



UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Meriele Rodrigues Ferraz

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA O CONTROLE  
SEMAFÓRICO: ANÁLISE DE UMA INTERSEÇÃO SEMAFORIZADA  
NA CIDADE DE PETROLINA – PE.**

Juazeiro – BA

2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Meriele Rodrigues Ferraz

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA O CONTROLE  
SEMAFÓRICO: ANÁLISE DE UMA INTERSEÇÃO SEMAFORIZADA  
NA CIDADE DE PETROLINA – PE.**

Trabalho apresentado à Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF, Campus Juazeiro – BA, como requisito para obtenção do título de Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Rodrigues de Lima Júnior

Juazeiro – BA

2012

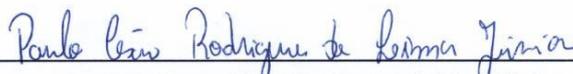
UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

FOLHA DE APROVAÇÃO  
PARA O TFC

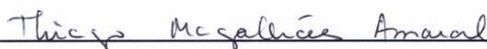
Meriele Rodrigues Ferraz

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA O CONTROLE SEMAFÓRICO: ANÁLISE  
DE UMA INTERSEÇÃO SEMAFORIZADA NA CIDADE DE PETROLINA – PE.

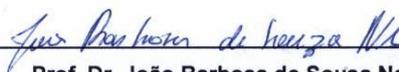
Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito para obtenção do  
título de Engenheira de Produção pela Universidade Federal do Vale do São  
Francisco.



Prof. Dr. Paulo César Rodrigues de Lima Júnior



Prof. MSc. Thiago Magalhães Amaral



Prof. Dr. João Barbosa de Sousa Neto

Aprovado pelo Colegiado de Engenharia de Produção em 29/10/2012

	Ferraz, Meriele Rodrigues.
F381s	Simulação computacional para o controle semafórico: análise de uma interseção semaforizada na cidade de Petrolina-PE / Meriele Rodrigues Ferraz. -- Juazeiro, 2012.
	xiii, 67 f. : il. ; 29 cm.
	Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro-BA, 2012.
	Orientador: Prof. Dr. Paulo César Rodrigues de Lima Júnior.
	Referências. 1. Simulação computacional. 2. Arena. 3. Semáforo. I. Título. II. Lima Júnior, Paulo César Rodrigues de. III. Universidade Federal do Vale do São Francisco
	CDD 003.3

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Integrado de Biblioteca SIBI/UNIVASF  
Bibliotecário: Renato Marques Alves

Este trabalho é dedicado aos meus pais, meus maiores incentivadores, aos amigos que me auxiliaram direta ou indiretamente, aos meus colegas de sala e demais pessoas que colaboraram para concretização deste trabalho, que é o início da minha caminhada ao meu progresso profissional.

*“Somos o que repetidamente fazemos. A excelência, portanto, não é um feito, mas um hábito”.*

*Aristóteles.*

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus por sempre me mostrar um caminho a seguir, por me mostrar que a determinação é sempre compensada, por ter me dado pais maravilhosos.

Agradecimento especialmente à minha família, por todo o esforço e empenho do meu pai, por sempre me dizer que é pela educação que vencemos, agradeço à minha mãe por ser uma pessoa em quem eu possa me espelhar, por apoiar as minhas decisões.

Agradeço aos meus professores que contribuíram para meu aprendizado durante este período na universidade.

Aos meus amigos agradeço à compreensão pela ausência em muitos momentos, agradeço aos amigos que fiz (Lai, Raquel, Raoni, Mateus, Bruno, Helder, Dimas, Naldo) pelo companheirismo nas horas de dificuldades, dos diversos trabalhos em equipe, em provas e etc.

Agradeço a meu orientador Professor Dr. Paulo César, que por mais atarefado que estivesse sempre me ajudou nas dúvidas, nas correções, agradeço até as chamadas de atenção nos momentos em que fiquei dispersa.

Agradeço a Jesse Nery Filho, por me apoiar em todas as horas que precisei, pelas dicas dadas, pelo seu carinho e compreensão.

