



## Aplicação de Simulação de Eventos Discretos para melhorar o tráfego veicular numa região

semaforizada do município de Uberaba – MG

**Recebido:** 08 out. 2021

**Aprovado:** 06 dez. 2021

**Versão do autor aceita publicada online:** 06 dez. 2021

**Publicado online:** 06 jan. 2022

### Como citar esse artigo - American Psychological Association (APA):

Nascimento, V. F., & Miranda, D. M. M. (jan./mar. 2024). Aplicação de simulação de eventos discretos para melhorar o tráfego veicular numa região semaforizada do município de Uberaba – MG. *Exacta*, 22(1), p. 88-118. <https://doi.org/10.5585/exactaep.2022.20897>

---

Submeta seu artigo para este periódico

**Processo de Avaliação:** *Double Blind Review*

**Editor:** Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto



Dados Crossmark



## APLICAÇÃO DE SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS PARA MELHORAR O TRÁFEGO VEICULAR

### NUMA REGIÃO SEMAFORIZADA DO MUNICÍPIO DE UBERABA – MG

Vinicius Ferreira Nascimento<sup>1</sup> e  Douglas Moura Moura Miranda<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Triângulo Mineiro. Departamento de Engenharia de Produção

<sup>2</sup>Universidade Federal do Triângulo Mineiro. Departamento de Engenharia de Produção

#### Notas dos Autores

Os autores não tem conflitos de interesses a declarar



### Resumo

Este trabalho propõem um modelo de simulação para um conjunto de cruzamentos semaforizados de uma área localizada na região central de Uberaba-MG, com o objetivo de determinar valores para os tempos dos semáforos que permitam melhorar o fluxo de veículos. Para isto, descreve-se a dinâmica de funcionamento do sistema real, de modo a identificar as regras e comportamentos a serem incluídos no modelo de simulação, implementado via software Arena. Após a validação do modelo, realizou-se uma série de experimentos comparando diferentes cenários, incluindo experimentos fatorais; seguido por experimentos de otimização dos valores de tempo dos semáforos. O estudo de caso mostra que o tempo atual dos semáforos pode ser alterado de forma a permitir uma melhora de desempenho de até 24%; também se verifica que o Arena pode ser utilizado para a modelagem adequada de múltiplas vias, e que é possível ter uma solução prática, utilizável no mundo real.

*Palavras-chave:* simulação discreta, otimização, tráfego de veículos, semáforos

### Application of computer simulation via Arena software to optimize vehicular traffic in a traffic lighted region of the municipality of Uberaba – MG

### Abstract

This work proposes a simulation model for a set of traffic light intersections in an area located in the central region of Uberaba-MG, intending to determine values for traffic signal timing that improve traffic congestion. For this, the dynamics of the real system are described, to identify the rules and behaviors to be included in the simulation model, implemented via Arena software. After validating the model, a series of experiments comparing different scenarios, including factorial experiments, is performed; followed by experiments to optimize the time values of the traffic lights. The case study shows that the current timing of the traffic lights can be changed to allow a performance improvement up to 24%; it is also verified that the Arena can indeed be used to model properly an area of multiple intersections and that it is possible to have a practical solution, usable in the real world.

*Keywords:* discrete simulation, optimization, vehicle traffic, traffic lights

## 1 Introdução

Lubis & Talib (2021) enfatizam que o congestionamento do tráfego nas vias públicas é uma das principais causas de perda de produtividade e redução de qualidade de vida no meio urbano. O aumento contínuo do nível de congestionamento, especialmente nos horários de pico, é um problema crítico e está se tornando uma grande preocupação para especialistas em transporte e para a população. O congestionamento do tráfego causa atrasos excessivos, redução da segurança e aumento da poluição ambiental e dos custos de transporte.

Um cruzamento é a área onde uma rua ou estrada cruza com outra. Quase todos os meios de transporte, ou seja, pedestre, bicicleta, veículo motorizado e transporte público envolvem lidar com cruzamentos por um determinado período de tempo sendo uma área de movimentos conflitantes. O controle do tráfego no cruzamento é um problema antigo e crescente nas cidades de todo o mundo. Em muitas cidades, os cruzamentos representam gargalos no fluxo de veículos.

Para fazer frente aos cenários de tráfego prevaletentes e atender à demanda cada vez maior de tráfego, o sistema de transporte urbano precisa de metodologias de solução eficazes. Mudanças na infraestrutura urbana podem levar anos, e às vezes nem são viáveis. Por esse motivo, a otimização do tempo de semáforo, conhecido na literatura como *Traffic Signal Timing* (TST) é uma das maneiras mais rápidas e econômicas de reduzir o congestionamento nos cruzamentos das vias de modo a melhorar o fluxo de veículos na rede urbana (Qadri, *et al.*, 2020).

Neste contexto, o presente trabalho utiliza técnicas de Simulação de Eventos Discretos e de Otimização, via software Arena, para otimizar os tempos de semáforos numa região do Município de Uberaba – MG, com o objetivo de maximizar o fluxo de veículos na região simulada; propondo ainda uma forma de operacionalizar a aplicação do método para regiões maiores do sistema real.

## 2 Revisão da Literatura

Sistemas de tráfego são complexos, estocásticos e dinâmicos, com um comportamento que muda muito ao longo do dia, mês e ano, dificultando suas estimativas (Ezzat *et al.*, 2014). É comum



que os conflitos existentes em cruzamentos sejam controlados por semáforos, sendo este o principal motivo para a invenção dos mesmos no começo do século 20 (Wen, 2008).

Pode parecer intuitivo que para reduzir o número de veículos parados num semáforo basta aumentar o tempo da fase verde (aberto) para um movimento ou aproximação específica da via. No entanto, o aumento no tempo verde no semáforo de uma aproximação geralmente ocorre às custas de um atraso maior para outros movimentos. Portanto, um bom plano de temporização de sinal é aquele que aloca os tempos de abertura e fechamento visando melhorar o desempenho geral do tráfego (Bozuyla & Tola, 2021).

Segundo Salimifard & Ansari (2013), a otimização do tempo de semáforos requer medir o desempenho para uma certa configuração do tempo do semáforo. Existem relativamente poucos modelos analíticos para a otimização do tempo de semáforos na literatura. Modelos baseados em simulação tem se mostrado capazes de tratar sistemas de maior complexidade em que diferentes configurações de semáforos, grupos de usuários e estratégias de gerenciamento são utilizados.

O fato de um semáforo alternar entre vermelho e verde requer a introdução de variáveis discretas para o problema de otimização do tempo do semáforo, o que torna o problema combinatório, e considerando a complexidade de todo o sistema de tráfego urbano, sua otimização se torna um desafio. A correta temporização dos semáforos ajuda a reduzir o congestionamento e a melhorar o fluxo de veículos. (Gökçe *et al.*, 2015).

Qadri *et al.* (2020) faz uma revisão de literatura para o período de 2015 a 2020 sobre abordagens de simulação computacional, fornecendo *insights*, oportunidades ainda a serem exploradas na literatura, com possíveis direções para futuros trabalhos de pesquisa na área. A revisão mostrou que 77% dos trabalhos utilizam ferramentas de microsimulação enquanto 23% de macrosimulação.

Segundo López *et al.* (2009), modelos de microsimulação podem modelar o comportamento individual dos veículos, como sua velocidade e localização. Por outro lado, modelos de macrosimulação descrevem de maneira mais geral o fluxo de veículos. Para Lubis & Talib (2021),

modelos microscópicos de tráfego oferecem uma forma de simular diversos comportamentos de um dado veículo, se concentrando no comportamento individual do mesmo, enquanto modelos macroscópicos são baseados na teoria cinética dos gases ou na teoria hidrodinâmica, e usam equações relacionadas à variáveis como vazão, densidade e velocidade média para descrever o fluxo do tráfego.

Estratégias de controle de tráfego também podem ser classificadas como sendo de “tempo fixo” e de “tempo real”. As estratégias de tempo fixo são implementadas de maneira *off-line* usando algoritmos eficientes que se utilizam de dados históricos de tráfego. Como são *off-line*, os algoritmos possuem maior disponibilidade de tempo para serem executados, retornando respostas mais precisas para os dados de entrada recebidos. Já as estratégias em tempo real possuem meios de sincronização *on-line*, utilizando-se de sensores e internet sem fio para coletar dados em tempo real que são utilizados pelos algoritmos de programação dos semáforos. Neste caso, os algoritmos possuem menos tempo disponível para retornar uma solução para a semaforização, por outro lado, seus dados de entrada refletem a situação real do momento, embora isto requeira uma infraestrutura de maior custo (Zhao & Zhang, 2012; Ribeiro *et al.*, 2016). Para Ezzat *et al.* (2014), as estratégias de tempo fixo podem ainda serem subdivididas em “caóticas” e “multiperiódicas”; em que aquelas consideram o dia como um todo, enquanto estas subdividem o dia em diferentes períodos, separando por exemplo, dados dos horários de pico dos demais períodos, tendendo a ser mais precisa. A revisão de Qadri *et al.* (2020) constatou que 63% dos artigos utilizam estratégias de tempo fixo, e 37% de tempo real.

