



ANÁLISE DE TEMPO SEMAFÓRICO UTILIZANDO O SUMO: ESTUDO DE CASO DA ROTATÓRIA DO FINAL DA ASA NORTE

Bruno Nunes Teixeira Ferreira*

Universidade de Brasília/Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/Brasília/Brasil

Michelle Andrade

Universidade de Brasília/Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/Brasília/Brasil

RESUMO

Diariamente as grandes cidades sofrem com o problema do congestionamento de veículos, principalmente no horário de pico. Duas soluções diretas que vêm de imediato são: aumentar a infraestrutura de trânsito e melhorar a qualidade e quantidade do transporte público. Ambas, são soluções caras e demoradas, sem contar com o desconforto prévio que seria instaurado para realizar grandes obras. Porém, existe uma terceira solução, o aprimoramento das operações de controle de trânsito do sistema atual, mais especificamente dos semáforos, no qual não é necessário alterar a infraestrutura física e pode ser aplicado prontamente. Esse trabalho propôs encontrar o melhor tempo semafórico para a rotatória do final da Asa Norte, uma rotatória complexa que possui três cruzamentos semaforizados atuando simultaneamente para interligar quatro importantes vias de alto fluxo de veículos. Nesse trabalho, foi realizada a modelagem da rede através das pesquisas de campo da contagem volumétrica e do fluxo de saturação, seguindo as recomendações do CONTRAN, e do uso de mapas gratuitos disponíveis na internet. Ademais, com o uso do simulador SUMO foi feita uma avaliação do ciclo semafórico atual bem como foi encontrado o melhor tempo de ciclo semafórico, obtido através de um algoritmo desenvolvido em Python3, usando como medida de avaliação para ambos os casos o tempo médio de viagem. Por fim, foi calculado o ciclo ótimo de Webster e comparado com os cenários anteriores. Apesar de não ter sido possível realizar a calibração do simulador, foi encontrada uma redução de 33% do tempo médio de viagem do ciclo do algoritmo em comparação ao ciclo atual, o que evidencia que, mesmo utilizando a calibração padrão, o cenário atual está passível de melhora significativa das condições de circulação de veículos.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de Tempo Semafórico, SUMO, Microsimulação de Tráfego, Rotatória

ABSTRACT

Big cities suffer daily from the problem of vehicle traffic jam, especially at peak hours. Two immediate solutions to do are: to increase transit infrastructure and to improve the quality and quantity of public transport. Both are expensive and time-consuming solutions, in addition, the prior discomfort that would be established to carry out major works. However, there is a third solution, the improvement of traffic control operations of the current system, specifically the traffic lights, which are not necessary to change the physical infrastructure and it can be applied promptly. This work proposed to find the best traffic lights time for the roundabout at the end of Asa Norte, a complex roundabout that has three traffic lights acting simultaneously to connect four important high-flow ways. In this work, the network modeling was executed through field surveys of the traffic volume count and of the saturation flow, following the recommendations of CONTRAN and the use of free maps available on the internet. Furthermore, using the simulator SUMO, an evaluation of the current traffic lights cycle was performed and the best traffic light cycle time was found. It was obtained through an algorithm developed in Python3 using the mean travel time as an evaluation measure for both cases. Finally, the optimal Webster cycle was calculated and compared with the previous scenarios. Although it was not possible to perform the calibration of the simulator, a reduction of 33% in the mean travel time of the algorithm cycle was found compared to the current cycle, which shows that even using the standard calibration, the current scenario is susceptible to significant improvement in vehicle transit conditions.

*Autor correspondente: brunontf@gmail.com



KEYWORDS: Traffic Lights Time Analysis, SUMO, Traffic Microsimulation, Roundabout

1. INTRODUÇÃO

Apesar de Brasília ser uma cidade planejada, é também uma cidade que em decorrência do crescimento populacional, da concentração de empregos do setor público na sua área central e da carência de transporte público, vivencia o problema de congestionamentos cotidianamente.

Andrade (2018) diz que o estresse causado pelo trânsito nos cidadãos é uma das grandes causas de doenças, e que geram altos custos ao sistema de saúde pública. E, segundo Cruz (2019), "o custo com o congestionamento no país soma perdas de R\$ 267 bilhões por ano, o que corresponde a cerca de 4% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil". Além disso, Alobaidi *et al.* (2020) descrevem que os veículos são a fonte dominante de emissões de poluentes atmosféricos nos grandes centros urbanos e os cruzamentos são considerados como pontos de alta emissão veicular dentro da malha viária devido aos eventos de aceleração e desaceleração dos veículos.

Brasília possui um custo de deslocamento elevado, uma vez que o seu modelo de expansão urbana ainda deriva do automóvel, que é reforçado pelo seu desenvolvimento econômico de maior renda per capita do país, conforme Leal (2017).