## Resumo

Os grandes centros urbanos possuem um trânsito intenso e com o desenvolvimento das cidades tais circunstâncias tendem a piorar, quando medidas corretivas não são tomadas. Os congestionamentos fazem parte da rotina de praticamente todas as capitais e cidades médias do país. Petrolina – PE é considerada um polo de ascensão econômica e sua frota de veículos emplacados cresceu 110,65% nos últimos seis anos. Dessa forma, esta monografia tem o intuito de estudar o fluxo de veículos em uma interseção semaforizada do centro da cidade, localizada na Av. Guararapes com a Av. Joaquim Nabuco. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo computacional cuja finalidade foi de avaliar e propor melhorias para o fluxo de veículos. Para efetuar o estudo foi utilizada a simulação computacional como ferramenta de análise e com o *software* Arena 13.9 foi executado o modelo criado. A metodologia seguida foi a recomendada pela literatura. Com os resultados obtidos da simulação, propostas de cenários foram feitas, e as mudanças ocorreram nos tempos de sinal verde e vermelho dos semáforos, pois, com essas alterações, as variáveis estudadas tiveram significativas reduções em seus valores. O resultado disso traduz-se em melhorias para o fluxo dos veículos na interseção. As alterações propostas por um dos cenários, que teve melhores resultados, teriam um custo baixo para o caso de uma possível implementação, já que uma das mudanças seria na programação do tempo de ciclo dos semáforos. No entanto, vale destacar que o cenário tido como “ótimo” não pode ser considerado para longo prazo, tendo em vista o aspecto de crescimento contínuo da cidade, e, por isto, há necessidade de um estudo mais aprofundado sobre as questões do tráfego nas interseções semaforizadas.

*Palavras chave: simulação computacional, Arena, interseção semaforizada.*

## Abstract

Large urban centers have heavy traffic and due to the growth of cities, such circumstances tend to get even worse if preventive measures are not taken. Traffic jams is a reality faced daily in almost every capital and medium-sized cities in the country. Petrolina-PE is considered to be a region of economic rise, the fleet of licensed Automobiles grew 110.65% in the last six years. Thereby, this monograph aims to study the flow of vehicles at a traffic light intersection between Nabuco and Guararapes avenues. The aim of this study was to develop a computational model whose purpose was to evaluate and propose improvements to the traffic flow. To perform the study, it was used computer simulation as an analysis tool and the software Arena 13.9 was used to run the created model. The followed methodology was recommended in the literature. With the acquired results from the simulation, scenarios proposals were made and during red and green light times some changes happened. As a result, the studied variables values had a significant reduction. In other words, that represents a progress in traffic flow. The changes proposed by one of the scenarios that had the best results, would have a low cost in case of a possible implementation, since there would be a timing change in the traffic lights cycle. However, it may be worth noting that the scenario considered "great" might not be in this position for a long time, considering the aspect of constant growth of the city, therefore, there is a need for further study on traffic flow issues at traffic light intersections.

*Keywords: computer simulation, Arena, traffic light intersection.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Representação simplificada do processo de modelagem.....	28
Figura 2: Fases de um estudo de Pesquisa Operacional .....	30
Figura 3: O processo de simulação de sistemas .....	37
Figura 4: Eventos e fluxograma.....	40
Figura 5: Módulos do <i>template basic process</i> Arena .....	41
Figura 6: Vista aérea da interseção semaforizada.....	48
Figura 7: Interseção semaforizada com as indicações das vias .....	49
Figura 8: Área do Colégio Maria Auxiliadora .....	51
Figura 9: Visão sobre o trânsito ângulo em direção ao final das vias .....	52
Figura 10: Visão sobre o trânsito ângulo em direção ao semáforo .....	52
Figura 11: Fluxograma do sistema de fluxo de veículos na interseção semaforizada .....	58
Figura 12: Fluxograma do tempo de ciclo do semáforo .....	59
Figura 13: Tempo de ciclo do cenário real .....	62
Figura 14: Tempo de ciclo do cenário 01 .....	64
Figura 15: Tempo de ciclo do cenário 02 .....	65
Figura 16: Interseção modificada para o cenário 02 .....	66
Figura 17: Tempo de ciclo do cenário 03 .....	67
Figura 18: Tempo de ciclo do cenário 04 .....	68
Figura 19: Interseção modificada para o cenário 04 .....	70
Figura 20: Modelo computacional da interseção semaforizada simulado na Arena 13.9 .....	79
Figura 21: Imagem do Google maps da interseção semaforizada representada por um x ....	79
Figura 22: Software contador dos tempos .....	80