Bozuyula, & Tola (2021) e Qadri *et al.* (2020) apontam que, na literatura, os softwares de simulação mais comuns para abordagem microscópica são: AIMSUN, VISSIM, SUMO, TRANSIMS e PARAMICS. Estes softwares foram originalmente concebidos para a simulação de tráfego, sendo os dois últimos para simulação discreta e os demais para contínua. Salimifard, & Ansari (2013), além de vários outros trabalhos citados na Tabela 1, mostram que softwares gerais de simulação de eventos discretos como o Arena e o AnyLogic tem se mostrado capazes de fazer simulações de tráfego.



Lubis & Talib (2021) e Bozuyula, & Tola (2021) mostram outras alternativas de melhoria do tráfego além da otimização dos tempos de semáforos. São propostos diferentes designs geométricos de cruzamentos além de sistemas inteligentes; que reduzem a dependência de semáforos, mas que por outro lado, ou dependem de mudanças físicas nas vias existentes ou são aplicados a novas vias.

A Tabela 1 lista vários trabalhos relacionados ajudando a dar um contexto do presente trabalho em relação aos demais. As nove colunas fornecem respectivamente: citação do trabalho na literatura ordenado por ano de publicação, o software de simulação utilizado, o tipo de estrutura simulada (se um cruzamento ou uma rotatória), a quantidade de cruzamentos semaforizados, a quantidade de semáforos, a métrica de desempenho utilizada para avaliar o sistema, se aplicou ou não alguma técnica de otimização para encontrar valores de tempo de semaforização, e finalmente, se o modelo proposto possui algum mecanismo para simular com precisão a partida dos veículos que esperam na fila. Alguns campos foram preenchidos com “na” (não aplicável) e outros com “sem inf.” (sem informação, ou seja, informação não estava presente no artigo).

Tabela 1

Lista de artigos relacionados

Citação	Soft.	Estrutura	# Cruz.	#	Métrica	Otim.	Partida
Moita &	Arena	Rotatória	0	0	Tempo em fila	não	na
Salimifard &	Arena	Cruzamento	1	4	Tempo e	não	não
Kamrani &	Arena	Cruzamento	0	0	Tamanho da	não	sem inf.
Ezzat <i>et al.</i>	ExtendSim	Cruzamento	2	7	Tamanho da	sim	sem inf.
Gökçe <i>et al.</i>	VISSIM	Rotatória	9	28	Vazão de	sim	não
Santos <i>et al.</i>	Arena	Cruzamento	1	1	Tempo em fila	não	não
Costa & Silva	na	Cruzamento	1	3	Fluxo de	não	na
Ayyildiz &	Arena	Cruzamento	1	3	Tempo em fila	não	não
Souza <i>et al.</i>	Arena	Cruzamento	1	3	Tempo e	não	não
Sun <i>et al.</i>	Anylogic	Cruzamento	1	4	Tempo no	sim	sem inf.
Zheng <i>et al.</i>	VISSIM	Cruzamento	15	47	Tempo no	na	na
Abohashima	Arena	Cruzamento	2	5	Tempo em fila	não	não
Bakhsh, A.	Arena	Rotatória	1	4	Tempo em fila	não	sem inf.
Presente	Arena	Cruzamento	4	15	Tempo no	sim	sim

Na Tabela 1 nota-se que o artigo de Costa & Silva (2017) não utilizou softwares de simulação e sim um manual do Departamento Nacional de Trânsito (Denatran, 2014) que possui técnicas analíticas e determinísticas para fazer o dimensionamento dos semáforos. Observa-se a existência de vários artigos utilizando o software Arena para simulação de tráfego. A grande maioria modela cruzamentos, sendo que dentre estes, 7 tratam um único cruzamento e 4 tratam mais de um cruzamento. Isto é uma característica relevante pois modelos com mais de um cruzamento permitem a possibilidade de avaliar as interações entre os mesmos. A métrica utilizada na maioria dos trabalhos foi o tempo dos veículos na fila, enquanto alguns utilizaram como métrica o tempo de permanência dos veículos na região simulada. Dentre os 14 artigos, apenas 4 utilizaram técnicas de



otimização como heurísticas e metaheurísticas para otimizar o tempo dos semáforos, enquanto os demais limitaram-se a realizar uma série de experimentos com diferentes configurações para comparar diferentes cenários. Isto é importante pois dado a natureza combinatória do problema, técnicas de otimização são mais indicadas para encontrar melhores valores para a semaforização. Salimifard & Ansari (2013) e Souza *et al.* (2018) possuem modelos parecidos, sendo que a maioria deles ao simular os veículos parados numa fila, assim que o semáforo fica verde, todos os veículos partem imediatamente, o que pode gerar uma imprecisão no modelo, pois caso a fila seja longa é possível que o semáforo feche, e o veículo tenha que esperar novamente, agora numa nova posição da fila.

O presente trabalho buscou tratar a característica de partida dos veículos na fila, e também utilizou técnicas de simulação após melhor compreensão das variáveis através da realização de experimentos com diferentes cenários incluindo experimentos fatoriais; e simula uma região de 7 cruzamentos, sendo 4 semaforizados, de modo a permitir estudar as interações entre os mesmos. O Tópico 3 apresenta o sistema real e a seguir o modelo de simulação; o Tópico 4 detalha os experimentos e seus resultados; enquanto que o Tópico 5 fornece conclusões e considerações sobre o trabalho, incluindo considerações de utilização prática da solução proposta.

### 3 Método de Pesquisa

O presente trabalho possui uma abordagem quantitativa, de natureza aplicada, e objetivo explicativo ao buscar compreender as causas e efeitos do fenômeno investigado. Para isto, elaborou-se uma sequência de experimentos utilizando-se um modelo de simulação de eventos discretos desenvolvido e implementado no software Arena. A Seção 3.1 descreve o sistema real investigado, a Seção 3.2 descreve os procedimentos de coleta de dados e a Seção 3.3 detalha o modelo de simulação implementado.

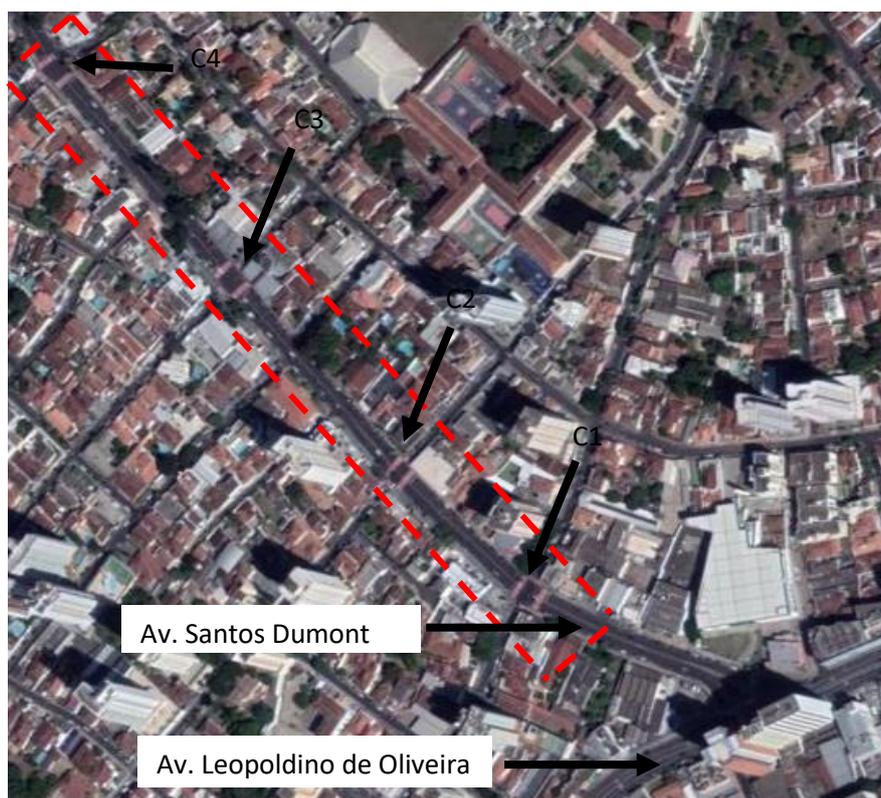
#### 3.1 Sistema real

A região simulada refere-se a um trecho da avenida Santos Dumont, na região central do município de Uberaba – MG, que começa no cruzamento com a rua Manuel Borges e termina no

cruzamento com a rua Epitácio Pessoa. As Figuras 1 e 2 fornecem mais detalhes sobre este trecho, que possui 7 cruzamentos, sendo 4 deles semaforizados.

