

APLICAÇÃO DE SIMULAÇÃO EM UM CRUZAMENTO RODOVIÁRIO

Michel Bruno Wanderley de Oliveira

Universidade Estadual do Maranhão
Cidade Universitária Paulo VI – Caixa Postal 09 – São Luís/MA
mbw.oliveira@gmail.com

Heygon Henrique Fernandes Araújo

Universidade Estadual do Maranhão
Cidade Universitária Paulo VI – Caixa Postal 09 – São Luís/MA
heygonhenrique@hotmail.com

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar a aplicabilidade de modelagem e simulação computacional em sistemas de trânsito, com o intuito de buscar soluções que garantam melhor fluidez e evitem congestionamentos compulsórios. O trabalho apresenta um estudo de caso, onde para o processo de modelagem do sistema, dados reais foram coletados em campo e o modelo de simulação foi desenvolvido por meio do software ARENA®. Durante as simulações e análise de cenários, os resultados alcançados evidenciam a necessidade de melhorias no sistema de controle semafórico atual do ambiente estudado.

PALAVRAS CHAVE. Modelagem, Simulação Computacional, Semáforos.

Tópicos (Simulação)

ABSTRACT

This work aims to present the use of computational modeling and simulation on traffic systems, in order to seek for solutions that ensure better traffic flow and avoid compulsory traffic jams. It is shown a case study, where for the modeling process of the system, real data were collected from the environment and the simulation model was built in ARENA® software. During the simulations and scenario analyses, the results highlight the need for improvements in the current traffic control strategy of the studied system.

KEYWORDS. Modeling. Computational Simulation. Traffic Lights.

Paper topics (Simulation)

1. Introdução

O trânsito nos grandes centros urbanos causa muitos problemas para seus habitantes desde a economia (com o desperdício de recursos), até a saúde da população, com a poluição gerada pelos veículos, e também com o estresse relacionado aos congestionamentos.

O aumento da utilização da rede viária juntamente com o baixo investimento e a impossibilidade de ampliação das rodovias, faz com que o trânsito torne-se lento e demorado (congestionado) em algumas vias e em determinados horários; ou seja, cada vez mais aumenta complexidade no escoamento do fluxo de veículos.

Segundo Campos (2006), a consequência imediata deste problema é o aumento do consumo de combustíveis, que é considerado um problema de ordem econômica e também um fator de degradação ambiental. Para o DENATRAN o tempo de espera em congestionamento representa um acréscimo de cerca de 30% no consumo de combustível [Brasil 2012].

Além do mais, fluxos de veículos lentos, além de intensificar o calor e o barulho, provocam nas pessoas irritação e sensação de perda de tempo. Consequentemente, estes fatores causam problemas de ordem psicológica como o estresse. Esse estresse agrava ainda mais o problema do trânsito congestionado, uma vez que alguns motoristas tentam encontrar atalhos onde não existem, sendo esta atitude um grande causador de acidentes de trânsito. Problemas de ordem social também podem ser causados devido a essa dinâmica do trânsito tais como: rendimento profissional, diminuição do convívio familiar, aumento do tempo de vivência dentro dos veículos (gerando sedentarismo), entre outros.

Uma das formas de evitar os problemas acima citados é melhorando o fluxo de veículos nas vias, e isto deve ser uma das principais preocupações das autoridades competentes locais. A melhoria no tráfego reduz o consumo de combustível, a emissão de poluentes no ar e também minimiza o estresse causado pelo trânsito lento e demorado [Campos 2006].

Na tentativa de amenizar esses problemas, os controladores semafóricos vêm sendo continuamente aperfeiçoados de modo a permitir que respondam cada vez melhor às solicitações dos fluxos de tráfego nas interseções. Nesse ponto, a definição dos tempos de semáforos deve ser feita de modo cuidadoso. Para Luna (2003), “o tempo de verde alocado deve passar por critérios rigorosos, uma vez que tempos mal ajustados implicam atrasos compulsórios, senão em congestionamentos evitáveis”. A principal dificuldade na programação semafórica está na variação do fluxo de tráfego ao longo do tempo, requerendo que a alocação dos tempos de verde também varie para se adequar a essa demanda variável.

Nesse contexto, uma engenharia de trânsito eficiente e capaz de amenizar o impacto desse crescimento torna-se imprescindível. Para isso, soluções práticas, rápidas e eficientes são necessárias de modo que se garanta a fluidez e a segurança no trânsito.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo apresentar a aplicabilidade de modelos de simulação como ferramenta de apoio à tomada de decisão na gerência de tráfego e determinação de tempos de semáforos. O trabalho traz uma abordagem prática, com um estudo de caso para um cruzamento específico da cidade de São Luís - MA.

2. Revisão Bibliográfica

A utilização de modelagem e simulação de sistemas na resolução de problemas não é uma abordagem nova. De acordo com Solon (2012), o uso de simulação iniciou-se na década de 80 com o avanço (mais rápidos) e a acessibilidade (mais baratos) dos computadores. Nesta época a simulação era utilizada basicamente para determinar causas de acidentes.

Entende-se por simulação como modelagem computacional de um sistema ou processo para imitar as respostas do sistema real em eventos que ocorrem ao longo do tempo. Assim, a metodologia de simulação computacional utiliza a modelagem conceitual de processos, em uma de suas etapas. Solon (2012) expõe que o uso de técnicas de modelagem proporciona um aumento na qualidade dos modelos de simulação e uma redução no tempo necessário para construção desses modelos computacionais.

Conforme a literatura, desenvolver modelos de processos antes dos modelos de simulação proporciona algumas vantagens tais como: auxílio na coleta de informações, redução de esforços e tempo consumido no processo de modelagem. Neste sentido alguns autores procuram explicar a diferença entre o modelo conceitual e o modelo computacional. O primeiro consiste na representação matemática, lógica ou verbal do problema. Enquanto que o modelo computacional consiste no modelo conceitual implementado em um computador.

