

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE TRÁFEGO: Proposta de melhoria no cruzamento com sinal semafórico na Zona Oeste de Macapá-AP

Alexandry Ripke Donin¹
Ricardo José Hundelshausen Rubio²

RESUMO

Este trabalho utiliza a simulação computacional como ferramenta de análise para um modelo de tráfego de veículos cujo objetivo é propor melhorias no sistema e auxiliar na tomada de decisão, evitando assim gastos de recursos econômicos com a implantação de uma determinada ação. O cruzamento com sinal semafórico analisado fica situado na zona oeste de Macapá-AP, onde atende a maior parte do fluxo de tráfego para tal zona, incluindo a entrada de uma instituição de ensino superior considerada como polo gerador de tráfego. A coleta de dados foi realizada por meio de vídeos do sistema de monitoramento de trânsito da Companhia de Trânsito e Transporte de Macapá (CTMac) durante uma semana para, posteriormente, serem utilizados como dados de entrada no modelo computacional. Vinte cenários alternativos foram criados, realizando-se modificações apenas nos tempos das fases dos semáforos, especificamente no tempo verde e, conseqüentemente, no tempo vermelho (respeitando-se o tempo de ciclo). Os resultados obtidos demonstraram a possibilidade de melhoria no desempenho do cruzamento analisado sem alteração da estrutura física, tornando o tráfego mais eficiente, reduzindo as filas do fluxo de tráfego e, conseqüentemente, minimizando o impacto ambiental causado pela emissão de gases poluentes. Para tal finalidade, foi utilizado o *software* de simulação computacional *InfraWorks* da *Autodesk*®.

Palavras-chave: Modelagem de transporte. Simulação computacional. Fluxo de Tráfego.

ABSTRACT

This article uses computer simulation as an analysis tool for a vehicle traffic model whose objective is to propose improvements in the system and assist in decision-making, thus avoiding spending of economic resources with the implementation of a given action. The intersection with the analyzed traffic light is located in the western area of Macapá - AP, where it meets most of the traffic flow to that area, including the entrance to a higher education institution considered as a traffic-generating pole. Data collection was performed using videos from the traffic monitoring system of the Companhia de Trânsito e Transporte de Macapá - CTMac for one week to later be used as input data in the computational model. Twenty alternative scenarios were created, making changes only in the times of the traffic light phases, specifically in the green time and, consequently, in the red time (respecting the cycle time). The results obtained demonstrated the possibility of improving the performance of the analyzed crossing without reforming the physical structure, making the traffic more efficient, reducing the traffic flow queues and, consequently, minimizing the environmental impact caused by the emission of polluting gases. For this purpose, Autodesk® InfraWorks computer simulation software was used.

Keywords: Transport modeling. Computer simulation. Traffic flow.

¹ Acadêmico do curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Centro de Ensino Superior do Amapá – CEAP, Duca Serra, Via 17, N 350, Alvorada, 68906720 – Macapá – AP, (96) 98115-6197, aledonin@gmail.com.

² Professor do curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Centro de Ensino Superior do Amapá – CEAP, Duca Serra, Via 17, N 350, Alvorada, 68906720 – Macapá – AP, rhundelshausen@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

Hodiernamente, cidades de médio e grande porte convivem com sérios problemas de congestionamento de veículos em suas vias urbanas, principalmente nos horários de pico. Esses problemas vêm se agravando ainda mais devido a vários fatores, dentre eles pode-se mencionar: rápido crescimento populacional, priorização da utilização de veículos próprios como meio de transporte em vez de meios de transportes públicos como alternativa para desafogar o trânsito, sobrecarga na capacidade das vias, conduta inadequada de motoristas, semáforos não otimizados, pouco investimento no planejamento urbano, condições de deterioração das vias, dentre outros.

Segundo o Relatório do Mapa da Motorização Individual no Brasil apresentado por Rodrigues *et al.* (2019), a evolução da frota de automóveis (carros e motocicletas) tem aumentado significativamente entre 2008 e 2018. De acordo com esse relatório, o total de automóveis passou de 37,1 milhões para 65,7 milhões, gerando um acréscimo na frota brasileira de 28,6 milhões de automóveis (aproximadamente 77%). Além disso, a taxa de motorização passou de 19,6 automóveis por cada 100 habitantes em 2008 para 29,7 autos/100 hab em 2018.

Nesse mesmo período, o maior crescimento percentual aconteceu na Região Norte, que passou de pouco mais de 1 milhão de automóveis para mais de 2,3 milhões, representando um crescimento de 116%. Por outro lado, a frota de motos nesses mesmos dez anos passou de 13 milhões para 26,7 milhões. As mais de 13,7 milhões de unidades que foram acrescentadas à frota nesse período correspondem a uma variação percentual superior a 105%. A taxa de motorização passou de 6,9 motos para cada 100 habitantes em 2008 para 12,8 motos/100 hab em 2018.

Atualmente, segundo o Registro Nacional de Veículos Automotores (RENAVAM), o total da frota de veículos na Região Norte do Brasil é de, aproximadamente, 5,5 milhões³, dos quais somente o Estado do Amapá possui perto de 207 mil veículos. Considerando a população estimada⁴ para o ano de 2019 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a taxa de motorização seria de, aproximadamente, 24,6 veículos por cada 100 habitantes, o que indica claramente que o Estado do Amapá possui uma das maiores taxas de motorização da Região Norte se considerado o difícil acesso que o referido Estado possui em relação ao modal de transporte rodoviário.