### Figura 1

*Imagem de satélite da região simulada*



Fonte: Google.

A região possui um alto tráfego de veículos, sendo grande o suficiente para testar a abordagem de simulação, em termos das interações que ocorrem entre os cruzamentos. A Figura 3 padroniza a notação utilizada no trabalho para um cruzamento típico formado pela interseção de duas ruas, cada uma com sua via de entrada e de saída, sendo a via 2 sentido centro (Av. Leopoldino de Oliveira) e a via 4 sentido bairro (aeroporto).



Figura 2

Região simulada

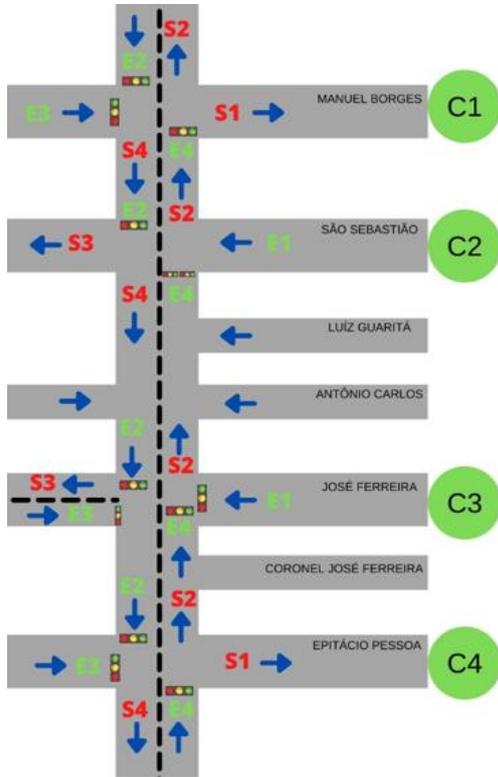
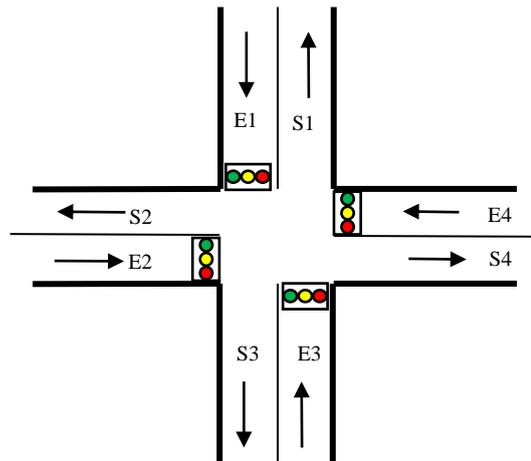


Figura 3

Notação utilizada para os cruzamentos



### 3.2 Dados de entrada

A partir de observações em campo e estudos da literatura, identificou-se as variáveis de entrada relevantes para serem incluídas no modelo computacional, listadas na Tabela 2, com suas respectivas expressões matemáticas para a situação atual do processo. Os dados brutos foram

sujeitos a um tratamento estatístico para remover os outliers e também para confirmar que os dados são independentes e identicamente distribuídos. Utilizou-se o *Input Analyzer* disponível no Arena para realizar testes estatísticos de adesão com o objetivo de identificar funções de distribuição de probabilidade que aproximam adequadamente os dados coletados.

Os dados de entrada modelados como estocásticos são:

$TCH_{k,j}$ : tempos entre chegadas dos veículos em cada entrada  $k$  do cruzamento  $j$ ;

$TV_{j,l}$ : tempo de viagem dos veículos do cruzamento  $j$  ao cruzamento seguinte  $l$ ;

$SA_{k,j}$ : valor inteiro de 1 a 4 identificando a saída utilizada por um veículo que entrou por  $k$ , cruzamento  $j$ .

$TP$ : tempo para um veículo parado na fila mover-se para a posição seguinte a partir do momento em que o veículo da frente começa a se movimentar. Isto inclui o tempo de reação do motorista.

Os dados de entrada modelados como determinísticos são:

$TE_{i,j}$ : tempo (em segundos) do estágio  $i$  do cruzamento  $j$ .

$S_{k,i,j}$ : estado (aberto ou fechado) do semáforo localizado na entrada  $k$  do estágio  $i$  do cruzamento  $j$ .

Pelo menos 50 amostras válidas foram coletadas para as variáveis de entrada estocásticas, no horário das 17:00 às 19:00, ou seja, o horário de pico (escopo do modelo de simulação). Para  $TCH_{k,1}$ , apenas os valores das entradas  $k = 2$  e  $k = 3$  foram coletados já que não há chegada de veículos na entrada  $k = 1$ , e a chegada de veículos em  $k = 2$  não é um dado de entrada e sim de saída, pois é determinada pelo que ocorre no cruzamento  $j = 2$ ; ocorrendo casos análogos para as demais entradas. Como o foco da modelagem está nos quatro cruzamentos semaforizados, eles foram indexados como  $j = 1,2,3,4$ ; sendo que para os demais cruzamentos a referência será feita conforme Figura 2. As expressões matemáticas para estas variáveis estão descritas na Tabela 2, utilizando o formato do software Arena para expressar a função distribuição de probabilidade e os valores de seus respectivos parâmetros que se ajustam aos dados coletados.

A Tabela 3 mostra o mapeamento dos semáforos, informando  $S_{k,i,j}$ , ou seja, o tempo em que ficam abertos (“a”) e fechados (“f”). A semaforização de cada cruzamento é periódica, sendo o seu



tempo de ciclo dividido em estágios; e a sequência dos estágios é também uma informação relevante da tabela.

O sinal amarelo é tratado como fechado, assumido ser uma constante, não sendo considerada uma variável, conforme justificado por Ezzat *et al.* (2014) e Abohashima *et al.* (2019). Lembramos que, conforme Figura 2, o Cruzamento 2, em sua Entrada 4, possui dois semáforos, sendo um reservado para conversão à esquerda; sendo que tal semáforo foi tratado como sendo a Entrada 5 deste cruzamento.

**Tabela 2**

*Dados de entrada*

Entrada	Expressão Arena	Unidade
$TCH_{2,1}$	$LOGN(9.83, 16.9)$	segundos
$TCH_{3,1}$	$LOGN(8.67, 11)$	segundos
$TCH$ Ant. Carlos	$WEIB(3.28, 1.64) *$	segundos
$TCH$ Luíz Guaritá	$UNIF(59, 203)$	segundos
$TCH_{1,3}$	$1 + EXPO(57.2)$	segundos
$TCH_{3,3}$	$6 + GAMM(404, 0.426)$	segundos
$TCH_{3,4}$	$1 + GAMM(25.5, 0.969)$	segundos
$TCH_{4,4}$	$LOGN(3.21, 4.13)$	segundos
$TV_{1,2}$	$N(11.9, 1.3)$	segundos
$TV_{2,1}$	$N(12.6, 1.1)$	segundos
$TV_{2,3}$	$N(13.9, 1.5)$	segundos
$TV_{3,2}$	$N(14.6, 0.9)$	segundos
$TV_{3,4}$	$N(11.1, 0.9)$	segundos
$TV_{4,3}$	$N(12.2, 1.3)$	segundos
$SA_{3,1}$	$DISC(0.72, 1, 0.91, 2, 1.0, 4)$	unidades
$SA_{4,1}$	$DISC(0.2842, 1, 0.9999, 2)$	unidades
$SA_{1,2}$	$DISC(0.18, 2, 0.59, 3, 1.00, 4)$	unidades
$SA_{2,2}$	$DISC(0.00, 2, 0.27, 3, 1.00, 4)$	unidades
$SA_{1,3}$	$DISC(0.31, 2, 0.49, 3, 1.00, 4)$	unidades
$SA_{2,3}$	$DISC(0.01, 3, 1.00, 4)$	unidades
$SA_{3,3}$	$DISC(0.59, 2, 1.00, 4)$	unidades
$SA_{2,4}$	$DISC(0.02, 3, 1.00, 4)$	unidades
$SA_{3,4}$	$DISC(0.44, 1, 0.73, 2, 0.73, 3, 1.00, 4)$	unidades
$SA_{4,4}$	$DISC(0.04, 1, 1.00, 2)$	unidades
$TP$	$N(2.2, 0, 4)$	segundos

Tabela 3

Mapeamento dos semáforos

Cruzam.	1			2			3		4	
Estágio	1	2	3	1	2	3	1	2	1	2
$TE_{i,j}$ (s)	41	16	43	27	41	32	69	16	64	21
Semáforo 1	na	na	na	f	a	f	f	a	na	na
Semáforo 2	a	f	f	a	f	f	a	f	a	f
Semáforo 3	f	f	a	na	na	na	f	a	f	a
Semáforo 4	a	f	f	a	f	a	a	f	a	f
Semáforo 5	na	na	na	f	f	a	na	na	na	na

### 3.3 Modelo de Simulação

Neste tópico explicaremos o modelo de simulação desenvolvido utilizando o Arena. A Figura 4 mostra a parte do modelo responsável por simular o funcionamento dos semáforos do Cruzamento 1. Os módulos foram enumerados na Figura 4 para facilitar referências.