Vários trabalhos envolvendo a criação de modelos de simulação em sistemas de trânsito foram identificados na literatura. Dentre esses, alguns podem ser destacados por sua relevância.

Por exemplo, Baptista e Rangel (2013) apresentaram uma integração de um modelo de simulação com um sistema de controle automático. Neste trabalho o modelo de simulação de um cruzamento com vias semaforizadas foi construído no ambiente ARENA®. Por sua vez o sistema de controle foi operado por um CLP (Controlador Lógico Programável) e a integração e comunicação deste sistema com o ARENA® foram feitas através de rede de comunicação. De acordo com os autores, o modelo possibilitou avaliar o comportamento do trânsito em cada uma das vias e os comandos oriundos do controlador para ativação dos semáforos.

Salimifard e Ansari (2013) também empregaram simulação em ARENA® para modelar e simular um sistema de tráfego urbano. O objetivo do trabalho foi ilustrar a aplicabilidade de modelos de simulação em sistema de trânsito através de um estudo de caso. Para os autores, determinar a melhor fluidez do tráfego de veículos normalmente é incompatível com as questões de segurança. Por outro lado, controlar o trânsito do ponto de vista da segurança implica em limitações no gerenciamento da fluidez do tráfego veicular. Estes conflitos requerem tomadas de decisões por parte dos gestores de trânsito, em que a abordagem de modelos de simulação serve como base para análises de diferentes políticas de controle.

Solon (2012) propôs um modelo do comportamento do transporte público em corredores de transporte público por ônibus com base em conceitos de logística urbana utilizando as ferramentas computacionais ARENA® e TransCAD®. O modelo em questão considerou os embarques e desembarques de passageiros e os deslocamentos dos ônibus no corredor. Desta forma, foi possível simular o corredor conforme a demanda de passageiros e o nível de serviço adotado na hora de pico.

Abd-Fatah et al. (2011) desenvolveram dois modelos de simulação para uma interseção semaforizada também utilizando o software ARENA®. Um modelo de simulação foi desenvolvido com base em um sistema de controle de tempo fixo (time-based) e o outro modelo com base em um sistema de controle atuado (sensor-based). O objetivo do trabalho foi ilustrar, através da simulação, se as melhorias ao implantar um sistema de controle atuado eram significantes com relação ao sistema de controle atual (tempo fixo). Os resultados mostraram que o tempo médio de espera para o novo sistema de controle reduziu em 62,5%.

O trabalho de Zhang & Jian (2010) traz uma aplicação de simulação em ARENA® para resolver o problema de uma interseção semaforizada. O modelo de simulação foi desenvolvido para que se pudesse analisar o fluxo veicular do cruzamento e, portanto, estudar as relações entre os sistemas de controle e subsistemas.

Por sua vez, Muniz, Guimarães Campos (2009) abordaram a simulação computacional como ferramenta para análise e tomada de decisão em sistemas de controle tráfego. A pesquisa teve como objetivo criar um modelo de simulação computacional para o Cruzamento com interseções semaforizadas no centro da cidade de Marina-MG, que atende a maior parte o fluxo de veículos. Para os autores, a simulação propiciou um melhor entendimento e compreensão dos sistemas, auxiliando na tomada de decisão referente a redução no tempo de espera em sinais de trânsito. Além do mais, a simulação, possibilitou uma nova configuração que traz melhorias ao sistema em estudo sem causar transtornos para os usuários.

3. Metodologia

A metodologia utilizada envolve a modelagem de um ambiente computacional, através da ferramenta ARENA®, para um cruzamento específico da cidade de São Luís - MA, localizado

na Av. Jerônimo de Albuquerque, com o intuito de verificar o comportamento do fluxo veicular e propor melhorias para o sistema de controle atual, verificando melhores configurações de tempo de vermelho, verde e amarelo. A Figura 1 ilustra o cruzamento estudado através de uma imagem obtida do software Google Earth.



Figura 1 - Cruzamento na Avenida Jerônimo de Albuquerque

Este trabalho se classifica, quanto a sua natureza, como pesquisa aplicada, pois aborda aplicação de técnicas descritas na literatura para modelagem e simulação de sistemas, gerando critérios para a avaliação de uma solução para um problema real.

No trabalho de Solon (2012) é apresentada 3 (três) fases para condução de um projeto de simulação: concepção, implementação e análise dos resultados do modelo. Na fase concepção, o objetivo é entender claramente o sistema a ser simulado, além de decidir qual a abrangência, identificar e coletar os dados de entrada do sistema. Já na segunda fase, implementação, o modelo conceitual é traduzido em um modelo computacional através de ferramentas específicas. Por fim, na fase de análise dos resultados, o modelo computacional é testado e validado.

3.1. Concepção e Análise de Dados

Analisando a estrutura do ambiente, as seguintes características foram destacadas:

- uma via principal de mão dupla (sentidos 1 e 2);
- uma ramificação da via principal, para fazer retorno (sentido 3);
- uma via secundária não semaforizada (também de mão dupla);
- um semáforo de duas fases: A (via principal) e B (retorno).

A Figura 2 abaixo apresenta um diagrama esquemático, as setas representam os sentidos dos fluxos veiculares. O estudo foi conduzida apenas com base nas aproximações mais críticas, ou seja, Aprox. 1 (sentido 1) e Aprox. 2 (Sentido 3) como mostrado na figura.