Somado a isso, os cidadãos brasilienses que utilizam a principal saída norte da região central convivem com condições de tráfego que resultam em um tempo perdido recorrentemente questionado. Ademais, o crescimento populacional do recente bairro Noroeste impacta diretamente nas condições de tráfego da via.

Durante muito tempo pensava-se que o crescimento da malha viária, embora caro e algumas vezes inviável por falta de espaço alocável, era a solução para o problema do congestionamento. Porém, existe uma outra solução: o controle de tráfego urbano.

Conforme Wolshon e Pande (2016), esse conceito consiste em um conjunto de estratégias que visam alterar o comportamento das viagens, de modo a otimizar o sistema de transporte segundo algum objetivo, como por exemplo reduzir o congestionamento, aumentar a mobilidade dos pedestres, reduzir o número de paradas ou de emissão de poluentes. No caso de ambientes urbanos, por exemplo, os engenheiros de tráfego

devem considerar que as cidades demandam vias de trânsito rápido, mas também, devem contemplar espaços de trânsito calmo em que a interação entre veículos, ciclistas e pedestres ocorra de modo seguro para todos esses atores.

Nesse contexto, um exemplo do congestionamento presente em Brasília é a rotatória do final da Asa Norte que interliga os trechos das vias W3 norte, L4 norte, Setor Terminal Norte e Setor Hospitalar Local Norte. Nesses cruzamentos, é recorrente o usuário esperar demasiadamente até acessar as vias de ligação do local. Além disso, há nessa região a presença de hipermercados, shopping center, concessionária de veículos, setor hospitalar e terminal de ônibus que são importantes polos geradores de viagem. A Figura 1.1 mostra o trecho viário desse estudo e a Figura 1.2 mostra a importância desse trecho viário na malha viária da Asa Norte.



Figura 1.1 Croqui da Localização.
Fonte: OpenStreetMaps (2017).



Figura 1.2 Croqui da Visão Geral.
Fonte: OpenStreetMaps (2017).

Pensando nisso, esse trabalho analisa, por meio de simulação computacional, a possibilidade de mitigar o problema do congestionamento através do ajuste do tempo do ciclo semafórico. Para isso, foi desenvolvido um algoritmo que busca o melhor tempo

de ciclo semafórico.

2. METODOLOGIA

Para uma melhor compreensão, a metodologia foi dividida em coleta de dados da rede viária e modelagem computacional. A Figura 2.1 apresenta um fluxograma da metodologia apresentada.

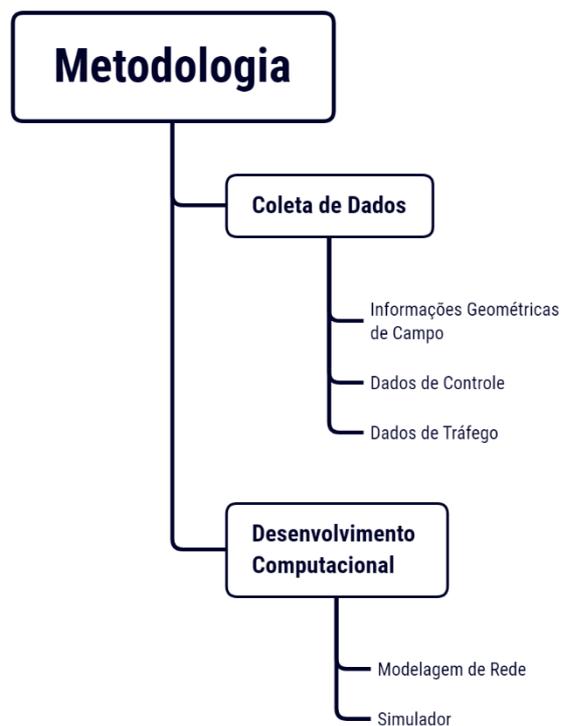


Figura 2.1 Fluxograma da Metodologia Utilizada.

2.1 Coleta de Dados

Para realizar a análise comparativa dos padrões operacionais entre o tráfego atual e o tráfego do melhor cenário, foi necessário coletar dados geométricos do trecho viário em estudo, dados da programação semafórica atual e dados do volume de tráfego local.

2.1.1 Informações Geométricas de Campo

Os dados geométricos foram adquiridos com o auxílio da plataforma online de mapas Open Street Maps (OSM) e conferidos parcialmente em campo.

De modo geral, o trecho em estudo é composto de vias com três faixas de trânsito com largura de 3,60m cada e velocidade regulamentada de 60 Km/h. A exceção é a via do Setor Hospitalar Norte, que é um trecho em pista simples.

A região analisada possui três cruzamentos semaforizados, com dois semáforos em cada cruzamento que permitem o trânsito de veículos de uma única aproximação por vez. Esses cruzamentos foram classificados em ordem numérica considerando o sentido horário, conforme apresentado na Figura 2.2. O cruzamento 1 possui os semáforos 1-0 e 1-1, o cruzamento 2 possui os semáforos 2-0 e 2-1 e o cruzamento 3 possui os semáforos 3-0 e 3-1.