O Módulo 1 cria uma única entidade no tempo zero de simulação, enquanto o Módulo 2 inicializa a variável  $TempoCiclo_k$  (tempo de ciclo dos semáforos do cruzamento  $k$ ) dada como a soma da duração dos estágios deste cruzamento; e a variável  $DurFech_{k,j}$  que representa o tempo de duração em que o semáforo da entrada  $k$  do cruzamento  $j$  fica fechado. Como exemplo, conforme descrito na Tabela 3, temos que  $DurFech_{2,1} = TE_{2,1} + TE_{3,1} = 16 + 43 = 59$  segundos.

Este cruzamento possui semáforos nas entradas 2, 3 e 4. O Módulo 3 atribui o estado de cada um dos semáforos, neste caso  $EstadoSemaf_{2,1} = 0$ , ou seja, aberto;  $EstadoSemaf_{3,1} = 1$ , ou seja, fechado; e  $EstadoSemaf_{4,1} = 0$ , ou seja, aberto. Atualiza-se a variável  $TFinalEst_k$  (momento em que o estágio atual do cruzamento  $k$  irá terminar), sendo  $TFinalEst_1 = TNOW + TE_{1,1}$ , onde  $TNOW$  é o tempo atual do relógio de simulação. Atualiza-se também a variável  $TempoFech_{k,j}$  que armazena o momento (segundo) em que o semáforo da entrada  $k$  do cruzamento  $j$  fechou; neste



caso o momento em que  $EstadoSemaf_{3,1}$  recebeu o valor 1. O Módulo 4 é do tipo “delay” e segura a entidade por um valor de tempo igual à duração do estágio, neste caso,  $TE_{1,1} = 41$  segundos. O funcionamento dos Módulos 5 e 6 (Estágio 2), assim como 7 e 8 (Estágio 3), ocorrem de modo análogo aos Módulos 3 e 4. Note que há um ciclo fechado, sendo que ao final do Estágio 3, o Estágio 1 é reiniciado. Cada um dos demais três cruzamentos possuem um *loop* deste tipo.

Figura 4

Simulação do controle dos semáforos – Cruzamento 1

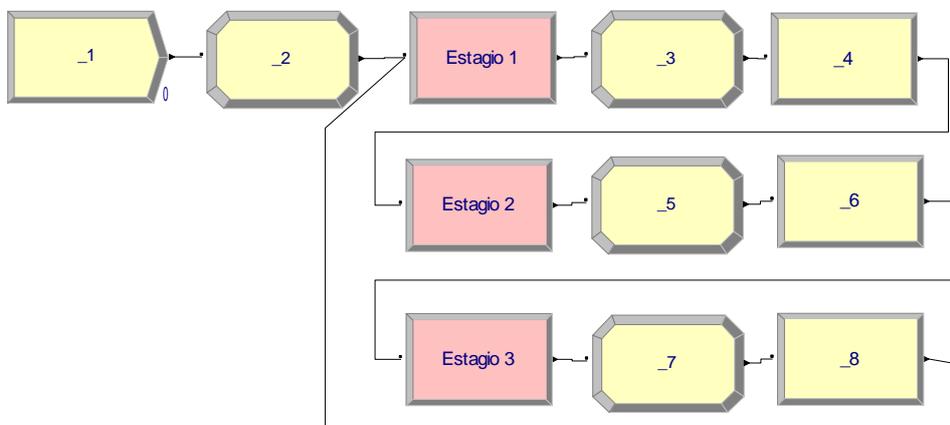
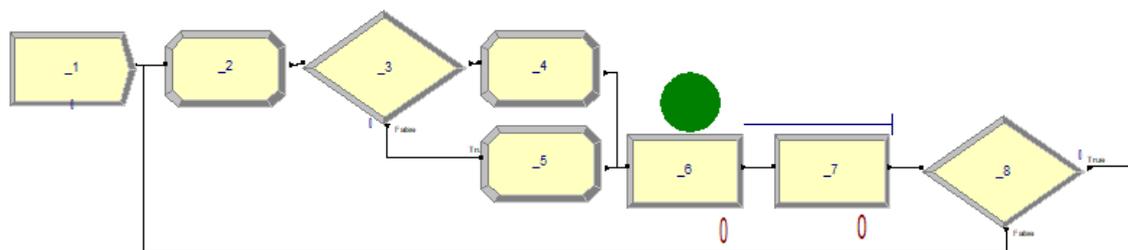


Figura 5

Simulação de veículos pelo semáforo da Entrada 2 do Cruzamento 1



A Figura 5 mostra o modelo de simulação do fluxo de veículos na Entrada 2 do Cruzamento 1, sendo que o Módulo 1 gera as entidades que representam os veículos chegando por este ponto, com o tempo entre chegada de veículos descrito na Tabela 2, enquanto o Módulo 2 atribui o tempo que o veículo irá esperar caso o semáforo esteja vermelho. Isto é dado por  $(TempoFech_{2,1} + DurFech_{2,1} - TNOW) * EstadoSemaf_{2,1}$ . Ou seja, caso o semáforo tenha ficado vermelho no

segundo 41 da simulação, e a duração deste vermelho seja de 16 segundos, então um veículo que chegue nesta entrada no segundo 50 (ou seja, com  $EstadoSemaf_{2,1} = 1$ ), terá atribuído a ele  $(41 + 16 - 50) * 1 = 7$  segundos de espera. Neste módulo, também atribui-se a saída que será utilizada pelo veículo ao passar pelo cruzamento, segundo  $SA_{2,1}$  descrito na Tabela 2. No Módulo 3, caso o semáforo esteja verde ( $EstadoSemaf_{2,1} = 0$ ) a entidade procede para o Módulo 4, caso contrário para o Módulo 5. No Módulo 4, caso haja veículos em fila nesta entrada, mesmo com o semáforo verde, atualiza-se o atributo  $AtEsp = 1$ , sendo  $AtEsp = 0$ , caso contrário. Já o Módulo 5 sempre faz  $AtEsp = 1$ . O Módulo 6 é do tipo “delay” e faz a entidade esperar o tempo atribuído no Módulo 2. O Módulo 7 é do tipo “seize, delay, release” que prende a entidade “veículo” e o recurso “semáforo” pelo tempo  $TP * AtEsp$ . Isto faz com que o veículo, além de esperar pelo tempo vermelho, também espere pelo movimento dos veículos que estejam à sua frente a partir do momento que o semáforo ficou verde. Caso, durante esta espera pelo deslocamento dos carros à frente, o semáforo feche novamente ( $EstadoSemaf_{2,1} = 1$ ), o Módulo 8 irá retornar à entidade novamente para o ponto de entrada, e então os valores da variável serão atualizados, para um novo vermelho que o veículo terá que esperar. Caso o semáforo ainda esteja aberto, o Módulo 8 encaminha a entidade adiante, para a saída do cruzamento. Neste caso, para simplificar as figuras, estes módulos de saída não foram mostrados, mas eles possuem um módulo tipo “decide” que encaminha a entidade conforme o valor do atributo de saída atualizado previamente no Módulo 2. No caso da Entrada 2, Cruzamento 1, conforme Figura 2, 100% dos veículos vão para o Cruzamento 2, ou seja, no modelo de simulação, são encaminhados para um módulo tipo “delay” que atrasa as entidades pelo tempo de deslocamento até o cruzamento seguinte, neste caso,  $TV_{1,2}$ . Note que caso as entidades fossem para a Saída 1 ou 3, elas estariam deixando o sistema simulado, ou seja, no modelo, seriam encaminhadas para um módulo “dispose”. Note também que cada entrada, de cada cruzamento, possui os módulos de simulação análogos ao da Figura 5.