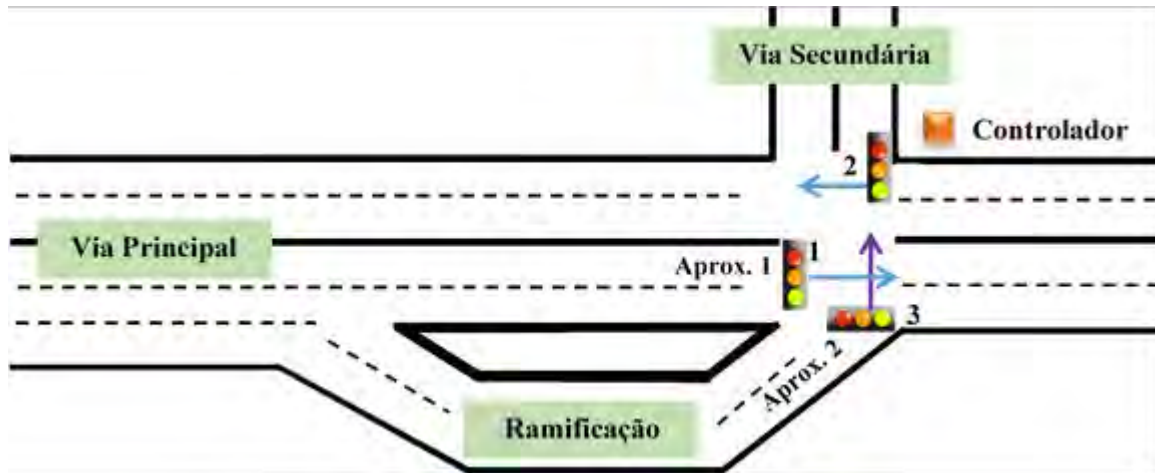


Figura 2 - Estrutura do Cruzamento Analisado

No que tange ao controle semafórico, a programação é de tempo fixo, seguindo um padrão com tempo de ciclo de 106 s. O ciclo é distribuído em quatro estágios conforme diagrama de tempos mostrado na Figura 3 mais adiante. Como pode-se observar, no estágio 1 o semáforo libera o fluxo de veículos para a Fase A (sentido 1 e 2), por um período de 80 s enquanto que a Fase B (sentido 3) está bloqueada, em seguida o sinal de alerta é enviado para Fase A durante 3 s e Fase B ainda bloqueada. Já no estágio 3 tem-se o inverso do estágio 2 por um período de 20 s, e no estágio 4 tem-se o alerta enviado para Fase B; assim, o ciclo se repete.

Fase A	[Barra Verde]		[Barra Amarela]	[Barra Vermelha]	[Barra Vermelha]
Fase B	[Barra Vermelha]		[Barra Vermelha]	[Barra Verde]	[Barra Amarela]
Estágio	1	2	3	4	
Tempo em s	80	3	20	3	
<p>Ciclo</p>					

Figura 3 - Diagrama de Tempos

Neste trabalho não foram considerados fatores dimensionais relativos a comprimento e largura das faixas de aproximação. O processo de modelagem baseou-se apenas nas regras de configurações dos tempos de direito de passagem para cada via.

Dados reais foram coletados a partir de vídeos gravados no local estudado. A análise do fluxo de veículos por vídeo, para coleta de dados, também pode ser verificado nos trabalhos de Oliveira (2013) e Montalvão (2009).

Para melhor verificar o comportamento do fluxo veicular no ambiente, as gravações foram obtidos ao longo de 10 dias (segunda a sexta-feira). Cada vídeo foi realizado entre 10:30 e 13:30 (minutos antes do início do horário de congestionamento até o término).

Primeiro, foi coletada a quantidade de veículos que cruzaram as aproximações críticas (Aprox. 1 e Aprox. 2, ver Figura 1); ou seja, o fluxo veicular. Estas informações foram utilizadas para a determinação do TEC (tempo entre chegada) de veículos em cada via. Para facilitar o estudo, a taxa de chegada média de veículos é dada por:

$$q = \frac{Q}{T} \quad (1)$$

em que: q – taxa de chegada média; Q – quantidade de veículos; T – período de contagem.

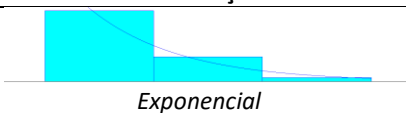
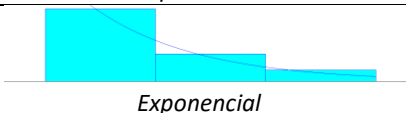
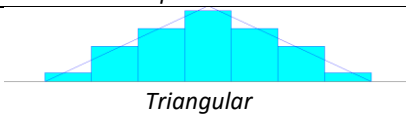
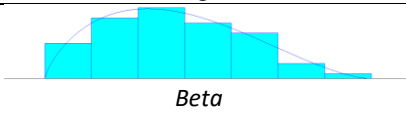
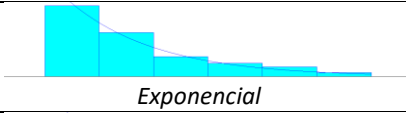
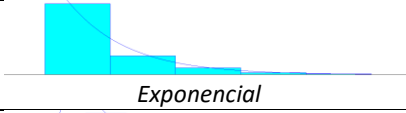
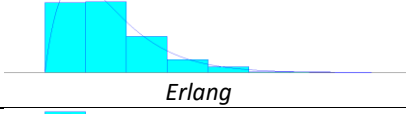
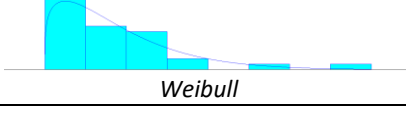
Para a chegada de veículos no modelo de simulação foi utilizada uma distribuição exponencial com média $h = (1 / q)$; ou seja, o intervalo entre chegadas que descreverá a quantidade de fluxo de cada via. Para proporcionar maior realismo ao modelo e para agilizar o processo de contagem, foram definidos três tipos de veículos: moto, carro e ônibus/caminhão.

Tabela 1 - Distribuição de TEC das Aproximações 1 e 2

Aproximação	Tipo de Veículo	Distribuição TEC (em min)
1 (Fase A)	Moto	EXPO (0.217)
	Carro	EXPO (0.032)
	Ônibus/Caminhão	EXPO (0.549)
2 (Fase B)	Moto	EXPO (1.241)
	Carro	EXPO (0.163)
	Ônibus/Caminhão	EXPO (5.806)

Cabe ressaltar que foi feito a contagem veicular nos 10 dias de filmagens e o estudo foi realizado com os dias que apresentaram maior fluxo para cada tipo de veículo mencionado acima. A Tabela 1 acima resume as funções que correspondentes às variáveis TEC dos veículos que entram no sistema e chegam nas aproximações 1 (Fase A) e 2 (Fase B).