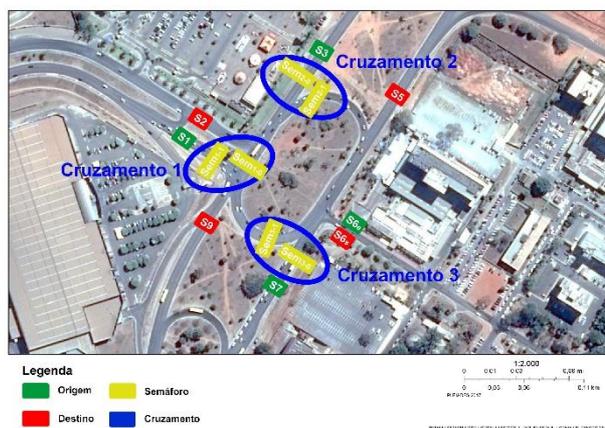


Figura 2.2 Modelo com a Localização dos Semáforos.

Essa subdivisão foi feita de modo a facilitar a identificação dos dois principais estágios existentes, o estágio 0 que permite o trânsito de veículos nas aproximações dos semáforos 1-0, 2-0 e 3-0 e proíbe o trânsito de veículos nas aproximações dos semáforos 1-1, 2-1 e 3-1. Em contrapartida, o estágio 1 realiza o oposto do estágio 0. A Figura 2.3 mostra um diagrama de estágios do trecho em estudo.

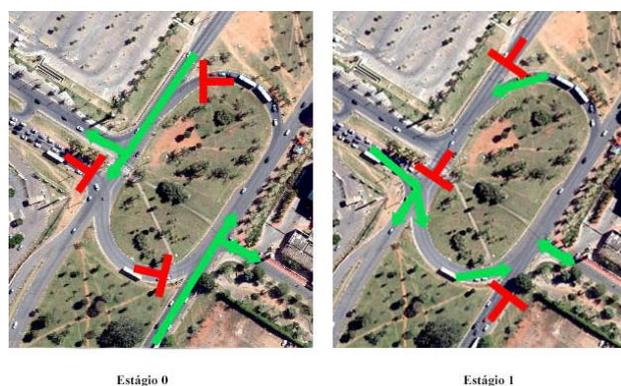


Figura 2.3 Diagrama de Estágios do Trecho em Estudo.

2.1.2 Dados de Controle

A programação semafórica da região em estudo foi coletada em campo, no dia 23 de dezembro de 2021.

Essa programação correspondia ao plano semafórico presente no horário de pico das 18h dos dias de terça-feira a quinta-feira. Para a tomada de tempo, foram feitas filmagens dos ciclos semafóricos de cada cruzamento utilizando um *smartphone*. A tabela 2.1 mostra os tempos coletados.

Tabela 2.1 Tempo do Ciclo Semafórico em Segundos

Grupos Semafóricos	Tempo Medido em Campo		
	Tempo de Verde (s)	Tempo de Amarelo (s)	Tempo de Vermelho (s)
Sem. 1-0	85	5	2
Sem. 1-1	70	5	2
Sem. 2-0	85	5	2
Sem. 2-1	70	5	2
Sem. 3-0	85	5	2
Sem.3-1	70	5	2

2.1.3 Dados de Tráfego

Neste tópico, é abordado a coleta do volume de tráfego e do fluxo de saturação bem como as devidas correções aplicadas. Além disso, a matriz origem-destino.

2.1.3.1 Contagem do Volume de Tráfego

Para o presente trabalho, foi escolhido realizar a contagem volumétrica nos trechos entre interseções através da classificação global com o método de contagem manual.

Conforme o DNIT (2006), a classificação global consiste no registro da quantidade de veículos que cruza um determinado trecho da via, agrupando-os pelas suas classes, no caso, entre carros, motos e ônibus. E o método da contagem manual consiste em registrar a quantidade de veículos com o auxílio de fichas ou um contador mecânico ou eletrônico. Entre as principais vantagens estão: a simplicidade de execução e baixo custo para a realização.

A contagem volumétrica foi realizada durante os dias 27 a 29 de abril de 2021, terça-feira a quinta-feira, durante 15 minutos diários no horário de pico, por volta das 18h05min às 18h20min. Esse intervalo foi escolhido, pois, segundo o DNIT (2006), as horas de pico ocorrem, nos dias da semana, próximas às 9h e às 18h, que coincidem justamente com a ida e volta do trabalho.