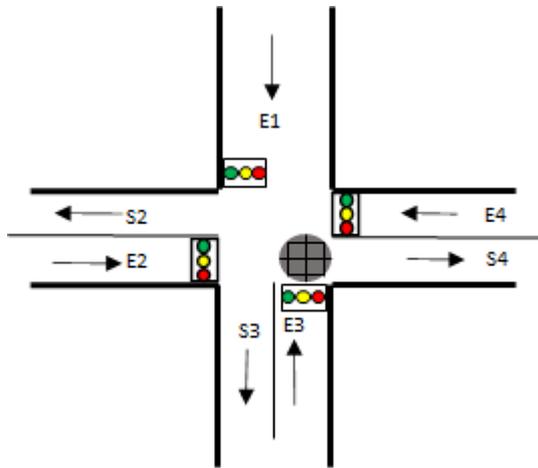
Ainda sobre a Figura 5, a respeito da configuração do Módulo 7, utilizou-se para seu recurso uma capacidade de valor 2. Isto ocorre pois há duas faixas na via, de forma que o tempo de espera



para a saída dos veículos que estão à frente é reduzido à aproximadamente metade. Outra observação refere-se à Entrada 4 do Cruzamento 2, cuja chegada de entidades é dada pela Saída 2 do Cruzamento 3 somadas às chegadas das ruas Luíz Guaritá e Antônio Carlos (Figura 2), sendo estes dois último modelados como um módulo “create” com os tempos entre chegadas descritos na Tabela 2.

**Figura 6**

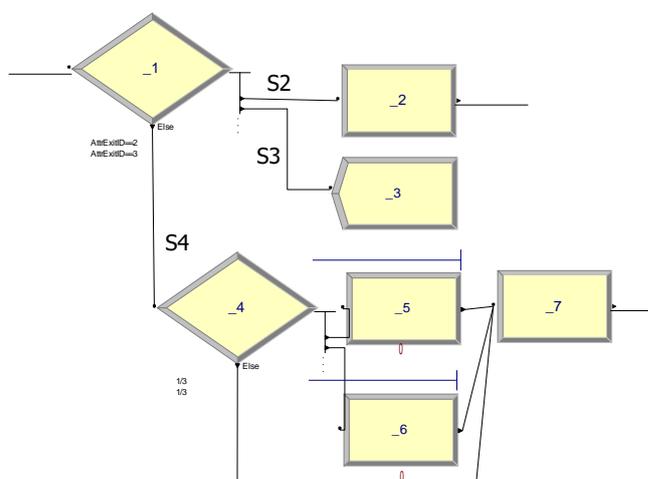
*Cruzamento 3*



No Cruzamento 3, os semáforos das Entradas 1 e 3 ficam abertos ao mesmo tempo, de forma que é possível ter um veículo da Entrada 1 fazendo uma conversão à esquerda e um veículo da entrada 3 fazendo uma conversão à direita, de modo que disputem o mesmo espaço, conforme indicado na Figura 6. Este conflito é resolvido no local por uma sinalização indicando que o veículo da Entrada 1 deve dar a preferência.

Figura 7

Modelagem das saídas do Cruzamento 3



Na Figura 7 mostramos a parte do modelo que simula esta situação, onde o Módulo 1 é um condicional que encaminha as entidades para seu fluxo de saída conforme o atributo definido no Módulo 2 da Figura 5. Neste caso, Cruzamento 3, ele pode ir para a Saída 2 em direção ao Cruzamento 2, de modo que o Módulo 2 da Figura 5 atribui um atraso conforme o tempo de viagem do trecho. Entidades que vão para a Saída 3 são encaminhadas para o bloco “*dispose*”, Módulo 3. Entidades que vão para a Saída 4 passam pelo Módulo 4, tipo “*decide*”, onde caso a entidade seja proveniente da Entrada 3, vai para o Módulo 5, caso seja da Entrada 1 vai para o Módulo 6, e caso contrário, vai direto para o Módulo 7. O Módulo 5 é do tipo “*seize, delay, release*” cujo recurso é o espaço ou região disputada pelos veículos, indicada no círculo hachurado da Figura 6, com um tempo de passagem seguindo uma distribuição Normal de média 1,9 e desvio-padrão 0,25 segundos; sendo configurado com nível de prioridade “Alto”. O Módulo 6 tem a mesma configuração, usando o mesmo recurso, porém com nível de prioridade “Médio”, desta forma caso haja conflito, ele precisa esperar. O Módulo 7 é do tipo “*delay*” e simula o tempo de viagem até o Cruzamento 4.

#### 4 Resultados e Discussão

Esta seção mostra os diferentes experimentos realizados para validar o modelo de simulação e discute os resultados obtidos.



#### 4.1 Experimentos preliminares e validação do modelo de simulação

Inicialmente, experimentos preliminares foram realizados para determinar o número adequado de replicações, ou seja, capaz de fornecer a precisão desejada para as variáveis de resposta. Também, determinou-se o tempo de aquecimento para que as estatísticas de desempenho não fossem influenciadas pelo regime transiente do início da simulação. Utilizando-se as recomendações de Law & Kelton (2000), obteve-se 24 replicações com tempo de aquecimento de 30 minutos. Isto foi feito para quatro variáveis de resposta:

- Tempo C1C4: o tempo que os veículos levam para atravessar a região simulada a partir do cruzamento C1 até o cruzamento C4;
- Tempo C4C1: o tempo de atravessamento inverso (de C4 para C1);
- Fila 1: o tamanho médio da fila de veículos na entrada E2 do cruzamento C4 (última entrada no sentido C1C4);
- Fila 2: o tamanho médio da fila de veículos na entrada E4 do cruzamento C1 (última entrada no sentido C4C1).

Para validar o modelo de simulação, realizou-se um experimento em que o mesmo é alimentado com os dados coletados em campo para comparar as respostas do modelo com as respostas do sistema real. A Tabela 4 mostra o intervalo de confiança (*média ± margem de erro*) de 95% para as quatro métricas selecionadas. Nota-se que as diferenças estão dentro da margem de erro, não sendo estatisticamente significativas.

**Tabela 4**

*Comparação com o sistema real*

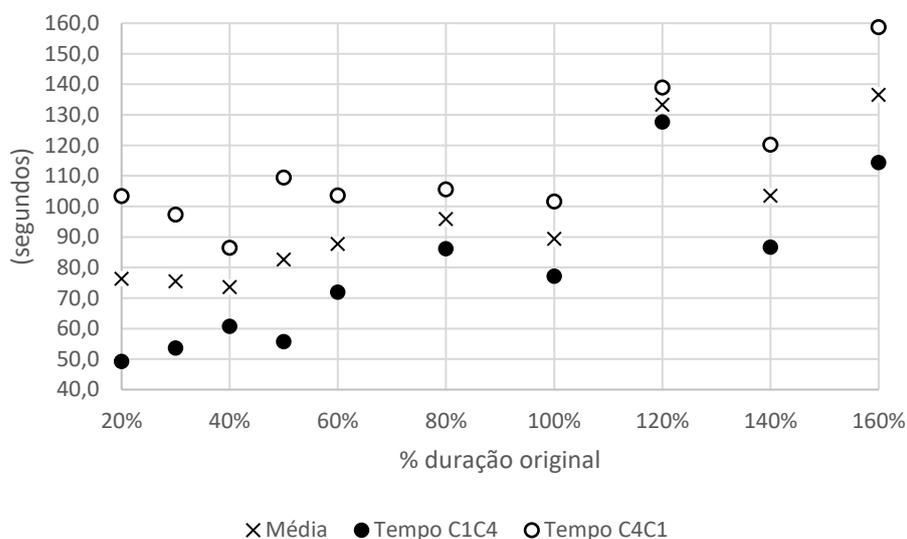
Métrica	Média	Margem de Erro	Média	Margem de Erro
<i>Tempo C1C4</i>	76,2	0,67	77,3	0,8
<i>TempoC4C1</i>	102,7	3,33	101,9	4,11
<i>Fila 1</i>	13,8	0,45	14,1	0,37
<i>Fila 2</i>	3,76	0,18	4,0	0,21

#### 4.2 Comparação de cenários

Neste tópico planejou-se alguns experimentos comparando-se diferentes cenários, de modo a aprender sobre seu impacto nos tempos de atravessamento C1C4 e C4C1. Dado o tempo de ciclo de cada um dos quatro cruzamentos e a duração de seus estágios, desejamos avaliar o impacto de alterações na duração dos estágios em relação aos seus valores originais. Foram realizados experimentos com diferentes valores percentuais, cada um aplicado a todos os estágios, conforme Figura 8, mostrando-se também o valor da média entre os dois tempos de atravessamento. Naturalmente, 100% refere-se aos valores originais, servindo de referência para avaliação do impacto da mudança.

**Figura 8**

*Tempos de viagem para atravessamento da região simulada.*



Na Figura 8, observa-se que, em geral, a redução da duração dos estágios faz com que o tempo para os veículos atravessarem a região simulada seja reduzido. Dentre os cenários simulados, o melhor resultado foi obtido usando 40% dos valores originais de cada estágio, mostrando uma redução no valor médio de 90 para 74 segundos.