Tabela 2 - Resultados do *Input Analyzer*

Aprox.	Tipo	Faixa	Distribuição	Expressão	p-value
1	Moto	D	 Exponencial	1.5 + EXPO(0.832)	0.0786
		E	 Exponencial	1.5 + EXPO(0.956)	0.0204
	Carro	D	 Triangular	TRIA(1.5, 3, 4.5)	0.213
		E	 Beta	0.5 + 4.5 * BETA(1.76, 2.66)	0.0148
	Ônibus /Caminhão	D/E	 Exponencial	1.5 + EXPO(1.63)	0.036
	Moto	D/E	 Exponencial	1.5 + EXPO(0.915)	0.226
2	Carro	D/E	 Erlang	1.5 + ERLA(0.798, 2)	0.0916
	Ônibus /Caminhão	D/E	 Weibull	2.5 + WEIB(1.89, 1.24)	0.172

Outro dado coletado foi o tempo que cada veículo leva para cruzar o semáforo ao chegar à faixa de retenção. Esta informação define o tempo que cada veículo “ocupa” o semáforo. Ejzenberg (2005) considera este tempo em média como 2 s/veículo/faixa de rolamento. Porém, percebe-se que este tempo varia muito em função do condutor, tipo de veículo e período do dia.

De posse dos dados, foi utilizada a ferramenta *Input Analyzer* para determinação da distribuição que melhor se adequa para cada situação. A Tabela 2 acima apresenta os resultados encontrados. Para validação dos dados foi verificado a distribuição que apresentou menor erro quadrático médio e se o p-valor (*p-value*) era maior do que 0.005 (conforme o teste Chi-Quadrado realizado pela ferramenta). Nota-se na Tabela 2 que para ônibus/caminhão da aproximação 1 bem como moto, carro e ônibus/caminhão da aproximação 2 foi encontrado a mesma distribuição tanto para a faixa da direita (D) quanto para a faixa da esquerda (E). Isto se deu ao fato da quantidade de dados ter sido insuficiente para a análise individual, ou seja, os valores do *p-value* indicavam rejeição da hipótese (< 0.005). Logo, juntou-se os dados obtidos para cada situação, e analisou-se o sistema como um todo para obtenção de melhores resultados.

3.2. Implementação do Modelo

A segunda fase deste trabalho, implementação, consistiu na modelagem do sistema estudado através do software ARENA®. Nesta ferramenta a modelagem é feita visualmente com objetos orientados à simulação. Na Figura 4 tem-se o resultado. Para o ciclo de operação do semáforo basicamente foram utilizados os módulos *Create* e *Process*. O primeiro é responsável pela criação de entidades no modelo, neste caso a entidade tempo de ciclo, em um intervalo de tempo igual 106; ou seja, a cada 106 s um ciclo de temporização do semáforo irá percorrer os módulos “Estagio 1 AA e VB”, “Estagio 2 VA e VrB”, “Estagio 3 VA e AB” e “Estagio 4 VrA e VB”, nesta ordem, referentes aos atrasos de tempo do estágio 2, 3, 4, 1 respectivamente do ciclo semaforico mostrado no diagrama de tempo (Figura 3) na seção anterior.

Assim, a simulação inicia com fase A em amarelo e a fase B em vermelho; em seguida é liberada a fase B (sinal verde) enquanto a vermelha é bloqueada (sinal vermelho). Depois tem-se fase B em amarelo e A vermelho. E por fim, a fase A ganha o direito de passagem enquanto a B é bloqueada. O ciclo é repetido toda vez que essa entidade entra no sistema.

Cabe ressaltar que para os processos “Estagio 2 VA e VrB” e “Estagio 4 VrA e VB”, utilizou-se o recurso *Submodel* (Submodelo), que é muito útil para simplificação de lógica, pois além do módulo *Process*, outros foram utilizados na lógica tais como: *Assign*, *Delay*, *Separate* e *Dispose*. Em ambos os processos é definido a capacidade de atendimento do semáforo, ou seja, quando sinal está liberado para via B (“Estágio 2”), tem-se os recursos “Fase BD” e “Fase BE” configurados com valor igual a 1 (um) através do módulo *Assign*, significando que somente um veículo por vez atravessa o cruzamento pelas faixas da direita e da esquerda respectivamente. Quando o tempo de verde da fase B acaba, estes recursos são zerados por outro *Assign*. O mesmo procedimento ocorre para a fase A (“Estágio 4”), só que agora os recursos são “Fase AD” e Fase AE” para faixa da direita e esquerda respectivamente.

Com relação a chegada de veículos nas aproximação 1 e 2, os módulos utilizados foram *Create*, *Assign* e *Decide*. Como observa-se na Figura 4, tanto para a lógica da aproximação 1 quanto para a 2 foram definidos 3 módulos *Create*, um para cada tipo de veículo, conforme explicado anteriormente. Esses módulos foram configurados de acordo com as distribuições de TEC encontrada na análise de dados (Tabela 1), para gerar as entidades carro, moto, ônibus/caminhão. Os módulos *Assign* foram utilizados para atribuir uma característica as entidades, onde grava o momento que a mesma entra no sistema (*TNOW*).

Além do mais, os módulos *Decide*, utilizados nessa lógica, teve o intuito de proporcionar um maior realismo ao modelo; cuja função, é distribuir os veículos entre as faixas de rolamento da esquerda e direita. Ou seja, durante a coleta de dados, a contagem veicular deu-se por faixa; por exemplo, para o total de 1.106 carros que cruzaram a aproximação 2, 453 fizeram a travessia pela faixa da esquerda (41%), e o restante pela faixa da direita. A Tabela 3 adiante resume os percentuais de veículos por faixa.