Dessbesell *et al* (2015, p. 1) comenta que:

o crescimento do número de veículos faz com que a infraestrutura de transportes fique saturada rapidamente. Situação que se agrava devido ao tempo necessário para que obras de mobilidade urbana sejam realizadas. Isso faz com que o fluxo de veículos seja prejudicado, gerando lentidão, congestionamentos e aumentando o tempo que as pessoas passam dentro dos veículos diariamente.

De acordo com Kondro (2010) citado por Da Silva (2019, p. 1),

O crescimento do volume de veículos tornou-se inevitável para cumprir com as necessidades humanas. Todavia, acaba

resultando em consequências, como doenças mentais e estresse, proporcionadas pelo longo período obtido nas locomoções e momentos estressantes ocorridos no trânsito, afetando assim a saúde e a qualidade de vida dos motoristas.

São muitas as horas que anualmente se perdem nos congestionamentos de trânsito, principalmente nos semáforos. Segundo o Índice de Tráfego *TomTom*⁵, na cidade de Recife-PE, por exemplo, os motoristas utilizam cerca de 193 horas por ano (8 dias e 1 hora, aproximadamente) simplesmente por conta do trânsito das vias.

Por outra parte, Tiwary (2011) comenta que “o tráfego de veículos é o principal emissor de poluentes nas grandes metrópoles. O maior índice de emissão de poluentes ocorre em engarrafamentos, onde verificou-se que a emissão ocorre no momento em que os veículos estão parados e após arrancam, o que ocorre frequentemente nessa situação” (*apud* DA SILVA *et al.*, 2019, p. 2).

Existem algumas ações que podem ajudar a minimizar esses problemas, tais como: a otimização de semáforos tradicionais (que visa evitar a formação de filas, ociosidade de algum semáforo, exposição de pedestres, desrespeito à sinalização, dentre outros); a utilização de semáforos inteligentes (que permitem combinar os semáforos tradicionais com uma variedade de sensores e inteligência artificial para direcionar de forma inteligente o tráfego de veículos e pedestres); e a utilização de simulação computacional (que visa reproduzir as características intrínsecas da área estudada, utilizando dados reais e propondo melhorias no sistema de tráfego).

Considerando que as universidades são Polos Geradores de Tráfego (PGTs)⁶, questiona-se: como utilizar a simulação computacional para melhorar o fluxo de tráfego observado na interseção da Rodovia Duca Serra e a saída do Centro de Ensino Superior do Amapá (CEAP), situados na zona oeste da cidade de Macapá-AP, onde há sinalização semaforica fixa?

O principal problema nesta interseção são os grandes congestionamentos gerados na saída do CEAP, principalmente, no término do horário letivo. A ideia desta proposta é determinar, em primeiro lugar, o horário com maior congestionamento (horário de pico) e, posteriormente, simular, dentre esse horário, o comportamento do fluxo veicular, realizando modificações nos tempos das fases dos semáforos fixos (verde e vermelho), a fim de melhorar o gerenciamento de veículos, evitando tempos de espera desnecessários. Para tal finalidade, será utilizado o *software* de simulação computacional *InfraWorks* da *Autodesk*®.

Este trabalho tem como objetivo geral propor melhorias para o fluxo de tráfego observado na interseção da Rodovia Duca Serra e a saída do Centro de Ensino Superior do Amapá (CEAP), onde há sinalização semaforica fixa, por meio da ferramenta de simulação computacional como análise para um modelo de tráfego de veículos.

Para o alcance deste foram definidos os seguintes objetivos específicos: i) descrever os estudos dos movimentos numa interseção de vias; ii) proceder aos estudos das condicionantes locais para implantação da proposta de melhoria de tráfego veicular no cruzamento objeto da pesquisa; iii) demonstrar a possibilidade de melhoria no desempenho do cruzamento analisado sem alteração da estrutura física, tornando

³Informações disponibilizadas pelo Departamento Nacional de Trânsito – DENATRAN até março de 2020. Disponível em: <<https://infraestrutura.gov.br/component/content/article/115-portal-denatran/8552-estat%C3%ADsticas-frota-de-ve%C3%ADculos-denatran.html>> Acesso em: 18 maio 2020.

⁴845.731 pessoas. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ap/panorama>> Acesso em: 18 de maio de 2020.

⁵ Índice de Tráfego que classifica o congestionamento urbano em 2019. Disponível em: <https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/recife-traffic> Acesso em: 18 de maio de 2020.

⁶ Edificações permanentes que atraem ou produzem grande número de viagens ao longo de um período determinado.

o tráfego mais eficiente, com a redução das filas do fluxo de tráfego.

Para a consecução deste trabalho foi realizada o procedimento da pesquisa bibliográfica com abordagem da pesquisa qualitativa. Realizou-se ainda o levantamento de informações para as contagens volumétricas por meio da análise de filmagens que foram disponibilizados pela Companhia de Transportes e Trânsito de Macapá (CTMAC), no período de 05 de fevereiro a 11 de fevereiro de 2020 (exceto final de semana). Para a análise dos resultados obtidos foi utilizado o *software* de simulação computacional *InfraWorks* da *Autodesk*®.