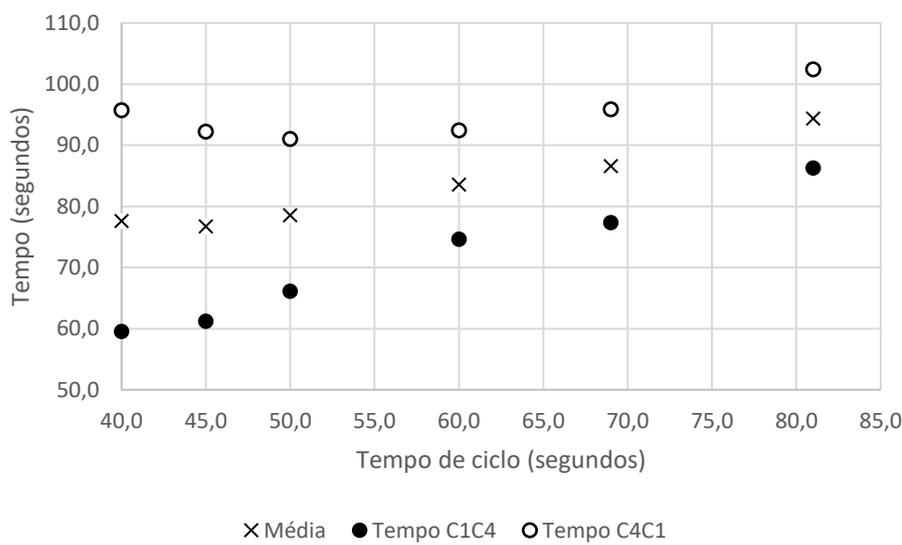
Também se estudou o impacto da implementação de uma onda verde progressiva no sentido C1C4 e C4C1. Para isto a sequência dos estágios em cada cruzamento foi alterada de modo a



privilegiar o sentido escolhido, utilizando 5 segundos de progressão, ou seja, o semáforo seguinte abre 5 segundos após a abertura do semáforo anterior; o tempo de ciclo nos cruzamentos foi fixado em 50 segundos (redução baseada nos resultados do experimento anterior) para manter o sincronismo dos semáforos. Os resultados podem ser vistos nas Figuras 9 e 10.

**Figura 9**

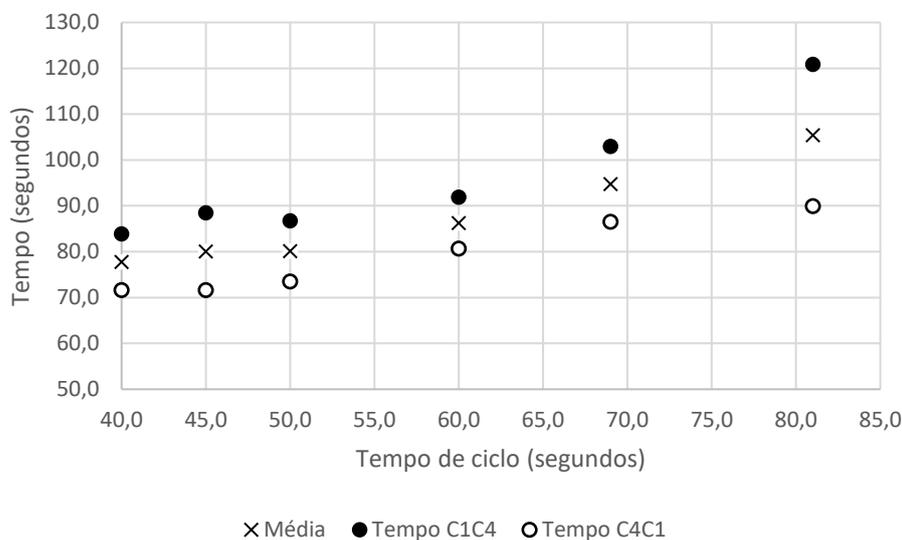
*Tempos de atravessamento para onda no sentido C1C4*



Na Figura 9, os tempos obtidos para C1C4 são significativamente maiores que C4C1. O melhor resultado para C1C4 foi obtido para um tempo de ciclo de 40 segundos, mas neste caso, o tempo C4C1 foi muito penalizado. Vê-se que para ciclos maiores, a diferença entre os dois sentidos diminui, mas continua sendo significativa. O cenário com tempo de ciclo de 50 segundos mostra-se promissor, mostrando 66 e 91 segundos para C1C4 e C4C1, respectivamente, enquanto são de 73 e 103 segundos na Tabela 4.

Figura 10

Tempos de atravessamento para onda no sentido C4C1.



A Figura 10 mostra os resultados para uma onda no sentido C4C1. Observa-se que em geral, os tempos no sentido C4C1 foram melhores que C1C4, com uma diferença maior para o cenário com tempo de ciclo de 81 segundos. O menor tempo de ciclo médio foi obtido para 40 segundos, sendo que as diferenças entre os dois sentidos, embora ainda significativas, são menores que os demais casos.

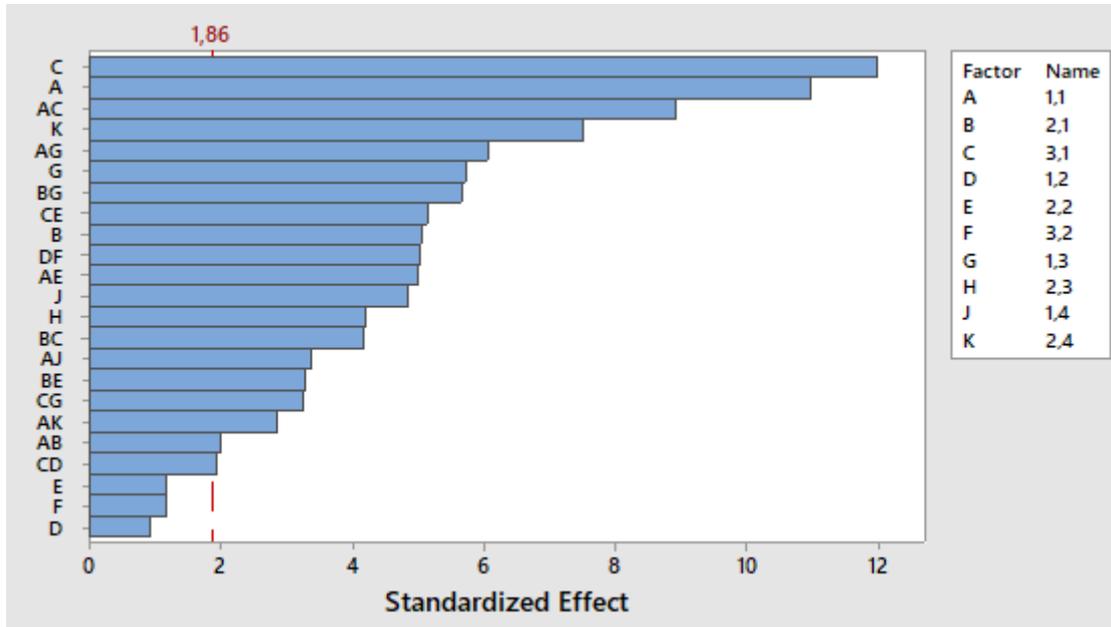
#### 4.3 Experimentos fatoriais

Experimentos fatoriais foram feitos para avaliar o tamanho do efeito da mudança na duração dos estágios de cada cruzamento. Dado que os quatro cruzamentos possuem respectivamente 3, 3, 2 e 2 estágios, temos 10 variáveis de controle (fatores) que foram alteradas em dois níveis, baixo e alto, respectivamente 80% e 120% dos valores originais utilizados no sistema real, enquanto as demais variáveis foram mantidas com valores iguais ao do sistema real. Para limitar a quantidade proibitiva de testar-se todas as combinações entre estes fatores, realizou-se um experimento fatorial fracionário de 1/32 que resultou em 32 experimentos. A variável de resposta utilizada foi a média entre o Tempo C1C4 e o Tempo C4C1.