A escolha do horário de pico foi tomada pois,

segundo CONTRAN (2014), é justamente nesse horário que ocorrem os maiores fluxos de veículos e, portanto, as vias estão sob solicitação máxima, bem como os dias de terça-feira, quarta-feira e quinta-feira são dias que sofrem as menores variações volumétricas. Ainda, é importante ressaltar que nos dias da contagem volumétrica não houve acidente no local ou nas proximidades e nem feriado que pudesse alterar as condições típicas de fluxo.

Para a contagem in situ, foram posicionadas nove pessoas distribuídas pelas seções de 1 a 9, conforme ilustrado na Figura 2.4. As seções S1, S3, S6e e S7, de cor verde na Figura 2.4, identificam as entradas de veículos no sistema, enquanto as seções S2, S5, S6s, S7 e S9, em vermelho na Figura 2.4, identificam as saídas de veículos no sistema. Além disso, as seções S4 e S8 contaram o fluxo de veículo que cruzaram a rotatória e as seções S1-2 e S5-6 foram seções criadas apenas teoricamente para auxiliar na análise de dados. A seção S6 possui mão dupla e, por isso, foi dividida em S6e, que corresponde a quantidade de veículos que entraram no sistema por essa seção, e S6s, que corresponde a quantidade de veículos que saíram do sistema por essa seção.



Figura 2.4 Seções Escolhidas para a Contagem de Volume de Tráfego

Para a contagem, foi fornecido a cada pessoa um aplicativo no telefone celular que continha um contador manual individual para os três tipos de veículos escolhidos: carros, motos e ônibus.

2.1.3.2 Análise do Volume de Tráfego

Os dados brutos do volume de tráfego adquiridos em campo contêm uma incerteza causada pelo próprio erro humano e pela quantidade de veículos que estavam rodando, quando iniciou a primeira contagem, e não foram contabilizados.

Assim, foi preciso fazer um ajuste nesses dados conforme a Equação 1 com intuito de reduzir essas diferenças. Essa equação trata da conservação de um sistema aberto, ou seja, o somatório de veículos que entram no sistema tem que ser igual ao somatório dos veículos que saem desse sistema. A Equação.2 desenvolve o princípio da Equação 1 aplicado nas seções definidas.

$$\Sigma \text{Veículos que entram no sistema} = \Sigma \text{Veículos que saem do sistema} \quad (1)$$

$$S_1 + S_3 + S_{6e} + S_7 = S_2 + S_5 + S_{6s} + S_9 \quad (2)$$

Além da Equação 2, é possível dividir o sistema da Figura 2.4 em quatro partes e obter mais duas novas equações, as Equações 3 e 4.

$$S_8 + S_9 - S_1 = S_3 + S_4 - S_2 \quad (3)$$

$$S_4 + S_5 = S_7 + S_8 + S_{6e} - S_{6s} \quad (4)$$

Assim, foi possível construir a matriz OD (Origem-Destino) da rede viária em questão para cada tipo de veículo. Além disso, foi possível também calcular a taxa de fluxo. A Tabela 2.2 traz a matriz OD com o volume de tráfego por hora.

Tabela 2.2 Matriz OD com o Volume de Tráfego Por Hora.

Tipo de Veículo	Origem	Destino			
	Seção	S2	S5	S6s	S9
Carro	S1	52	836	112	248
	S3	1112	208	36	384
	S6e	84	192	-	40
	S7	204	772	12	84
	Seção	S2	S5	S6s	S9
Moto	S1	4	64	12	20
	S3	56	0	4	32
	S6e	16	16	-	28
	S7	4	79	1	4
	Seção	S2	S5	S6s	S9
Ônibus	S1	-	24	-	96
	S3	40	8	-	20
	S7	28	64	-	32

2.1.3.3 Fluxo de Saturação e Tempo Perdido

Para o cálculo do fluxo de saturação e de tempo perdido foi utilizado o método 2 do CONTRAN (2014), que é o mesmo método utilizado pela CETSP, por ser o método mais simples e viável de ser aplicado no

local em estudo devido ao elevado fluxo de veículos do local, bem como a disponibilidade de recursos para a coleta dos dados no campo.

Em locais com elevado tráfego, o método permite que essa contagem seja feita em apenas um faixa da pista e depois extrapolada, o que de fato foi realizado. O método requer ainda que, para que um ciclo seja válido, é necessário que haja pelo menos cinco intervalos saturados.

O primeiro intervalo é somente utilizado para o cálculo do tempo perdido inicial, bem como os intervalos durante o tempo de entretardos são utilizados para o cálculo do tempo perdido final. O tempo perdido inicial calculado não pode ser inferior a 1s e o tempo perdido final calculado não pode ser negativo. Assim, o fluxo de saturação de um ciclo é calculado então pela Equação 5.

$$F_s = \frac{\sum_{j=2}^{NIS} NVI_j}{5 (NIS - 1)} \quad (5)$$

onde F_s é o fluxo de saturação [veíc./s], NIS é o número de intervalos saturados e NVI_j é o número de veículos no intervalo "j".