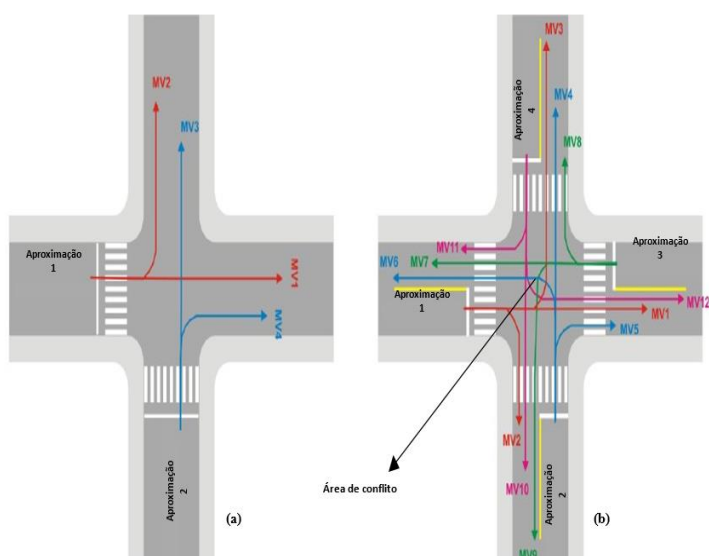
O artigo em questão apresenta no capítulo 2 a fundamentação teórica, iniciando com as características de um sistema semafórico e como funciona as terminologias dos estudos dos movimentos, seguindo pela simulação de tráfego e forma de aplicação. O capítulo seguinte restringe, apresenta e caracteriza o local analisado por essa pesquisa, além de expor os dados obtidos e a nomenclatura que será utilizada no decorrer do artigo. Tendo por sequência os capítulos 4 e 5 que apresentam, respectivamente, os resultados obtidos por meio das simulações e qual seria a tomada de decisão dos autores acerca da análise dos resultados obtidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ESTUDO DOS MOVIMENTOS NUMA INTERSEÇÃO

Segundo o Manual de Sinalização Semafórica (CONATRAN, 2014), as vias que se interceptam em uma interseção são classificadas em vias principais e vias secundárias. A “via principal” é aquela que tem maior volume de tráfego em relação àquelas que a interceptam. As demais vias são denominadas “vias secundárias”. O termo “movimento” numa interseção é utilizado para identificar o fluxo de veículos que têm a mesma origem e o mesmo destino, mas não necessariamente o mesmo sentido. Graficamente, o movimento é representado por traço e seta, onde o “traço” indica a direção e a “seta” indica o sentido.

Figura 1 - (a) Interseção de vias de mão única (b) Interseção de vias de mão dupla.



Fonte: Modificado de CONATRAN (2014).

A Figura 1a mostra a interseção de duas vias de mão única com movimentos veiculares (MV). Os movimentos MV1 e MV2 possuem a mesma origem; porém, destinos diferentes. O mesmo ocorre com os movimentos MV3 e MV4. Os trechos de via por onde os veículos chegam à interseção são denominadas “aproximações” da interseção. A Figura 1b ilustra as aproximações em uma interseção de duas vias de mão dupla. A área da interseção onde os movimentos veiculares oriundos das diferentes aproximações podem interferir entre si é denominada “área de conflito”.

2.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO CONTROLE SEMAFÓRICO

Segundo Souza *et al.* (2018, p. 4), “os semáforos são dispositivos que controlam o tráfego em interseções, mas devem ser instalados corretamente para evitar a formação de filas, ociosidade de algum semáforo, exposição de pedestres e até desrespeito à sinalização”. Na definição do controle semafórico, são utilizados alguns elementos (ou termos) importantes envolvidos dentro da programação semafórica, como, por exemplo, grupo de movimentos, tempo de ciclo, fila, atraso, estágio, intervalo luminoso, plano semafórico, entreverdes, volume de tráfego, taxa de fluxo, dentre outros. Recomenda-se ao leitor estar familiarizado com esta terminologia. Uma descrição extensiva e detalhada desses elementos pode ser encontrada em CONATRAN (2014).

2.3 SIMULAÇÃO

Segundo Tapani (2008), um modelo de simulação é uma representação matemática de um sistema dinâmico que pode ser utilizado para extrair conclusões sobre as propriedades do sistema real. De acordo com Aragão (2011) “a simulação computacional é uma ferramenta que auxilia na tomada de decisão, gera resultados consistentes e diminuem o tempo de resposta” (*apud* SOUZA *et al.*, 2018, p. 4).

Por outra parte, Sousa (2012) comenta que as análises produzidas pelos simuladores permitem avaliar uma série de cenários possíveis em um ambiente virtual, evitando assim gastos de recursos econômicos com a implantação de uma determinada ação.

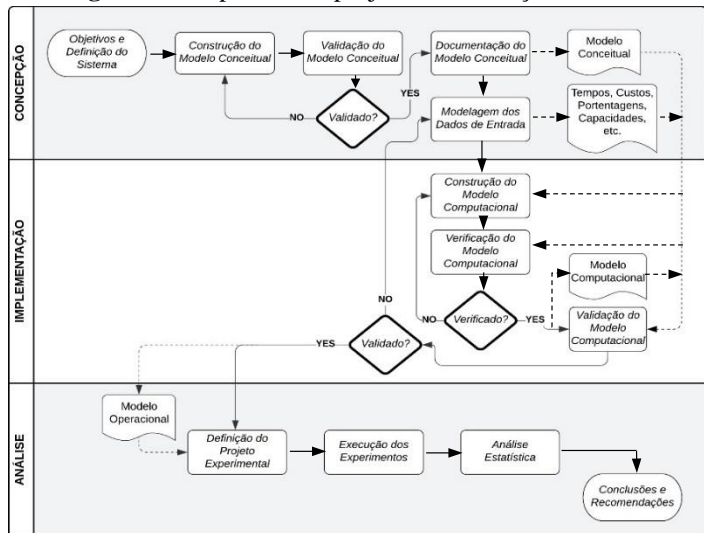
2.4 SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

