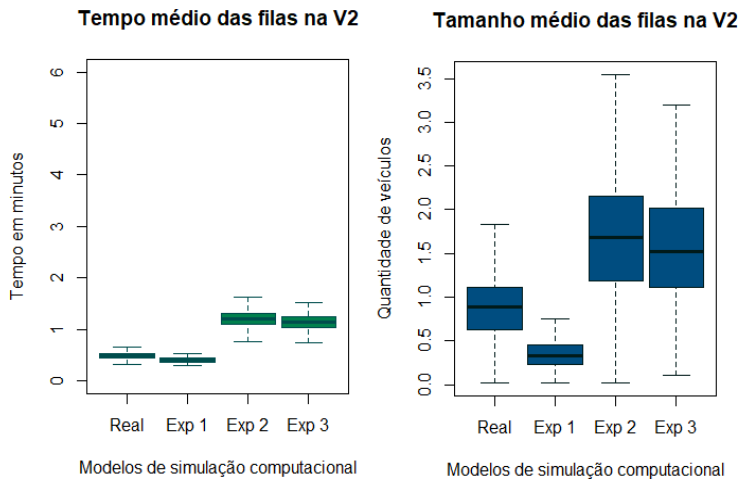


Figura 6: Dados para as filas da V2
Fonte: Autores, 2019

Também foram analisados os tempos de travessia, para os automóveis que encararam a Fila 2, saindo do sistema pela V3, como mostra a Figura 7 a seguir.

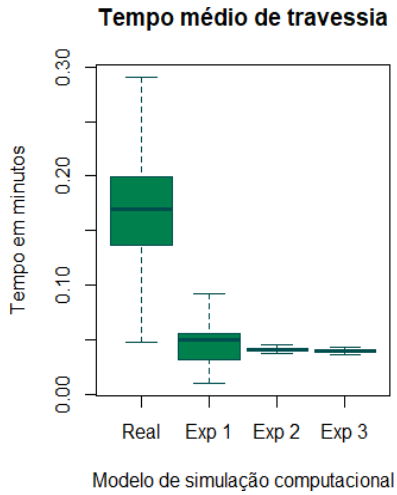


Figura 7: Boxplot dos dados para os tempos de travessia
Fonte: Autores, 2019

Conforme observado nas gravações em vídeo e implementado no algoritmo, cerca de 53,7037% dos autos entraram na Fila 2. No experimento 1, o tempo no sistema para os veículos que enfrentaram a fila 2 reduziu cerca de 28% e, para os que enfrentaram a fila 3, aumentou cerca 21% quando comparados com os dados referentes ao comportamento do sistema atual (Tabela 1). No experimento 2, o tempo no sistema para os veículos que enfrentaram a fila 2 reduziu cerca de 75%, e, para os que enfrentaram a fila 3, encolheu 48% quando comparados com os dados referentes ao comportamento do sistema atual. No experimento 3, o tempo médio no sistema reduziu para a fila 2 e aumentou para a fila 3.

4.1. Discussão

Nos resultados para o experimento 1, uma medida simples como alterar apenas as sincronias dos tempos de verde na intersecção semafórica, mostraram ser promissor uma mudança pequena e sem custos relevantes. Portanto a leve redução das filas e tempos em vários pontos do sistema, inclusive para veículos que vieram no sentido oposto da via, com prejuízo

https://proceedings.science/p/106692?lang=pt-br

apenas para a fila 3, onde tanto os tempos de fila e tempos no sistema, quanto as quantidades na fila foram elevadas, apenas corrobora com as afirmações de Fogliatti e Mattos (2007), que diz que as alterações em determinadas medidas de desempenho influenciarem outras dentro do sistema.