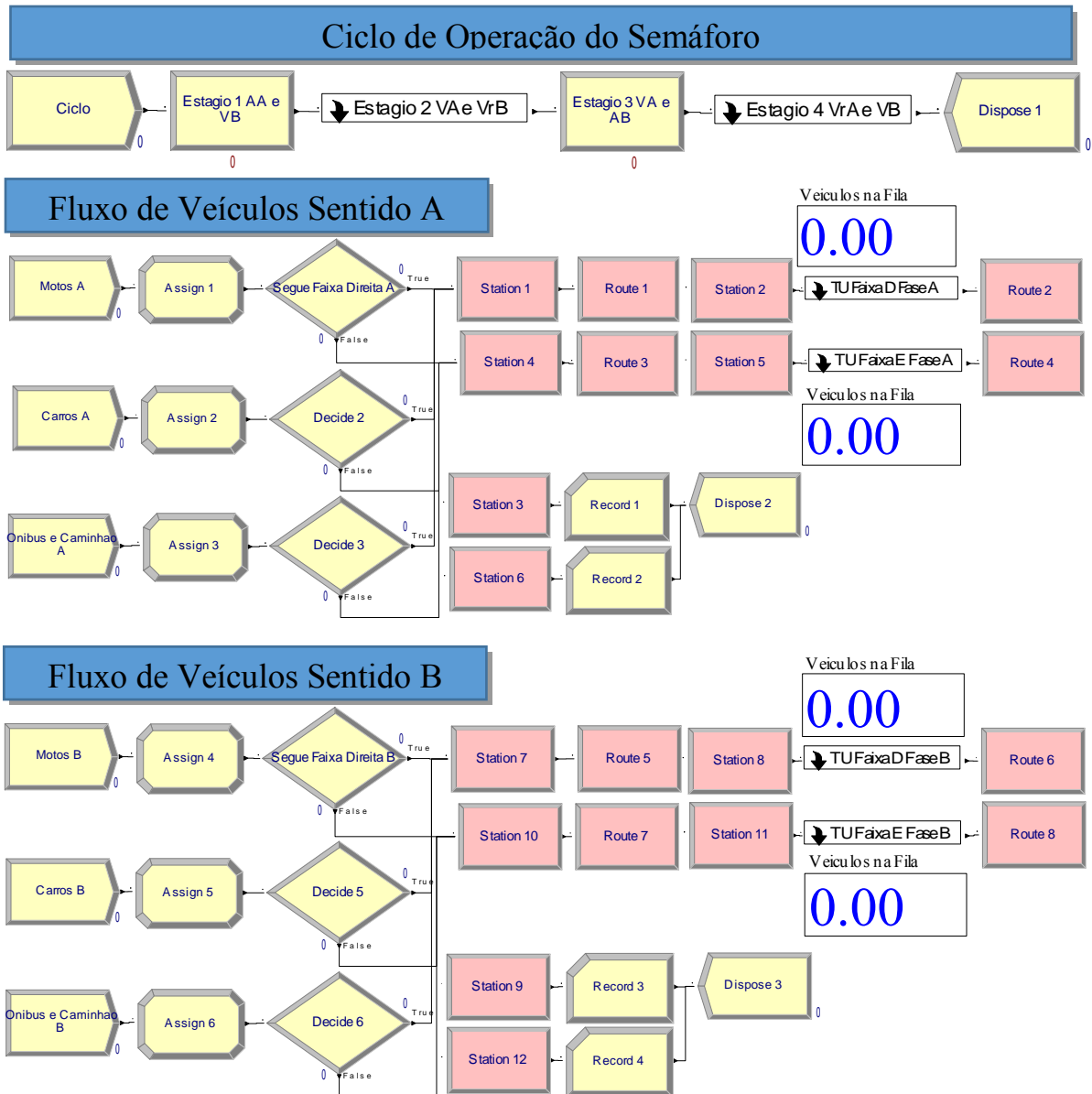


Figura 4 - Representação Computacional do Modelo de Simulação

As vias foram modeladas através do módulo *Station* (Estação). Por exemplo, as estações 1, 2 e 3 representam a faixa da direita da aproximação 1 onde: a estação 1 é ponto de entrada do elemento na via, a estação 2 é o ponto de interseção do cruzamento onde a fila de veículos é formada; e a estação 3 é ponto de saída. As estações 4, 5 e 6 representam a faixa da esquerda.

Tabela 3 - Percentual de Veículos por Faixa de Rolamento

Aprox.	Tipo	% Faixa Direita	% Faixa Esquerda
1	Moto	26	74
	Carro	47	53
	Ônibus/Caminhão	82	18
2	Moto	85	15
	Carro	59	41
	Ônibus/Caminhão	74	26

Do mesmo modo acontece com a aproximação 2: estações 7, 8 e 9 para faixa da direita e 10, 11 e 12 para esquerda. Os veículos se deslocam de um ponto a outro através dos módulos

Route. Com relação aos submodelos “TU Faixa D Fase A”, “TU Faixa E Fase A”, “TU Faixa D Fase B” e “TU Faixa E Fase B”, tem-se a lógica para fazer com que o veículo “ocupe” o semáforo durante o tempo que o veículo leva para fazer a travessia na interseção, antes de seguir em frente. Para isso, foram utilizados os módulos *Seize*, *Delay* e *Release*. O primeiro faz com que as entidades solicitem os recursos do semáforo definidos no ciclo de operação; já o segundo define o atraso que cada veículo terá conforme as distribuições da Tabela 2. Em seguida o *Release*, tem a função de liberar o recurso após ter sido utilizado.

Com relação a visualização do processo de simulação, o ARENA® oferece uma ótima interface para o usuário trabalhar com animações em modelagens. Para o projeto em questão utilizou-se recursos oferecidos pelo próprio software. A Figura 5 ilustra a interseção em estudo de forma gráfica. Outros recursos foram implementados, porém não serão apresentados os processos de desenvolvimento devido à complexidade e extensão.