Figura 11

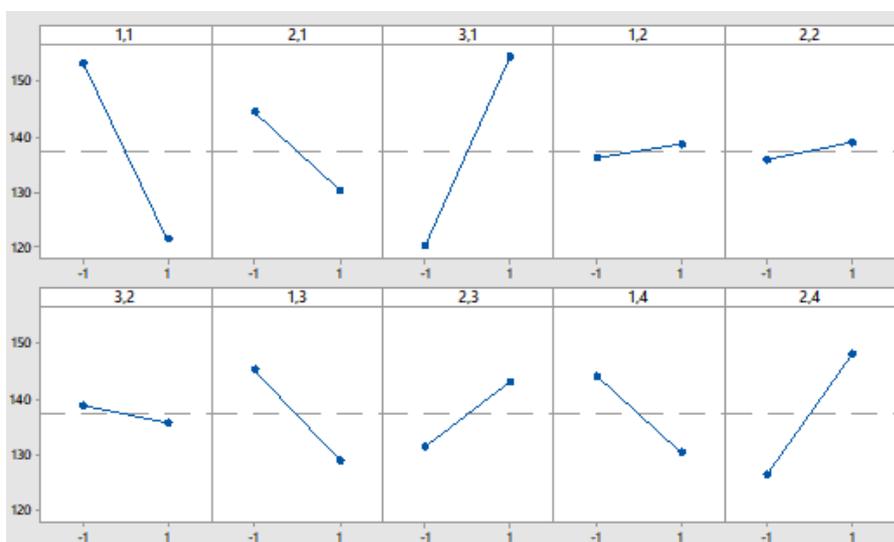
Pareto do Efeito dos fatores



A Figura 11 mostra o efeito de diferentes fatores no tempo médio de atravessamento. Cada fator independente está associado a uma letra indexada pelo par  $(i, j)$ , sendo  $i$  o estágio e  $j$  o cruzamento. Percebe-se que a duração dos estágios C e A, ou seja, respectivamente, o terceiro estágio do cruzamento C1, e o primeiro estágio também do cruzamento C1, são os que apresentaram maior impacto na variável de resposta; sendo a interação entre estes dois estágios aquela de maior efeito. Os termos independentes E, F e D não apresentaram efeito significativo, sendo todos do cruzamento C2. Apesar disto, estes termos aparecem em interações significativas como CE e DF.

Figura 12

*Efeito das variáveis independentes*



A Figura 12 mostra o tamanho do impacto em segundos no tempo médio de atravessamento, para cada um dos fatores independentes, utilizando a mesma indexação da Figura 11. Para o terceiro estágio do cruzamento C1 observa-se que ao aumentar a duração do estágio de 80% para 120% do valor original, o tempo de atravessamento aumentou de aproximadamente 120 para 155 segundos. Nota-se que, de fato, mudanças no tempo dos estágios do cruzamento C2 tiveram baixo impacto.

#### 4.4 Experimentos de otimização

Dado a alta quantidade de variáveis e combinações de valores, o problema tem uma natureza combinatória que pode ser modelada como um problema de otimização. Para isto, este trabalho utilizou o módulo de otimização OptQuest do software Arena. O primeiro modelo utilizado tem como função objetivo a minimização da média dos tempos de atravessamento (Equação 1) sujeito às restrições descritas nas Equações 2 a 5, respectivamente: o tempo máximo de espera na fila ( $TE_{k,j}$ ) dos semáforos localizados nas entradas E2, E4 e E5 ( $k = 2,4,5$ ) de cada um dos quatro cruzamentos  $j$  deve ser inferior a 60 segundos; o tempo máximo de espera na fila para os demais semáforos deve ser inferior a 120 segundos; Tempo C4C1 não deve ser mais de 25 segundos superior



ao Tempo C1C4. Neste modelo, as variáveis de decisão utilizadas são dadas pelos valores de duração ( $DE_{i,j}$ ) do estágio  $i$  do cruzamento  $j$ , que ficaram limitados a um valor mínimo de 5 segundos.

$$\text{Min } (\text{Tempo C1C4} + \text{Tempo C4C1})/2 \tag{1}$$

s. a

$$TE_{k,j} \leq 60 \quad \forall k = 2,4,5; j = 1,2,3,4 \tag{2}$$

$$TE_{k,j} \leq 120 \quad \forall k = 1,3; j = 1,2,3,4 \tag{3}$$

$$\text{Tempo C4C1} \leq \text{Tempo C1C4} + 25 \tag{4}$$

$$DE_{i,j} \geq 5 \quad \forall i = 1,2, \dots, 5; j = 1,2,3,4 \tag{5}$$

A Tabela 5 mostra o resultado obtido pela simulação, com os valores otimizados do tempo de duração em segundos de cada estágio  $i$ , de cada cruzamento  $j$ . Os valores de Tempo C1C4 e Tempo C4C1 na solução otimizada foram respectivamente: 56,7 e 79,4 segundos. O valor da função objetivo de 68,1 segundos, sendo o tempo do sistema real de 89,5 segundos (76,2 para C1C4 e 102,7 para C4C1); tem-se uma melhora de 24% no tempo médio de atravessamento; com uma melhora significativa em ambos os sentidos.

**Tabela 5**

valores otimizados de  $DE_{i,j}$

	cruzamento (j)			
estagio (i)	1	2	3	4
1	12	8	19	18
2	5	12	5	6
3	11	10	NA	NA

Neste primeiro modelo, o valor para duração de estágios foi escolhido de modo independente, sem se preocupar em balancear os tempos de ciclo de cada cruzamento. Foi feito um

segundo modelo em que as variáveis de decisão se referem à percentagem  $P_j$  dos valores originais de duração dos estágios de cada cruzamento  $j$ ; ou seja, o mesmo percentual  $P_j$  é aplicado para todos os estágios de um dado cruzamento  $j$ ; reduzindo-se o número de variáveis de decisão para quatro (quantidade de cruzamentos). A função objetivo e as restrições foram as mesmas do modelo anterior, sendo apenas a restrição da Equação 5 adaptada para  $P_j * DE_{i,j} \geq 5$ , onde aqui  $P_j$  é variável de decisão, e  $DE_{i,j}$  são dados de entrada do modelo referentes aos valores originais de duração de cada estágio.

A Tabela 6 mostra o resultado obtido pela simulação, com os valores otimizados de  $P_j$ . Para esta solução, a função objetivo teve valor de 74,2 segundos, sendo o Tempo C1C4 de 70,0 segundos e o tempo C4C1 de 86,5 segundos. Esta solução, embora pior que do modelo anterior, ainda é 21% melhor quando comparado com o sistema real.

**Tabela 6**

valores otimizados de  $P_j$

	j=1	j=2	j=3	j=4
$P_j$	0,33	0,33	0,45	0,45

#### 4.5 Análise de sensibilidade

Os experimentos anteriores mostraram ser possível uma melhora de até 24% no tempo que um veículo leva para atravessar a região simulada. Considerando o caráter dinâmico da demanda, faz-se relevante avaliar até que ponto uma dada solução de temporização dos semáforos se manteria factível mediante mudanças no fluxo de veículos. Para isto selecionamos as duas principais entradas na região simulada e fizemos experimentos com diferentes valores dos tempos entre chegadas de veículos para a solução de temporização de semáforos obtida na Seção 4.4.

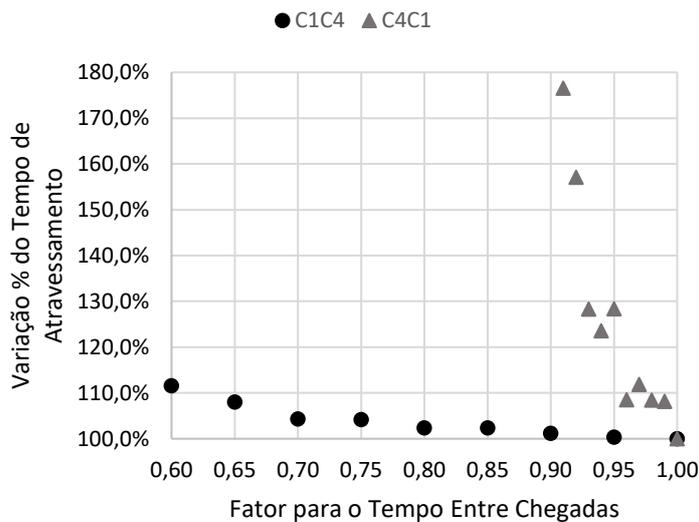
Os tempos entre chegadas da Entrada 2 do Cruzamento 1 e da Entrada 4 do Cruzamento 4, respectivamente  $TCH_{2,1}$  e  $TCH_{4,4}$ , foram multiplicados por um fator variando de 0,60 a 1,00; sendo que o primeiro representa uma redução de 40% no tempo entre chegadas (maior fluxo de veículos) e



o segundo representa o valor original dos tempos entre chegadas. Como a temporização dos semáforos permanece fixa, alterações em  $TCH_{2,1}$  afetam o tempo de atravessamento do Cruzamento 1 ao 4 (C1C4) e alterações em  $TCH_{4,4}$  afetam o tempo do Cruzamento 4 ao 1 (C4C1).