O tempo perdido inicial é calculado através da Equação 6.

$$T_{pi} = 5 - \frac{NV_1}{F_s} \quad (6)$$

onde T_{pi} é o tempo perdido inicial [s], NV_1 é o número de veículos do primeiro intervalo e F_s é o fluxo de saturação [veíc./s].

Para o cálculo do tempo perdido final, utilizando esse método, seriam necessários ciclos saturados de veículos, ou seja, ciclos em que os todos os intervalos estivessem veículos cruzando, o que não foi possível ser atendido. Porém, conforme Mannering e Washburn (2013), é difícil encontrar em campo tais ciclos. Assim, os autores recomendam que 3s de tempo perdido final é uma boa estimativa, e, portanto, é o que foi adotado para todos os semáforos.

2.2 Desenvolvimento Computacional

Nesta parte, é descrita a implementação dos dados adquiridos no software de simulação, bem como da sua configuração para o processamento computacional.

2.2.1 Modelagem da Rede

A modelagem da rede foi feita utilizando a ferramenta NetEdit, que faz parte do software SUMO. Segundo Krajzewicz *et al.* (2012), "NetEdit é um editor gráfico de rede que pode ser usado para criar redes do zero e modificar todos os aspectos das redes existentes. Com uma interface de seleção e destaque, também pode ser utilizado para definir e editar rotas, veículos e pessoas."

Além disso, foi utilizado o OSM Web Wizard, um módulo do SUMO, que capturou os principais dados físicos do Open Street Maps (OSM) necessários para auxiliar a modelagem da rede, como por exemplo, as larguras e quantidades de faixas, os comprimentos das pistas e as velocidades das vias. A Figura 2.5 ilustra a rede modelada com os dados de geométricos e de controle.

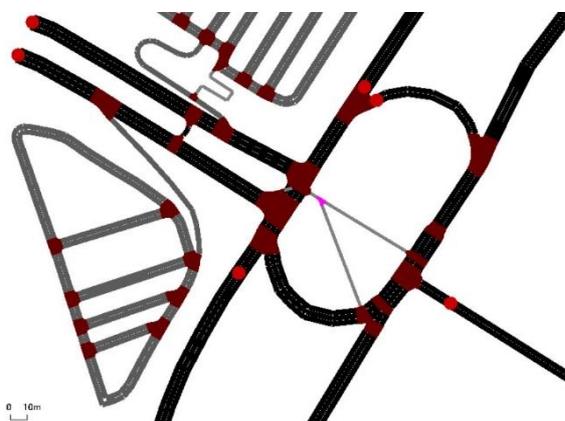


Figura 2.5 Modelo da Rede.

2.2.2 Simulador

O SUMO (Simulação de Mobilidade Urbana) é um simulador microscópico de tráfego multimodal, com licença livre GPL2, desenvolvido pelo centro aeroespacial alemão. Ele se destaca pela flexibilidade de programação, velocidade de execução e baixo consumo computacional.

2.2.2.1 Modelagem de Tráfego

Com os dados da Tabela 2.2, foi possível então criar o arquivo de rotas do SUMO também com a ferramenta NetEdit. Ainda, foram considerados três tipos de veículos: carros, motos e ônibus, que correspondem com a maioria dos tipos de veículos que utilizam a rede e que foram registrados na contagem volumétrica.

2.2.2.2 Algoritmo de Varredura

O algoritmo de varredura desenvolvido é um programa que busca encontrar o menor tempo médio de viagem através da alteração dos tempos de ciclos semafóricos e dos seus respectivos tempos de verde.

O SUMO, após cada simulação, gera resultados de desempenho da rede na forma de relatórios em formato .xml. Esses relatórios contêm, por exemplo, informações de rotas de veículos, quantidade de entrada e saída de veículos na rede, emissão de gases poluentes, tempo médio de viagem, consumo de combustível, comprimento de filas, entre outros.

Um relatório em especial chamado *Summary* disponibiliza, por segundo, informações sobre a quantidade total de veículos que foram inseridos na simulação, que estão rodando, que estão parados ou que já chegaram ao seu destino. Além disso, ele também disponibiliza o tempo médio de viagem da rede, que foi a medida utilizada para a criação do programa.

Assim, foi desenvolvido um algoritmo em Python3 a fim de encontrar o menor tempo médio de viagem dado um volume de tráfego constante bem como o tempo total de ciclo semafórico preestabelecido e comum aos três cruzamentos da rede.

A lógica do algoritmo consiste em varrer dentro de um ciclo semafórico todas as combinações possíveis de tempo de verde e, conseqüentemente, de vermelho. Ou seja, ele cria uma matriz que vai incrementando, em um intervalo predeterminado, o tempo de verde e decrementando o tempo de vermelho de cada semáforo por simulação.