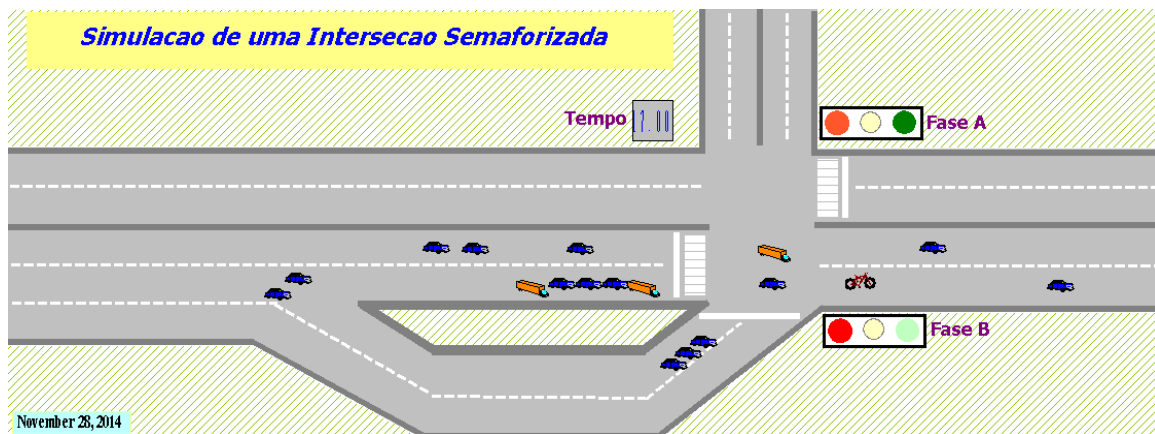


Figura 5 - Representação Gráfica do Modelo

3.3. Resultados e Análise de Cenários

A terceira fase do projeto, validação dos resultados do modelo, é uma etapa muito importante em estudo de simulação, cujo objetivo é buscar a comprovação da veracidade dos resultados alcançados a partir da simulação do processo. Neste trabalho, a metodologia utilizada foi através da comparação dos resultados da simulação com os dados reais, mediante observação *in loco* e pelas filmagens realizadas. A Tabela 4 mostra os resultados da simulação.

Tabela 4 - Resultados da Simulação

Fila	Aprox.	Tempo de Espera (min)		Tamanho da Fila	
		Média	Máximo	Média	Máximo
Faixa da Direita	1	10,86	27,33	195	357
	2	9,47	23,97	41	163
Faixa da Esquerda	1	3,85	13,77	78	238
	2	0,85	5,07	2	18

O tempo de simulação foi de 180 *min* (período dos vídeos), sendo replicado 30 (trinta) vezes e os resultados correspondem às médias das réplicas. Durante a análise dos dados, verificou-se que o fluxo total de veículos é de aproximadamente 8.000 no período estudado; e observou-se que a quantidade de veículos que saíram no sistema simulado foi 7.522 veículos.

Para os resultados das replicações, primeiramente foi realizado o cálculo do intervalo de confiança da variável quantidade de veículos que saíram do sistema, utilizando o *Output Analyzer*. Foi estabelecido como meta *h* (semi-intervalo de confiança) menor que 2% da média

amostral (7.522 veículos). Para um nível de confiança de 99% tem-se que a partir de 4 replicações a meta é atingida (conforme Figura 6). Dessa forma, escolheu-se as 30 replicações por apresentar resultados acima das expectativas dos critérios adotados.

Com relação a variável tempo médio de espera dos veículos nas filas para cada faixa de rolamento das duas aproximações analisadas, pode-se observar em campo que os resultados apresentados estão coerentes com a realidade. Os veículos esperam em média 10,86 min na faixa da direita da aproximação 1 para efetuar a travessia, assim como 9,47 min são necessários em média para os veículos executarem o retorno através da aproximação 2 pela faixa da direita. Do mesmo modo, constatou-se a quantidade média de veículos nas filas.

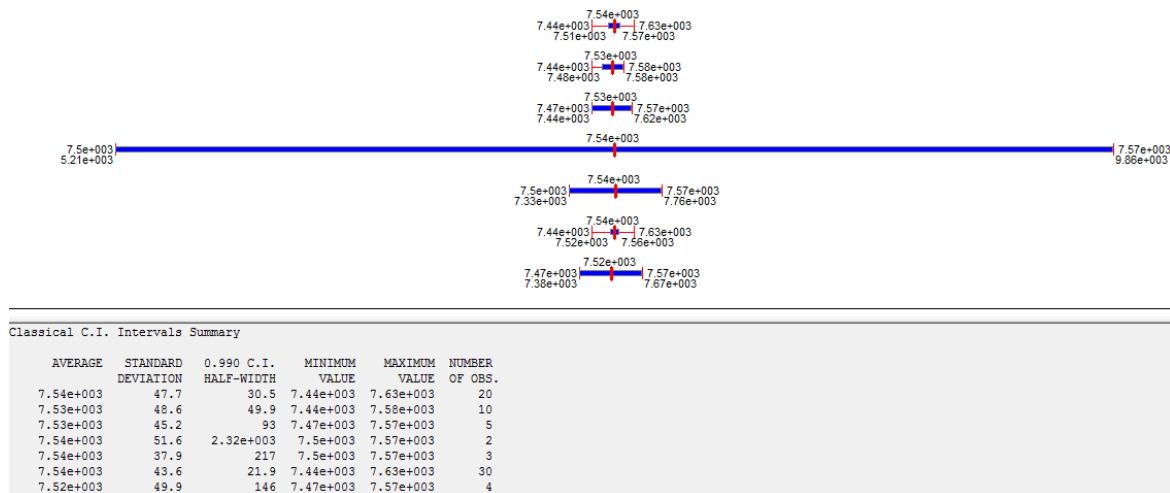


Figura 6 - Resultados do Intervalo de Confiança no Output Analyzer

Para verificar a aplicabilidade do modelo, foram criados alguns cenários, com o objetivo de identificar a melhor configuração do tempo verde, vermelho e amarelo que garantam maior fluidez no trânsito das vias estudadas. Foram propostos 5 cenários conforme Tabela 5 adiante.