Modelos de simulação de tráfego são projetados para imitar as operações de tráfego em um intervalo de tempo em uma rede rodoviária. Geralmente, esses modelos são classificados em relação ao nível de detalhamento da modelagem. De um lado, existem modelos microscópicos nos quais são considerados as interações entre veículos individuais (como carros, ônibus, motos) diante do fluxo de tráfego. No outro lado, existem modelos macroscópicos em que parâmetros, como densidade, velocidade, fluxo de tráfego e as relações entre eles, são usados para descrever o comportamento do tráfego. Nesses tipos de modelos, o nível de detalhamento costuma ser baixo. Finalmente, o modelo mesoscópico (que representa a camada intermediária entre essas abordagens) descreve os elementos de transporte analisados em pequenos grupos. Modelos mesoscópicos são uma combinação de modelagem microscópica e de modelagem macroscópica (ARAÚJO, *et al.*, 2019; NASUHA; ROHANI, 2018; EHLERT *et al.*, 2017; SARNÊ; POSTORINO, 2016; TAPANI, 2008).

2.5 FASES PARA ELABORAÇÃO DE UM PROJETO DE SIMULAÇÃO

Montevechi *et al* (2010) teorizam que há três fases importantes para a elaboração de um projeto de simulação, sendo elas: fase de concepção (modelo conceitual), fase de implementação (modelo de computador) e fase de análise (modelo operacional). A Figura 2 mostra um fluxograma adaptado de Montevechi *et al* (2010), no qual são apresentadas as etapas de cada uma dessas fases.

Figura 2 - Etapas de um projeto de simulação.



Fonte: Modificado de MONTEVECHI *et al* (2010).

Com base nas fases propostas por Montevechi *et al* (2010), este trabalho utiliza a simulação computacional para modelos microscópicos na interseção entre a Rodovia Duca Serra e a Travessa Dezessete, onde está localizada a saída do CEAP, situados na zona oeste da cidade de Macapá – AP (ver Figura 3). Para tal finalidade, é utilizado o *software* de simulação computacional *InfraWorks* da *Autodesk*®.

Figura 3 - Localização da área de estudo.



Fonte: Google Maps (Acesso em: 18 de maio de 2020).

3 CARACTERÍSTICAS DO LOCAL DE ESTUDO

A Figura 4a mostra a interseção entre a Rodovia Duca Serra

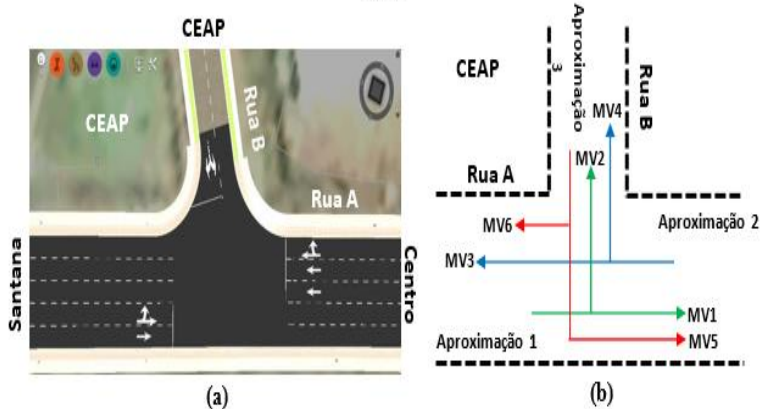
(Rua A) e a Travessa Dezessete da saída do CEAP (Rua B). A Figura 4b mostra a representação dos movimentos (MV) e das aproximações, que estão distribuídas da seguinte maneira:

Aproximação 1: Rua A, sentido Santana/Centro – (MV1 e MV2).

Aproximação 2: Rua A, sentido Centro/Santana – (MV3 e MV4).

Aproximação 3: Rua B – (MV5 e MV6).

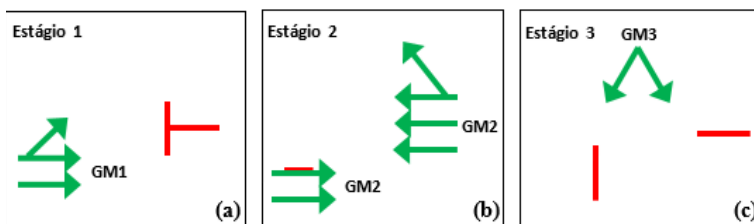
Figura 4 - (a) Interseção entre a Rua A e a Rua B (b) Representação dos movimentos entre a Rua A e a Rua B.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A definição do grupo de estágios está relacionada de acordo com a Figura 5a-c.