Por exemplo, se um semáforo tem um ciclo de 40s com 10s de verde e 30s de vermelho e o intervalo de incremento seja de 5s, após a primeira simulação tem-se o ciclo alterado para 15s de verde e 25 de vermelho, e após a segunda simulação o ciclo será de 20s de verde e 20s de vermelho, e assim sucessivamente até atingir o limite mínimo do tempo de vermelho, no caso, 10s. Os tempos de entreverdes não são alterados, e nesse exemplo, para fins explicativos, foram desconsiderados do tempo de ciclo.

No exemplo anterior, foi mostrada a variação dos tempos semafóricos para um único semáforo, porém, na rede modelada existem três cruzamentos com dois semáforos cada, totalizando seis semáforos. Como o algoritmo incrementaria cada um individualmente enquanto manteria os demais constantes até varrer todos os casos possíveis para todos os semáforos, isso exigiria muito processamento do computador e, conseqüentemente, o tempo para realizar todas as simulações seria elevado.

Por isso, foi considerado, no algoritmo, que em mesmo cruzamento necessariamente quando um

semáforo está liberando a passagem dos veículos o outro semáforo está proibindo a passagem dos veículos da sua respectiva aproximação, ou seja, o tempo de verde de um é o tempo de vermelho do outro.

Além disso, foi percebido que para qualquer fluxo saturado, quando os tempos de verde entre os semáforos do estágio 0 ou do estágio 1 estão muito espaçados, o tempo médio de viagem é elevado, e quando os tempos de verde estão próximos o tempo médio de viagem é menor. Isso faz sentido, pois tempos de verde muito espaçados entre semáforos, mostram que a defasagem na rede está tão elevada a ponto de interferir no sentido do fluxo oposto, o que acaba gerando congestionamento por impedir a passagem na rotatória. Assim, foi definido um limite de cinco vezes o intervalo de incremento como defasagem máxima para cada semáforo.

Ainda, é importante ressaltar que foi considerado, para cada ciclo semaforico, um intervalo de 5s de transição do amarelo para o vermelho e 2s como vermelho geral, bem como foi configurado que cada simulação durasse uma hora do mundo virtual. A figura 2.6 mostra um exemplo de ciclo semaforico simulado.



Figura 2.6 Exemplo de Fases de um Ciclo Semaforico Simulado.

Como o relatório *Summary* traz a variável tempo médio de viagem da rede por segundo, foi necessário calcular o tempo médio de viagem de cada simulação. Este cálculo foi feito como a média de todos os tempos médios de viagem desprezando os dez minutos iniciais, pois é necessário um período inicial para carregar na simulação os veículos que já estavam rodando. Esse período de dez minutos iniciais foi definido após perceber que depois, desse intervalo, o tempo médio de viagem possui menos variações.

3. RESULTADOS

Segundo o CONTRAN (2014), é recomendado que o tempo de ciclo semaforico não ultrapasse 120s, por isso, foram definidos inicialmente três tempos de ciclo. O primeiro ciclo tem 94s e ele foi escolhido, de maneira aleatória, possuindo 40s de tempo de verde, 40s de vermelho e 14s de entreverdes; o segundo ciclo era para ter possuído 120s, por ser o tempo máximo recomendado pela norma, porém houve um equívoco

ele acabou possuindo 124s, o que não influenciou o resultado final, e o terceiro ciclo tem 145s por ser o tempo de ciclo oficial informado pelo DETRAN-DF para a rotatória em estudo. Também foi definido que o tempo mínimo de verde para um semáforo é de 10s, conforme a recomendação do tempo de verde de segurança do CONTRAN (2014), e que o intervalo de incremento no tempo de verde seria de 5s, pois esse intervalo é suficiente para produzir alterações no fluxo de veículos da rede e não gerar uma grande quantidade de simulações. Além disso, também foi definido que tempos de amarelo e vermelho geral são constantes a todos os ciclos e seus valores são respectivamente 5s e 2s, pois são valores comumente utilizados pelo DETRAN-DF e pelo CONTRAN.

A fim de se obter o melhor tempo de ciclo global, foram realizadas outras simulações variando o tempo de ciclo. Inicialmente foram calculados ciclos com diferença de 20s em relação aos três primeiros ciclos escolhidos, e depois foi-se variando 5s em torno do ciclo com menor tempo médio de viagem encontrado. A Figura 3.1 ilustra o gráfico com todos os tempos de ciclo simulados e seus respectivos tempos médio de viagem. É possível dizer que as diferenças do tempo médio de viagem entre os ciclos de 74s e 99s são pequenas e que o melhor tempo de ciclo encontrado é de 94s.