**Figura 13**

*Análise de sensibilidade do tempo de atravessamento*



Os resultados são mostrados na Figura 13 em que pode ser visto que o tempo de atravessamento C4C1 aumentou em 10% para uma variação de apenas 5% no tempo entre chegadas, enquanto que C1C4 apresentou os mesmos 10% de aumento para uma variação de 40% no tempo entre chegadas; ou seja, o tempo C4C1 se mostrou muito mais sensível às alterações no tempo entre chegadas que o tempo de atravessamento C1C4. Isto é importante pois em termos práticos, caso o tempo entre chegadas na Entrada 4 do Cruzamento 4 tenha sua média alterada em mais de 5% convém realizar uma nova otimização do modelo de simulação para encontrar novos valores para a temporização dos semáforos.

## 5 Conclusões e considerações

### 5.1 Considerações para utilização prática

A solução proposta tem potencial para ser utilizado na prática. Em termos de tempo computacional, utilizando um laptop de 16Gb de memória RAM, e sistema operacional Windows 10,

o Arena levou em média 0,5 segundos para executar uma replicação da região simulada com 7 cruzamentos, sendo 4 semaforizados. Por isto, entende-se ser possível simular regiões bem maiores com tempos de execução não proibitivos.

Os experimentos realizados neste trabalho utilizaram dados do horário de pico das 17:00 às 19:00 de segunda a sexta-feira. Sugere-se adotar uma abordagem com pelo menos 4 períodos, para melhor representatividade das condições de tráfego ao longo do dia.

Os dados de entrada necessários foram mapeados. Pode-se preparar uma planilha Excel para coletar os dados em campo periodicamente, digamos pelo menos anualmente, para atualizar os valores de tráfego, particularmente do tempo entre chegadas dos veículos. Uma macro Excel pode ser feita para alimentar automaticamente o Arena com os dados da planilha Excel, e o Arena em si pode ser executado em *background* pela mesma macro, não demandando interação direta do usuário com o Arena. Um módulo do tipo “*read-write*” pode ser utilizado para salvar as métricas de desempenho e os valores de tempo dos semáforos num Arquivo Excel, de modo a dar suporte à tomada de decisão pelo usuário.

## 5.2 Conclusões e considerações finais

O presente trabalho capturou as regras e comportamentos do sistema real que eram relevantes para o modelo de simulação, e selecionou uma área real de tráfego intenso que incluía 7 cruzamentos, sendo 4 semaforizados, de modo a permitir identificar relações entre cruzamentos adjacentes.

O modelo foi alimentado com dados do horário de pico entre 17:00 e 19:00, mas isto não é limitação do modelo, já que ele pode ser alimentado com dados de qualquer horário do dia. Já os resultados dos experimentos realizados ficam limitados a este horário, mostrando ser possível que melhorias também possam ser identificadas em outros horários. O modelo não considerou o tamanho físico dos veículos, mas isto não se mostrou relevante dado que os experimentos de validação mostraram um comportamento equivalente entre o simulado e o real em termos das métricas de saída selecionadas.



Os experimentos de comparação de cenários apontaram que reduções no tempo de ciclo dos semáforos permitem reduzir significativamente o tempo de viagem para atravessar a região simulada. Uma redução de 60% nos tempos de ciclo, resultou numa redução no valor médio do tempo de viagem de 90 para 74 segundos, ou seja cerca de 18%. Os experimentos fatoriais mostraram que a duração dos estágios C e A, ou seja, respectivamente, o terceiro e o primeiro estágio do cruzamento C1, são os que apresentaram maior impacto na variável de resposta. Os experimentos de otimização mostraram ser possível atingir uma melhora de 24% no tempo médio de atravessamento respeitando-se os valores estipulados de tamanho de fila. Uma análise de sensibilidade foi realizada mostrando que para uma dada solução, o tempo de atravessamento do Cruzamento 4 ao 1 é muito mais sensível a mudanças no tempo entre chegadas dos veículos.

Uma delimitação do trabalho é que caso haja mudanças nos sentidos das vias, por exemplo, o modelo de simulação deve ser atualizado para encontrar novos valores de temporização dos semáforos. Uma limitação é que não é possível fazer inferências sobre o impacto da melhoria do fluxo de veículos da região simulada sobre as regiões adjacentes. Em termos de aplicação prática, recomenda-se simular uma região maior, de modo que os tempos de execução da simulação obtidos neste trabalho mostraram que isto é possível.

O trabalho evidencia que o uso de técnicas de simulação e otimização podem trazer melhorias significativas no tráfego de veículos e possuem potencial prático. Futuros trabalhos podem se concentrar em simular regiões ainda maiores e em criar uma interface que permita sua utilização pelo usuário final.

### Referências

- Abohashima, H. S., Gheith, M., & Eltawil, A. (2019, November). Solving the urban traffic lights scheduling problem using discrete event simulation and design of experiments. In *Proc. Int. Conf. Comput. Ind. Eng. CIE* (Vol. 2019).
- Ayyildiz, E., Murat, M., & Demirci, E. (2017). INTERSECTION SIGNALING SIMULATION. *Sigma*, 8(4),

357-364.

Bakhsh, A. (2020). Traffic Simulation Modeling for Major Intersection. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24(1), 37-44.

Bozuyula, M., & Tola, A. T. (2021). Designing a Novel Transportation System Using Microscopic Models and Multi-Agent Approach. *Automatic Control and Computer Sciences*, 55(2), 125-136.

Costa, Glenda da Silva; SILVA, Jéssica Maysa Santos da. (2017). Dimensionamento do semáforo do cruzamento das ruas Matriz da Conceição e Siqueira Campos em Tucuruí-PA à luz do novo manual de sinalização semafórica do Denatran. *Trabalho de Conclusão de Curso – Campus Universitário de Tucuruí, Universidade Federal do Pará, Tucuruí.*

Denatran (Departamento Nacional de Trânsito), 2014. Manual de Sinalização de Trânsito Volume V – Sinalização Semafórica. Brasília: CONTRAN.

Ezzat, A. A., Farouk, H. A., El-Kilany, K. S., & Moneim, A. F. A. (2014, January). Optimization using simulation of traffic light signal timings. In *Proceedings of the 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* Bali, Indonesia.

Gökçe, M. A., Öner, E., & Işık, G. (2015). Traffic signal optimization with Particle Swarm Optimization for signalized roundabouts. *Simulation*, 91(5), 456-466.

Kamrani, M., Abadi, S. M. H. E., & Golroudbary, S. R. (2014). Traffic simulation of two adjacent unsignalized T-junctions during rush hours using Arena software. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 49, 167-179.



Law, A. M.; Kelton, W. D. (2000). *Simulation modeling and analysis*. 3. ed. Nova York: McGraw-Hill Education, 2000.

López-Neri, E. Ramírez-Treviño, & López-Mellado, A modeling framework for urban traffic systems microscopic simulation, *Simulation Modeling Practice and Theory*, 2009, in press.

Lubis, Z., & Talib, A. Z. (2021). Concept and Design of an Intelligent Strategy to Mitigate Traffic Congestion at Intersection.

Moita, M. H. V., & Almeida, E. S. D. (2012). Aplicação de simulação para obtenção de soluções ao tráfego em rotatória da cidade de Manaus. *Journal of Transport Literature*, 6, 93-109.

Qadri, S. S. S. M., Gökçe, M. A., & Öner, E. (2020). State-of-art review of traffic signal control methods: challenges and opportunities. *European transport research review*, 12(1), 1-23.

Ribeiro, I. M., & Simões, M. D. L. D. O. (2016). The fully actuated traffic control problem solved by global optimization and complementarity. *Engineering Optimization*, 48, 199–212.

<https://doi.org/10.1080/0305215X.2014.995644>

Salimifard, K., & Ansari, M. (2013). Modeling and simulation of urban traffic signals. *International Journal of Modeling and Optimization*, 3(2), 172.

Santos, R. D. S., Paquerote, W. A., & da Silva Soares, W. K. Simulação de trânsito e semáforos: um estudo de caso piloto em um trecho no entorno do campus da UFRN.

Souza, Ildrienne; Miranda, Janyne; Souza, Layse; Souza, Kamilla. (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*.

Sun, L., Tao, J., Li, C., Wang, S., & Tong, Z. (2018). Microscopic simulation and optimization of signal timing based on multi-agent: a case study of the intersection in tianjin. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 1-10.

Wen, W. (2008). A dynamic and automatic traffic light control expert system for solving the road congestion problem. *Expert Systems with Applications*, 34(4), 2370-2381.

Zhao, D., Dai, Y., & Zhang, Z. (2012). Computational intelligence in urban traffic signal control: A survey. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, 42, 485–494. <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2011.2161577>

Zheng, L., Xue, X., Xu, C., & Ran, B. (2019). A stochastic simulation-based optimization method for equitable and efficient network-wide signal timing under uncertainties. *Transportation Research Part B: Methodological*, 122, 287-308.