Figura 5 - Diagrama de estágios (a) Estágio 1 (b) Estágio 2 (c) Estágio 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde:

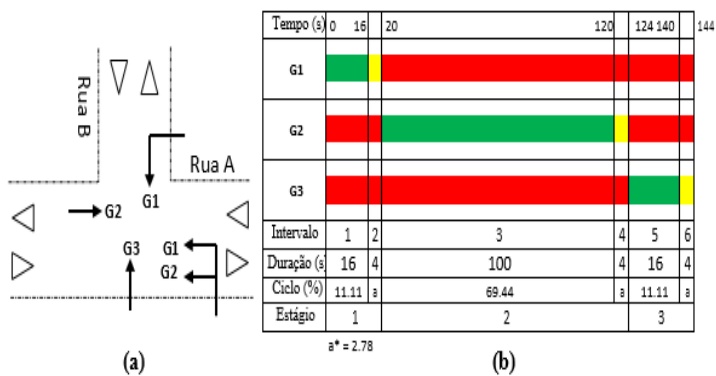
GM1: grupo de movimentos 1 (MV1 e MV2).

GM2: grupo de movimentos 2 (MV1, MV3 e MV4).

GM3: grupo de movimentos 3 (MV5 e MV6).

A Figura 6a mostra a distribuição dos grupos semafóricos G1, G2 e G3, para os três semáforos (grupos focais) que estão localizados na referida interseção. A Figura 6b mostra o diagrama de intervalos luminosos (diagrama de barras) para os tempos in situ. A cronometragem das fases dos semáforos fixos (verde, amarelo e vermelho) foi realizada através de visitas in situ. O tempo de ciclo para a interseção em estudo é de 144 segundos.

Figura 6 - (a) Distribuição dos grupos semafóricos (b) Diagrama de intervalos luminosos para o tempo de ciclo de 144s.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde:

- G1: grupo semafórico 1 – Rua A, que indica a sinalização para os GM1.
- G2: grupo semafórico 2 – Rua A, que indica a sinalização para o GM2.
- G3: grupo semafórico 3 – Rua B, que indica a sinalização para o GM3.

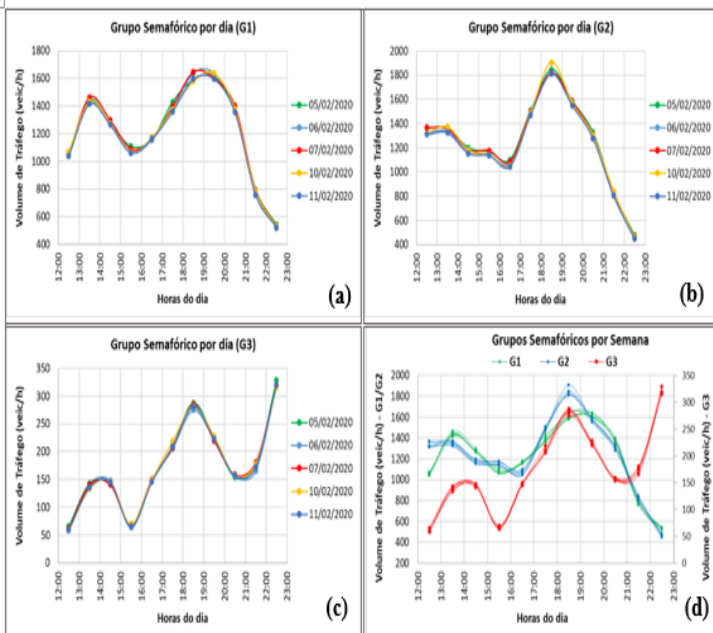
3.1 CONTAGENS VOLUMÉTRICAS

O levantamento dos dados para as contagens volumétricas ocorreu através da análise de filmagens que foram disponibilizados pela Companhia de Transportes e Trânsito de Macapá (CTMAC) durante os dias 05 de fevereiro de 2020 a 11 de fevereiro de 2020 (exceto final de semana). Como o horário letivo do CEAP é das 14:00 até 22:30, foi utilizado, para fins deste trabalho, um período de análise de 11 horas contínuas (das 12:00 até 23:00). Durante esse período, as contagens foram classificadas por tipo de veículo (motos, carros, vans, ônibus, caminhões, dentre outros) e registradas a cada 15 minutos.

3.2 VOLUME DE TRÁFEGO E HORÁRIO PICO

Uma das características mais importantes do volume de tráfego (ou fluxo de tráfego) é sua variação ao longo do tempo (horas do dia, dias da semana, dentre outros). Segundo o Manual de Estudos de Tráfego (DNIT, 2006), “os volumes horários variam ao longo do dia, apresentando pontos máximos acentuados, designados por picos. A compreensão destas variações é de fundamental importância, uma vez que é no horário de pico que necessariamente deverão ocorrer os eventos mais relevantes”.

Figura 7 - Variação horária do volume de tráfego (a) Grupo semafórico G1 (b) Grupo semafórico G2 (c) Grupo semafórico G3 (d) Grupos semafóricos G1, G2 e G3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 7a-d, pode-se observar a variação horária do volume de tráfego (veic/h) para os três grupos semafóricos (G1, G2 e G3) durante os 5 dias da semana. Note-se que, o horário pico para os grupos G1 e G2 (Figura 7a-b) ocorre entre as 18:00 e as 19:00 (horário de final de expediente da maioria das empresas, órgãos públicos, etc). Por outro lado, o horário pico do grupo G3 (Figura 7c) ocorre em dois momentos diferentes. O primeiro ocorre entre as 18:00 e as 19:00 (final do expediente vespertino e início do expediente noturno da CEAP) e o segundo ocorre entre as 22:00 e as 23:00 (final do expediente noturno da CEAP).