Tabela 5 - Cenários

CENÁRIO	CARACTERÍSTICA	CONFIGURAÇÃO SEMAFÓRICA
1	Os tempos semafóricos foram reprogramados de acordo com Método de Observação de Campo [EJZENBERG 2005]	Verde fase A (Aprox.1) = 91s Verde fase B (Aprox.2) = 23s
2	Os tempos foram baseados no cenário 1 e no modelo real.	Verde fase A (Aprox.1) = 80s Verde fase B (Aprox.2) = 23s
3	Os tempos foram baseados no cenário 1 e no modelo real.	Verde fase A (Aprox.1) = 91s Verde fase B (Aprox.2) = 20s
4	Acréscimo de 10% nos novos tempos recalculados no cenário 1.	Verde fase A (Aprox.1) = 99s Verde fase B (Aprox.2) = 25s
5	Acréscimo de 20% nos novos tempos recalculados no cenário 1.	Verde fase A (Aprox.1) = 109s Verde fase B (Aprox.2) = 22s

A simulação foi executada para cada cenário com 30 replicações, porém com os novos valores de tempo. O gráfico da Figura 7(a) apresenta os resultados obtidos, para o tempo médio de espera de um veículo na fila. Cabe ressaltar que os tempos de amarelos permaneceram 3 s. Pode-se observar que os cenários com melhores resultados foram o 1, 4 e 5; onde tem-se uma redução nesta variável para as filas mais críticas (ou seja, as faixas da direita da aproximação 1 e 2) quando comparado com os resultados obtidos na simulação com os dados reais.

Para a faixa da direita na aproximação 1 o tempo médio de espera caiu de 10,86 para 8,99 min (redução de 16%), enquanto que na faixa da direita da aproximação 2 esse tempo era de 9,47 e passou para 8,54 (melhoria de 10%) – cenário 1. No cenário 4, os tempos médios de espera foram de 9,69 e 8,04 min (redução de 9,2% e 15 %) para as faixas da direita 1 e 2 respectivamente. Já no cenário 5 esses tempos caíram para 9,07 e 7,77 min respectivamente, ou

seja, uma redução de 15% e 17% nesta ordem. Já no cenário 3 aconteceu o inverso do cenário 2, ou seja, melhorou-se o tempo médio de espera na faixa da direita da aproximação 1 (redução de 40%), porém piorou na aproximação 2 (aumento de 43%); o que também já era esperado, uma vez que neste caso alterou-se apenas o tempo de verde da fase A.

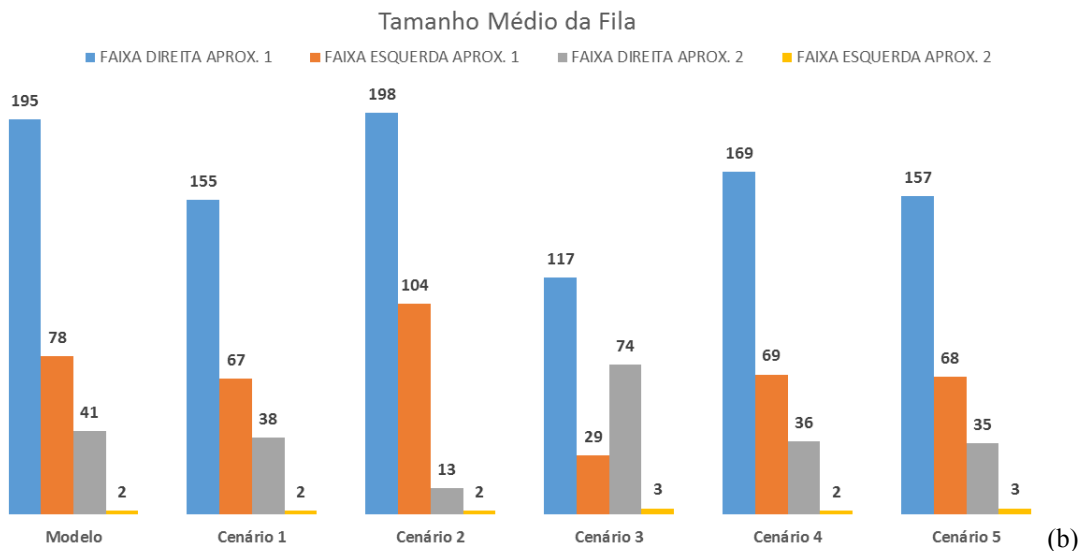
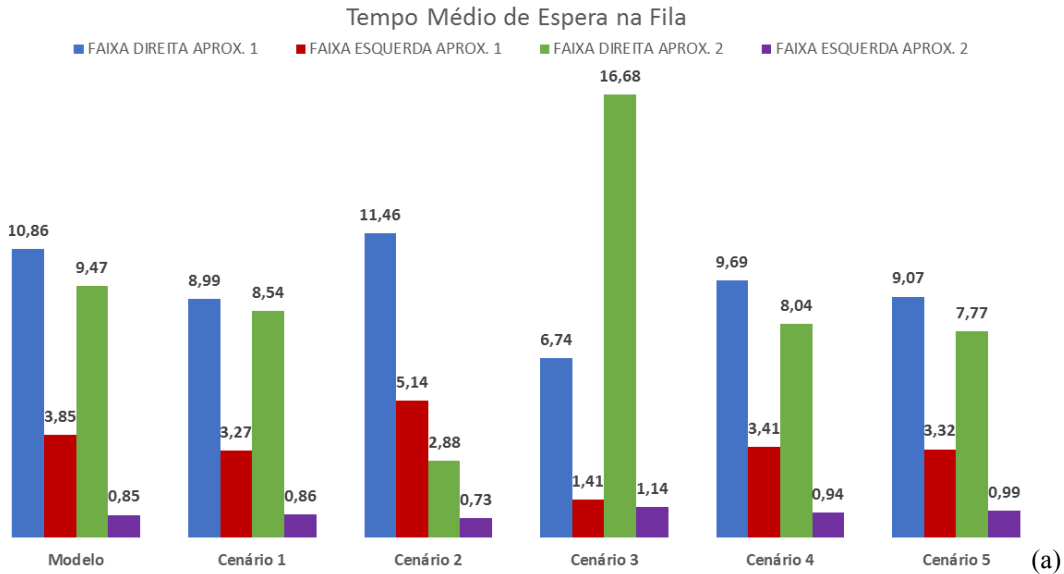