Tempo Médio de Viagem Por Ciclo Semaforico

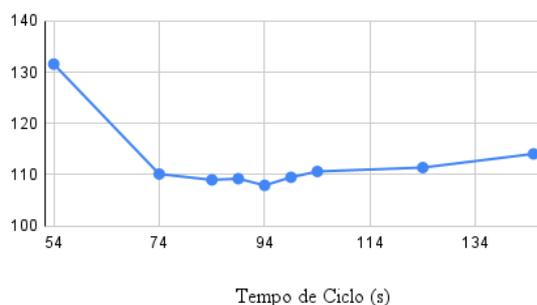


Figura 3.1 Tempo Médio de Viagem por Ciclo Semaforico.

3.1 Ciclo Ótimo Webster

O ciclo de Webster foi calculado utilizando a Equação 7, e posteriormente foi necessário aumentar o ciclo em 30% para que o tempo de verde, em todos os semáforos, não fosse inferior a 10s, que é menor tempo de verde de admissível pela literatura.

$$T_{co} = 5 - \frac{1,5 t_p + 5}{1 - \sum_{i=1}^n y_i} \quad (7)$$

onde T_{co} tempo de ciclo ótimo [s], t_p é o tempo

perdido total [s], y_i é a taxa de ocupação do grupo de movimentos crítico do estágio "i" e "n" é o número de estágios.

Apesar da distorção do tempo de ciclo causada por esse aumento, segundo o CONTRAN (2014) "tempos de ciclo na faixa de 0,75 a 1,5 do tempo de ciclo ótimo produzem atrasos médios por veículos no máximo 20% superiores ao valor do atraso obtido com o tempo de ciclo ótimo".

3.2 Comparação de Cenários

Após obter os valores do tempo de verde do ciclo de Webster, foi então possível inseri-los no simulador e obter o seu respectivo tempo médio de viagem a fim de compará-lo com os cenários do ciclo atual e do melhor ciclo encontrado pelo algoritmo. Os tempos de amarelo e vermelho geral são constantes a todos os ciclos e seus valores são respectivamente 5s e 2s. A Tabela 3.1 traz essa comparação.

Tabela 3.1. Comparação Entre os Principais Ciclos Semafóricos.

Ciclos Semafóricos	Grupos Semafóricos	Tempo de Verde (s)	Tempo de Vermelho (s)	Tempo Médio de Viagem (s)	Tempo de Ciclo (s)
Ciclo do Algoritmo	Sem. 1-0	30	50	107,9	94
	Sem. 2-0	40	40		
	Sem. 3-0	20	60		
Ciclo Ótimo de Webster	Sem. 1-0	20	16	131,5	50, 54 e 53*
	Sem. 2-0	29	11		
	Sem. 3-0	16	23		
Ciclo Atual Medido	Sem. 1-0	85	70	161,8	169
	Sem. 2-0	85	70		
	Sem. 3-0	85	70		

Legenda: * para os cruzamentos 1, 2 e 3 respectivamente

Assim, é possível verificar que o tempo médio de viagem do cenário calculado pelo algoritmo é 18% menor comparado ao cenário do Webster e 33% menor do que o cenário atual.

Todavia, como o ciclo de Webster é teoricamente o ciclo com menor atraso possível, existem três principais hipóteses que explicam esse resultado encontrado. A primeira hipótese é que, devido à falta de calibração, não foi possível simular o trecho viário no software com precisão. A segunda hipótese é que pode ter ocorrido algum erro na coleta de dados do fluxo de saturação, que consequentemente causou erro no cálculo do ciclo de Webster. E a terceira

hipótese é que, segundo o CONTRAN (2014), em interseções com alto grau de saturação não é recomendado o método de Webster para o cálculo do ciclo ótimo.

3.3 Sementes Randômicas

Uma semente (seed) é o ponto inicial para um computador gerar uma sequência de números aleatórios.

O Sumo utiliza sementes aleatórias com base na hora atual do sistema, resultando em um comportamento verdadeiramente aleatório. Entre os principais parâmetros alterados pela semente no início da simulação estão: horário da entrada de veículos na simulação, rotas escolhidas pelos motoristas, distribuição de velocidade dos veículos e comportamento do motorista.

Assim, com o intuito de se obter um comportamento constante da rede, foram rodadas cinco simulações aleatórias, com doze horas de simulação do tempo virtual, para cada um dos três cenários analisados. A Tabela 3.2 traz os tempos médios de viagem para cada simulação.

Tabela 3.2 Tabela com o Tempo Médio de Viagem dos Três Cenários Utilizando Sementes Aleatórias.