Para este trabalho, as simulações foram realizadas apenas para o primeiro horário pico. Finalmente, como podemos observar na Figura 7d, existe pouca variabilidade do fluxo de tráfego em cada grupo semafórico durante esses 5 dias amostrados. Em razão disso, foi realizado uma simulação por cada grupo semafórico, utilizando-se a média aritmética dos volumes de tráfegos de todos os dias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo o CONATRAN (2014), existem várias medidas (ou indicadores) de desempenho que podem ser utilizadas para avaliar o comportamento da operação do tráfego em decorrência da programação semafórica, dentre as quais as mais utilizadas são: fila máxima, velocidade média, número de paradas, atraso, consumo de combustível, emissão de poluentes e custo monetário.

Essas medidas podem ser determinadas, indiretamente, de três formas: por meio de programas de computador (simuladores de trânsito), por meio de pesquisas em campo ou por expressões matemáticas. Para o objetivo deste trabalho, serão utilizados os resultados obtidos pelo software de simulação computacional *InfraWorks* da *Autodesk*®.

4.1 INDICADORES DE DESEMPENHO NO CENÁRIO ATUAL

A Tabela 1 mostra um resumo dos principais indicadores de desempenho obtidos no cenário atual. Inicialmente, observa-se que, no horário pico, os movimentos MV2 (entrada ao CEAP pela aproximação 1) e MV5/MV6 (saída do CEAP pela aproximação 3) possuem os maiores indicadores em relação ao atraso⁷ e à fila máxima⁸. Por outra parte, o indicador da velocidade média⁹ mostra que, em referidos movimentos, essas velocidades são muito baixas.

Tabela 1 - Resumo dos indicadores de desempenho no cenário atual.

Horário Pico	Aproximação	Movimento	Grupo Semafórico	Fila Máxima (m)	Atraso (s)	Velocidade Média (km/h)
18:00-19:00	1	MV1	GM1 / GM2	156.5	72	11.8
		MV2	GM1	287.4	108	11.8
	2	MV3	GM2	57	16	39.2
		MV4	GM2	82.4	17	39.2
	3	MV5 / MV6	GM3	188.3	612	1.6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Destaca-se que a aproximação 3 possui o maior atraso para os motoristas (mais de 10 minutos em espera), como ilustrado na Figura 8. Este tipo de comportamento pode estar relacionado a dois fatores importantes na geração de tráfego: em primeiro lugar, ao curto período do tempo de verde do GM1 no MV2 e do GM3 no MV5/MV6 (16 segundos) em relação ao tempo de ciclo (144 segundos) e, em segundo lugar, ao alto volume de tráfego, que é gerado no início e no final do expediente do CEAP.

Figura 8 – Imagem 3D referente ao cenário atual.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por último, segundo o CONATRAN (2014) “o número de paradas é um dos principais indicadores da qualidade da operação do trânsito podendo ser caracterizado pelo número total de paradas, número médio de paradas por veículo, ou porcentagem de veículos que param devido à sinalização semafórica. A programação semafórica deve visar a minimização do número de paradas que, além de gerar desconforto ao usuário, aumenta o consumo de combustível e a emissão de determinados poluentes”. A tabela 2 mostra que, do total de número de paradas (1425), mais de 30% dos veículos fazem mais de uma parada durante todo o percurso simulado.

⁷ Visa medir a espera causada aos veículos pela sinalização semafórica.

⁸ Visa medir o comprimento máximo da fila ao longo de vários ciclos.

Tabela 2 - Resumo do indicador de número de paradas no cenário atual.

Horário Pico	Paradas			
	Total	Número	Quantidade	Porcentagem
18:00-19:00		1	633	68.14%
		2	133	14.32%
		3	130	13.99%
		4	29	3.12%
		5	4	0.43%

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 CENÁRIOS SIMULADOS

A fim de observar o comportamento do fluxo de tráfego, foram criados 20 cenários alternativos, realizando-se modificações apenas nos tempos das fases dos semáforos, especificamente no tempo verde e, conseqüentemente, no tempo vermelho (respeitando o tempo de ciclo). A tabela 3 mostra um resumo dos diferentes cenários criados a partir das modificações nos tempos de verde.

Tabela 3 - Resumo dos tempos de verde nos 20 cenários simulados.

Grupo Semafórico	Cenários Tempo Verde																				
	0*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
G1	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56
G2	100	96	92	88	84	80	76	72	68	64	60	56	52	48	44	40	36	32	28	24	20
G3	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56

* Cenário Atual

Fonte: Elaborado pelo autor.

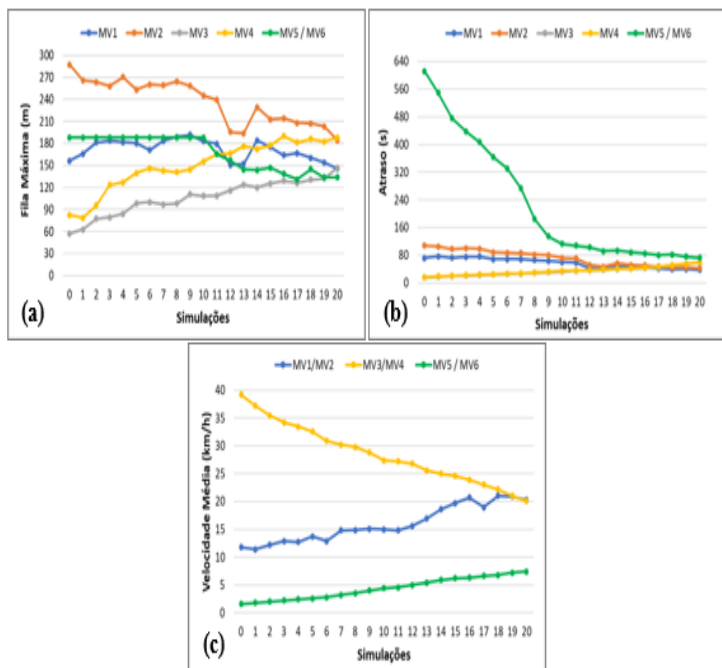
4.3 INDICADORES DE DESEMPENHO NOS CENÁRIOS SIMULADOS