Figura 7 - Gráfico de Resultados: (a) tempo médio de espera nas filas; (b) tamanho médio das filas

Na Figura 7(b) é apresentado os resultados referente a quantidade média de veículos esperando nas filas. Os melhores resultados encontram-se nos cenários 1, 4 e 5, pois o tamanho da fila é claramente impactada pelo tempo de espera. Por exemplo, no cenário 1, o tamanho médio da fila na faixa da direita da aproximação 1 caiu de 195 para 155 veículos (redução de 20%) e no caso da aproximação 2 passou de 41 para 38 veículos (redução de 7%). Para as faixas da esquerda, na aproximação 1 tem-se 67 veículos em média esperando na fila, enquanto que na aproximação 2 permaneceu em 2 veículos.

4. Considerações Finais

O principal objetivo deste trabalho consistiu verificar a aplicabilidade de modelagem e simulação computacional em sistemas de trânsito, para determinação de tempos ótimos de

semáforos. Deste modo, a elaboração do estudo possibilitou o aprofundamento teórico e prático dos aspectos relativos ao controle de tráfego urbano, principalmente em cruzamentos, onde são os trechos mais críticos de uma malha viária, devido aos fluxos conflitantes.

O estudo prático deste trabalho se deu em um cruzamento isolado, onde os resultados da simulação mostram que, para o horário de pico, a estratégia de controle atual apresenta dificuldades, visto que os tempos de espera médio nas filas são relativamente altos. Conforme verificado, o fluxo veicular está saturado nas vias mais críticas. Desta forma, pode-se observar na análise de cenário que outras configurações de tempo proporcionam melhor fluidez no trânsito, como nos cenários 1, 4 e 5, onde houve redução no tempo de espera e nos tamanhos das filas.

As propostas sugeridas na análise de cenários apresentam melhorias. Contudo, é necessário que o modelo seja melhorado e testado em outros cenários. Outra sugestão é expandir o modelo desenvolvido para uma malha viária; deste modo, permitindo estudos como implementação de onda verde e logísticas no transporte de cargas, por exemplo, para atender uma demanda. Além disso, pode-se integrar técnicas de otimização ao modelo, para se determinar a configuração de tempos ótimas no controle semaforico.

Fica como sugestão para as autoridades responsáveis pelo trânsito, a importância de se estudar os cruzamentos, identificar os horários de pico e dimensionar os tempos das fases de forma a obterem os melhores resultados. Assim, para a realização dessa tarefa, os gestores de trânsito podem se valer de softwares de simulação como o utilizado nesse trabalho.

Referências

- ABD-FATH, A.-Y.; YUSSUF, R. M.; AZIZ, F. A.; ZULKIFLI, N. **Simulation of “Time-based” Versus “Sensor-based” Traffic light System**. Communication Software and Networks (ICCSN), 2011 IEEE 3rd International Conference on vol., no, pp.789,792, 27-29, May 2011.
- BRASIL. Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN). **Volume V do Manual Brasileiro de Sinalização**. Versão Preliminar, Janeiro de 2012.
- BAPTISTA, R. C. T.; RANGEL, J. J. de A. **Simulação a Eventos Discretos de uma Via Semaforizada com Controle Automatizado em Tempo Real**. Revista Produção Online, Florianópolis, jan./mar. 2013.
- CAMPOS, R. L. B. L. **Regulagem em Tempo-Real de um Sistema Integrado de Semáforos: uma Aplicação de Redes Neurais Recorrentes e Controle Adaptativo**. 188 f. Dissertação (Mestrado em Gestão do Conhecimento e Tecnologia da Informação). Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2006.
- EJZENBERG, S. **Reprogramação de Semáforos: Método de Observação de Campos**. São Paulo, 2005.
- LUNA, M. S. **Sobre o Fluxo de Saturação: Conceituação, Aplicação, Determinação e Variação**. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.
- MONTALVÃO, E. H. R. **Simulação de uma Rotatória: Análise Crítica e Desempenho**. Em, XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Bento Gonçalves-RS, 30/08 a 03/09 de 2010.
- MUNIZ, L. R.; GUIMARÃES, I. F. G.; CAMPOS, M. S. **Aplicação da Simulação Computacional para Análise do Tráfego no Cruzamento Central com Semáforo da Cidade Histórica de Mariana**. Em, XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Salvador, BA, Brasil, 06 a 09 de outubro de 2009.
- OLIVEIRA, M. B. W. de. **Otimização de Tempos Semafóricos via Múltiplas Redes Neurais**. 94f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação). Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2013.
- SALIMIFARD, K; ANSARI, M. **Modeling and Simulation of Urban Traffic Signal**. International Journal of Modeling and Optimization, Vol. 3, No. 2, April 2013.
- SOLON, A. S. **Aplicação da Logística Urbana na Modelagem e Simulação de Corredores do Transporte Público por Ônibus**. 118f. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.
- ZHANG, Q.; JIANG, H. **A Research on Micro Simulation of Signalized Intersection Based on Arena**. In, Proceedings of the Third International Symposium on Computer Science and Computational Technology (ISCSCCT '10) Jiaozuo, P. R. China, 14-15, August 2010, pp. 204-207.