Ao analisar o experimento 2, pelo fato de se ter aplicado a estratégia de corte ótimo e mantendo a sincronia dos tempos de verde estabelecia no experimento 1, foi o modelo que apresentou os melhores resultados para os veículos da V1, tanto para aqueles que convergiram para a V3 na travessia do semáforo quanto para os que permaneciam na V1 após o semáforo, pois foi a via escolhida para a instalação de detectores para a estratégia de corte ótimo. Entretanto isso prejudicou o fluxo de veículos advindos da V2, que passaram a esperar mais que o dobro do tempo, em filas quase duas vezes maiores para cruzarem a intersecção, visto serem menores que os valores da V1. Esses resultados coincidem com as afirmações do Conselho Nacional de Trânsito (2014), que recomenda também que seja escolhido exclusivamente a detecção do movimento crítico para instalação do semáforo atuado, qual seja, a V1, somente no horário da manhã. Como já eram vias pouco movimentadas, esses aumentos nos tempos e filas da V2 podem ser considerados aceitáveis, ou não, pelos tomadores de decisão.

Os resultados do experimento 3, embora indiquem melhorias para muitas filas, em alguns pontos apontam para o problema inicial, qual seja, quando a demanda do sistema se encontra elevada e fecha-se apenas o semáforo para quem deseja seguir na Via 1, forma-se uma fila (Fila 3) enquanto a fila do lado (Fila 2) é esvaziada. Ocorre que a Fila 3 cresce ao ponto de impedir o acesso dos veículos da Fila 1 que desejem entrar na Fila 2.

Ao contrário do que se imaginava, a extensão de verde gerada pelo sistema atuado não provocou grandes mudanças nas filas de ônibus. Este fato pode ter sido favorecido pela via exclusiva para ônibus urbano existente no local. É possível identificar uma influência do tamanho da fila 2 no tempo de processamento e tempo médio no sistema, de modo que para um tamanho maior da fila 2, o tempo de travessia e tempo médio no sistema tendem a ser mais elevado. Por isso entende-se que o sistema estudado apresenta comportamento não Markoviano no movimento dos automóveis, haja vista que a velocidade de travessia de um agente depende da velocidade do veículo à frente na intersecção. Esse comportamento vai ao encontro das afirmações de Fogliatti e Mattos (2007) e Shortle *et al*. (2008), que dizem que, satisfeitas as condições, o sistema semi-markoviano com distribuição E_k pode, ou não, ser reduzido a um processo de Markov.

5. Conclusão

O objetivo geral proposto neste estudo foi atendido, qual seja, encontrar soluções para melhorar o fluxo de veículos por meio da modificação do funcionamento do semáforo em simulações. Essas soluções oferecem três opções de intervenções para a melhoria do trânsito local.

Desse modo, pode-se afirmar que o estado atual do sistema estudado, no que se refere ao funcionamento do semáforo no local, apresenta-se pouco eficiente, podendo ser melhorado, conforme os resultados mostrados, mediante intervenções simples, de custo próximo a zero, para o caso de apenas proceder a modificação na sincronização dos tempos de verde. Portanto, os dados gerados neste trabalho indicam também que a implementação de um semáforo atuado na área simulada no estudo favorece a redução do tempo de fila e da quantidade de veículos presos no congestionamento local. Embora se saiba da teoria das restrições que ao dirimir um gargalo num ponto do sistema, gera-se outro noutro local, este trabalho integra o conjunto de pequenas soluções que contribuam para a melhoria contínua do sistema.

Pelo fato de as simulações computacionais representarem uma aproximação de sistemas reais, dificilmente representarão fielmente e em detalhes o comportamento real. Por isso, o estudo levou em consideração apenas o fluxo de veículos na interseção, desprezando na análise o fluxo de pedestres no cruzamento, pelo que constituem um tema para estudos posteriores.

https://proceedings.science/p/106692?lang=pt-br

Referências

ARENALES, M. et al. **Pesquisa Operacional:** Para cursos de engenharia. Elsevier Brasil, 2015. ISBN 9788535281835. Disponível em:<https://books.google.com.br/books?id=aZbpCgAAQBAJ>.