Na figura 9a-c, evidenciam-se os indicadores de desempenho para todos os cenários simulados. Os resultados mostram que:

- Em relação à fila máxima (figura 9a), os movimentos MV1 e MV5/MV6 possuem uma tendência estável até a simulação 10. A partir de então, essa tendência começa a decrescer. A tendência dos movimentos MV3 e MV4 são crescentes ao longo da maioria das simulações e, por último, o movimento MV2 possui uma tendência decrescente.
- Em relação ao atraso (figura 9b), os movimentos MV1 e MV2 possuem uma leve tendência decrescente. A tendência dos movimentos MV3 e MV4 são crescentes ao longo de todas as simulações. Já os movimentos MV5/MV6 possuem uma queda bastante significativa, principalmente até a simulação 10. Posteriormente, essa tendência continua com uma queda pouco significativa.
- Em relação à velocidade média (figura 9c), os movimentos MV1/MV2 e MV5/MV6 têm uma tendência crescente, ao contrário do que ocorre nos movimentos MV3/MV4.
- Por sua vez, a figura 10a-b mostra o número de paradas ao longo de todas as simulações. Note-se que houve um aumento significativo nesse indicador, principalmente em veículos que fazem uma ou duas paradas. Contudo, há uma tendência decrescente para veículos que fazem mais de duas paradas (3,4 ou 5). Este indicador é importante, pois quanto maior o número de paradas de um mesmo veículo maior poderá ser o desconforto do motorista em relação ao congestionamento gerado pela interseção semafórica.

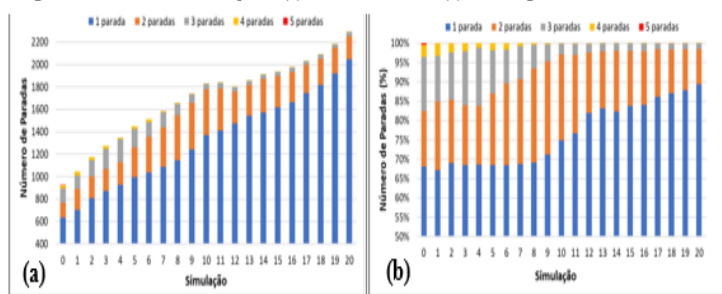
⁹ Visa medir a média das velocidades dos veículos que viajam pela rede.

Figura 9 - Indicadores de desempenho (a) Fila Máxima (b) Atraso (c) Velocidade Média



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 - Indicador de desempenho (a) Número de Paradas (b) Percentagem do Número de Paradas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 PROPOSTA

A partir dos dados obtidos nas simulações, a principal recomendação deste trabalho é utilizar a configuração do cenário 12 nesse horário pico, visto que, após esse cenário, as mudanças nos indicadores são pouco significativas. Essa configuração permite ter uma redução muito importante nos atrasos dos movimentos MV1 (passando de 72 para 43 segundos), MV2 (passando de 108 para 52 segundos) e MV5/MV6 (passando de 612 para 103 segundos). Essas reduções são significativas, uma vez que todos os movimentos estão vinculados à entrada e à saída do CEAP (exceto o MV1). Tal variação no tamanho total das filas geradas pode ser visualizada na Figura 11, onde demonstra o cenário atual (figura 11a) e o cenário ótimo apresentado na simulação 12 (figura 11b).

Figura 11 – Representação do comprimento da fila máxima (a) Cenário atual (b) Cenário 12 simulado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em contrapartida, há um aumento nos atrasos dos movimentos MV3 (passando de 16 para 36 segundos) e MV4 (passando de 17 para 37 segundos). Apesar de esses movimentos duplicarem seus atrasos, há de se considerar que ainda são valores baixos para o tamanho da via e o fluxo de tráfego nesses movimentos específicos. A figura 12 mostra a configuração do diagrama de intervalos luminosos para o novo cenário proposto.

Figura 12 - Diagrama de intervalos luminosos do cenário proposto.

Tempo (s)	0	40	44	96	100	140	144
G1							
G2							
G3							
Intervalo	1	2	3	4	5	6	
Duração (s)	40	4	52	4	40	4	
Ciclo (%)	27.78	a	36.11	a	27.78	a	
Estágio	1		2		3		

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento de modelos de simulação computacional como ferramenta de análise no fluxo de tráfego é fundamental para entender o comportamento de congestionamentos veiculares e para analisar, dentre uma série de possibilidades, a melhor configuração possível que permita reduzir os tempos de espera e os tamanhos das filas. Consequentemente, essa melhoria poderá reduzir gases poluentes emitidos pelos veículos e o desconforto causado aos motoristas em virtude do maior tempo de espera nos fluxos de tráfego.

Neste trabalho, demonstrou-se que o uso desta ferramenta resultou em um melhor entendimento do sistema de tráfego aplicado numa interseção com sinalização semafórica e, dessa forma, ajudou a contribuir para a tomada de decisões quanto aos intervalos luminosos aplicados aos semáforos, gerando resultados consistentes.