Cenários	Tempo Médio de Viagem (s)	Média do Tempo Médio de Viagem (s)
Ciclo do Algoritmo	119,45	118,86
	120,49	
	122,05	
Ciclo Ótimo de Webster	116,79	144,37
	115,53	
	143,94	
Ciclo Atual Medido	144,69	186,47
	145,45	
	143,3	
	144,48	
	186,83	
	186,42	
	187,46	
	185,17	
	186,46	

Primeiramente, observa-se na Tabela 3.2 que os valores do tempo médio de viagem das diferentes sementes possuem variações pequenas, evidenciando que a rede possui um comportamento

constante. Observa-se também que os valores de tempo médio de viagem, em todas as sementes, foram superiores aos da Tabela 3.1, isso ocorreu provavelmente porque as simulações aleatórias rodaram durante doze horas com o fluxo de veículos do horário de pico, contra apenas uma hora da Tabela 3.1.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho realizou uma busca do melhor tempo semafórico utilizando o SUMO, um simulador microscópico de código livre, para melhorar as condições de circulação da rotatória que interliga o final da Asa Norte com o Lago Norte, com o Noroeste e com a EPIA, a partir de simulações computacionais e coleta de dados seguindo as recomendações do CONTRAN e do DNIT. Para encontrar o melhor tempo semafórico, foram definidos três objetivos específicos.

O primeiro, foi desenvolver um algoritmo de varredura do tempo semafórico, o que foi feito através de dados de desempenho de relatórios de saída do SUMO e da linguagem de programação Python3. Essa rotina permitiu, utilizando a medida tempo médio de viagem, encontrar os melhores tempos de verde para cada semáforo da rede, utilizando um tempo de ciclo constante a todos os semáforos.

O segundo, foi avaliar as condições de tráfego global da rede em termos da medida de desempenho tempo médio de viagem. Foi descoberto primeiramente, o melhor tempo de ciclo comum a todos os semáforos e os seus respectivos tempos de verde utilizando o algoritmo desenvolvido. Depois foi calculado o ciclo ótimo de Webster e seu tempo médio de viagem na simulação. Por último, foi calculado o tempo médio de viagem do cenário atual. Assim foi descoberto que o ciclo do algoritmo proporcionou um tempo médio de viagem 18% inferior ao ciclo de Webster e 33% inferior ao ciclo atual.

Porém, como o ciclo de Webster é teoricamente o ciclo com menor atraso possível, evidencia-se que pôde ter ocorrido algum erro de medição do fluxo de saturação, e conseqüente erro no cálculo do ciclo, ou que a falta de calibração do simulador gerou essa distorção. Ainda, há a hipótese de que, segundo o CONTRAN (2014), em interseções com alto grau de saturação não é recomendado o método de Webster para o cálculo do ciclo ótimo, o que pôde também ter gerado esse desvio.

E o terceiro, foi utilizar sementes aleatórias com o objetivo de testar o desempenho da rede. Foram ao

todo, quinze simulações que duraram doze horas do tempo virtual cada, e foram avaliados seus respectivos tempos médios de viagem que variaram entre si em menos de três por cento.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial à UnB (Universidade de Brasília) e ao ENC (Departamento de Engenharia Civil e Ambiental) pelo apoio que permitiu a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Alobaidi, M. K.; Badri, R. M. e Salman, M. M. (2020). *Evaluating the negative impact of traffic congestion on air pollution at signalized intersection*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 737, p. 12146.
- Andrade, J. M. F. (2018). *A tecnologia e seus benefícios para o trânsito*. Disponível em: <https://portaldotransito.com.br/noticias/urbanismo/tecnologia-e-seus-beneficios-para-o-transito/>. Acesso em: 21/11/2019.
- CONTRAN (2014). *Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, Volume V*. Ministério das Cidades.
- Cruz, E. P. (2019). *Três em cada quatro brasileiros não planejam gastos com transporte*. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2019-05/76-dos-brasileiros-nao-planejam-gastos-com-transporte-diz-pesquisa>. Acesso em: 21/11/2019.
- DETRAN-DF (2021). *Tabela de programação semafórica*. Requerimento, via de lei de acesso à informação, número: 59878990.
- DNIT (2006). *Manual de Estudos de Tráfego*. Publicação IPR - 723. Ministério dos Transportes.
- Krajzewicz, D.; Erdmann, J.; Behrisch, M. e Bieker, L. (2012). *Recent development and applications of SUMO - Simulation of Urban Mobility*. International Journal On Advances in Systems and Measurements, v. 5, p. 128-138.
- Leal, M. C. C. (2017). *Plano Diretor de Transportes e Mobilidade do Distrito Federal (PDTU/DF): Instrumento de Mobilidade Urbana - Companhia de Planejamento do Distrito Federal*. Disponível em: http://www.codeplan.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/02/TD_25_Plano_Sustent%C3%A1vel_para_Mobilidade_Urbana_do_DF.pdf. Acesso em: 26/11/2019.
- Manning, F. e Washburn, S. S. (2013). *Principles of Highway Engineering and Traffic Analysis*. Wiley.
- Openstreetmap (2017). Planet dump retrieved from <https://planet.osm.org>.
- Wolshon, B. e Pande, A. (2016). *The Institute of Transportation Engineers, Traffic Engineering Handbook, 7th Edition*. John Wiley Sons Ltd.