BATERMAN, R. E. et al. **Simulação de Sistemas:** Aprimorando Processos de Logística, Serviços e Manufatura. Elsevier Brasil, 2013. ISBN 9788535271638. Disponível em:<https://books.google.com.br/books?id=82HcAwAAQBAJ>.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos.** (S.l.): Afonso C. Medina, 2006.

Conselho Nacional de Trânsito. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito:** VOLUME V Sinalização Semafórica. Brasília: CONTRAN, 2014. Disponível em:<http://www.denatran.gov.br/images/Educacao/ Publicacoes/Manual{_}Semaforico{_}Vol>.

DETRAN/RN. Governo do estado do Rio Grande do Norte. **Relatório estatístico da frota de veículos** - renavan, de janeiro a junho de 2017. 2017. Disponível em:<http://adcon.rn.gov.br/acervo/detran/doc/ DOC000000000161970.PDF>.

DOWNS, A. **Still Stuck in Traffic:** Coping with Peak-Hour Traffic Congestion. Brookings Institution Press, 2005. (James A. Johnson Metro Series). ISBN 9780815796558. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=ckLcxEb5tM8C>.

FOGLIATTI, M. C.; MATTOS, N. M. C. **Teoria de filas.** Rio de Janeiro: Interciência, 2007. ISBN 9788571931572.

HOOGENDOORN, S. P.; BOVY, P. H. L. State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: **Journal of Systems and Control Engineering**, v. 215, n. 4, p. 283–303, 2001. Disponível em:<http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ 09596518012150040 2#articleShareContainer>.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estimativas populacionais para os municípios e para as Unidades da Federação brasileiros em 01.07.2016. IBGE/DPE/COPIS, 2016.Disponível em: <ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2016/estimativa_ dou_2016_20160913.pdf>. Acesso em 23 nov 2016.

KELTON, W.; SADOWSKI, R.; STURROCK, D. **Simulation with Arena.** McGraw-Hill Higher Education, 2007. (McGraw-Hill series in industrial engineering and management science). ISBN 9780073523415. Disponível em:<https://books.google.com.br/books?id=DeymQgAACAAJ>.

KLEINROCK, L.; GAIL, R. **Queuing Systems.** New York: Interciência, 1996. ISBN 9780471555681.

MARCONI, M. D. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica.** (S.l.): 5. ed.-São Paulo: Atlas, 2003.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments.** (S.l.): John wiley & sons, 2017.

OLIVEIRA, M. F. d. **Metodologia científica:** um manual para a realização de pesquisas em administração. 2011.

PIGNATARO, L. J. **Traffic Engineering:** Theory and Practice. New Jersey: Prentice Hall, 1973.

SANTOS, J. A. A. dos; ALVES, R. Modelagem, simulação e otimização da dinâmica operacional de um pequeno restaurante: Um estudo de caso. **HOLOS**, v. 4, p. 375–386, 2014.

SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. **Journal of simulation**, Springer, v. 7, n. 1, p. 12–24, 2013.

SCHMIDT, J.; TAYLOR, R. **Simulation and Analysis of Industrial Systems**. Richard D. Irwin, 1970. (TheIrwin series in quantitative analysis for business). Disponível em:<https://books.google.com.br/books?id=UNZEAAAAIAAJ>.

SHORTLE, J. F. et al. **Fundamentals of queueing theory.** (S.l.): John Wiley & Sons, 2008.

Sistema FIRJAN. **Custo dos deslocamentos nas regiões metropolitanas do Brasil - Natal.** (S.l.), 2015.

SOUSA, L. A. P. D. **Taxas de Desaceleração e Tempos de Percepção e Reação dos Motoristas em Interseções Semaforizadas.** Dissertação (B.S. thesis) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2011.

TAYLOR, M.; BONSALL, P.; YOUNG, W. **Understanding Traffic Systems:** Data, Analysis, and Presentation. Avebury Technical, 1996. Disponível em:<https://books.google.com.br/books?id= C3knAQAAMAAJ>.

https://proceedings.science/p/106692?lang=pt-br