Inicialmente, nos cenários de 1 a 10, verificou-se uma estabilidade na tendência da fila máxima dos movimentos MV1, MV5 e MV6, aliado a uma leve tendência decrescente de atraso nos movimentos MV1 e MV2. O maior impacto na redução do atraso ocorreu nos movimentos MV5 e MV6 (movimentos que fazem parte do PGT localizado no CEAP). Esses cenários apresentam os pontos de maior dinâmica dentre todas as simulações realizadas, porém não apresentam o ponto ótimo escolhido neste trabalho.

Por outro lado, os cenários 11, 12 e 13 apresentaram, dentre os indicadores de desempenho, o limiar de transição entre as características apresentadas anteriormente e a relativa estabilidade do sistema nos cenários subsequentes. Nesses cenários, foi constatado uma redução significativa nas filas e nos atrasos dos movimentos MV1, MV2, MV5 e MV6; porém, também, leves aumentos nos movimentos MV3 e MV4. Contudo, esses aumentos podem ser considerados como valores aceitáveis, quando analisados no processo e no modelo como um todo.

Finalmente, os cenários de 14 a 20 apresentam a parte mais estável dentro de todos os cenários simulados, podendo, dessa forma, serem chamados de ponto neutro do modelo, não justificando a sua implementação em razão dos crescentes prejuízos acumulados nos movimentos MV3 e MV4.

Portanto, o cenário considerado mais indicado para a implantação é o cenário 12, no qual os movimentos MV1, MV2, MV5 e MV6 apresentam melhorias nos atrasos de 40,28%, 51,85%, 83,17% e 83,17%, respectivamente.

Por fim, esta pesquisa possibilitou a realização de estudos futuros para analisar a forma que os PGTs impactam na malha viária; verificar a possibilidade de implantação de sensores para automatização do tempo verde dos semáforos em tempo real; e avaliar a viabilidade de implantação de rotatória no local analisado como forma de tornar o cruzamento mais eficiente.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, *et al.* (2019). **Análise comparativa das simulações mesoscópica e microscópica do VISSIM na modelagem do tráfego de vias urbanas**. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da AMPET Balneário Camboriú – SC, 10 de novembro a 14 de novembro de 2019. 12p.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito**. Volume V – Sinalização Semafórica. Brasília, DF, Brasil, 2014. 309p.

DA SILVA, D. P., *et al.* (2019). **Simulação de controle de**

semáforos inteligentes utilizando agentes com comunicação direta. X Computer on the Beach. Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI) - Campus Florianópolis, Florianópolis, Santa Catarina, 10p.

EHLERT, A., SCHNECK, A. & CHANCHAREON N. (2017). **Junction Parameter Calibration for Mesoscopic Simulation in Vissim**. Transportation Research Procedia, v. 21, p. 216-226. doi: 10.1016/j.trpro.2017.03.091.

GONZAGA, E., ALMEIDA, P. & CARRANO, E. (2015). **Otimização da Programação Semafórica em Tempo Real com Base em Modelagem Matemática**. 1-6. doi: 10.21528/CBIC2015-024.

INFRAWORKS AUTODESK®. Versão 2020.2 - janeiro de 2020.
<<https://www.autodesk.com/products/infraworks/overview>>
Acesso em: 18 maio de 2020.

JUNIOR, G., FROZZA, R. & MOLZ, R. (2015). Simulação de controle adaptativo de tráfego urbano por meio de sistema multiagentes e com base em dados reais. **Revista Brasileira de Computação Aplicada**. 7, 3 (out. 2015), 65-81. doi:<https://doi.org/10.5335/rbca.2015.4697>.

MONTEVECHI, J. A. B. *et al.* (2010). **Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: An application in a Brazilian tech company**. Proceedings - Winter Simulation Conference. 1624-1635. 10.1109/WSC.2010.5678908. 12p.

NASUHA, N.; ROHANI, M. (2018). Overview of application of traffic simulation model. **MATEC Web of Conferences** 150, 03006. 6p. doi: 150. 03006. 10.1051/mateconf/201815003006.

RODRIGUES, J. M., AZEVEDO, S.; RIBEIRO, L. C. (2019). Mapa da Motorização Individual no Brasil – Relatório 2019. **Observatório das Metrôpoles. Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano e Regional – IPPUR**. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 27p.

SARNÈ, G.M.; POSTORINO, M.N. (2016). Agents meet Traffic Simulation, Control and Management: A Review of Selected Recent Contributions. WOA. 6p.

SMITH, J. & BLEWITT, R. (2010). **Traffic Modelling Guidelines**. TfL Traffic Manager and Network Performance Best Practice, version 3. © Transport for London, London, UK. 184p.

SOUSA, J. Q. (2012). **Modelagem microscópica aplicada na avaliação do desempenho da segurança viária em interseções urbanas**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará. Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Fortaleza: UFC, 2012..

SOUZA, I. *et al.* (2018). Simulação de tráfego utilizando o software arena: um estudo de caso de um trecho semaforizado da cidade de Juazeiro – BA. **XXXVIII Encontro nacional de engenharia de produção “A Engenharia de Produção e suas contribuições para o desenvolvimento do Brasil”** Maceió, Alagoas, Brasil, 16 a 19 de outubro de 2018. 15p.

TAPANI, A. (2008). **Traffic Simulation Modelling of Rural Roads and Driver Assistance Systems**. Norrköping: Linköping University Electronic Press, 43p.