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1: Distribuição estatística das chegadas.....</b>	<b>54</b>
<b>Tabela 2: Distribuição estatística dos tempos de utilização das vias .....</b>	<b>54</b>
<b>Tabela 3: Distribuição estatística dos tempos de atravessamento.....</b>	<b>55</b>
<b>Tabela 4: Porcentagem de destino da Via - Sinal 01 .....</b>	<b>55</b>
<b>Tabela 5: Porcentagem de destino da Via 1 - Sinal 02.....</b>	<b>56</b>
<b>Tabela 6: Porcentagem de destino da Via - Sinal 03 .....</b>	<b>56</b>
<b>Tabela 7: Validação do modelo por número de veículos no sistema .....</b>	<b>59</b>
<b>Tabela 8: Quantitativos das variáveis do cenário real.....</b>	<b>63</b>
<b>Tabela 9: Quantitativos das variáveis do cenário 01 .....</b>	<b>64</b>
<b>Tabela 10: Quantitativos das variáveis do cenário 02 .....</b>	<b>66</b>
<b>Tabela 11: Quantitativos das variáveis do cenário 03 .....</b>	<b>67</b>
<b>Tabela 12: Quantitativos das variáveis do cenário 04 .....</b>	<b>69</b>
<b>Tabela 13: Percentuais comparativos entre os cenários criados.....</b>	<b>71</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEPRO – Associação Brasileira de Engenharia de Produção  
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
CPM – *Critical Path Method*  
CTB – Código de Trânsito Brasileiro  
DETRAN – Departamento de trânsito  
EPTTC – Empresa Petrolinense de Trânsito e Transporte Coletivo  
FHWA - *Federal Highway Administration*  
GPSS – *General Purpose Simulation System*  
GUI – *Graphical User Interface*  
IBM – *International Business Machines*  
ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica  
MIT – *Massachusetts Institute of Technology*  
MS – *Management Science*  
NO – *Number out*  
NWQA – *Number waiting queue average*  
NWQM – *Number waiting queue maximum*  
ORSA – *Operations Research Society of America*  
PC – *Personal Computer*  
PERT – *Program Evaluation and Review Technique*  
PO – Pesquisa Operacional  
SCOOP – *Scientific Computation of Optimal Programs*  
SOBRAPO – Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional  
TFC – Trabalho final de curso  
TTA – *Total time average*  
TTM – *Total time maximum*  
UNIVASF – Universidade Federal do Vale do São Francisco  
UPE – Universidade de Pernambuco  
WTA – *Waiting time queue average*  
WTM – *Waiting time maximum*  
WTQA – *Waiting time queue average*  
WTQM – *Waiting time queue maximum*

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>V</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VII</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	<b>X</b>
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 Considerações iniciais.....	14
1.2 Definição do problema.....	17
1.3 Justificativa.....	18
1.4 Objetivos.....	20
1.4.1 Objetivo Geral.....	20
1.4.2 Objetivos Específicos .....	20
1.5 Estrutura do Trabalho.....	20
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>22</b>
2.1 Trânsito Urbano.....	22
2.2 Engenharia de Tráfego.....	22
2.3 Sinalização semaforizada.....	24
2.4 Pesquisa Operacional.....	25

2.5	Simulação computacional.....	31
2.6	Simulação aplicada.....	38
2.7	Software ARENA .....	38
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA DA PESQUISA .....</b>	<b>42</b>
3.1	Natureza da pesquisa.....	42
3.2	Tipologia de pesquisa.....	43
3.3	Variáveis da Pesquisa .....	43
3.4	Delineamento da pesquisa .....	44
3.4.1	Definição do problema.....	44
3.4.2	Declaração dos objetivos .....	45
3.4.3	Coleta dos dados e Desenvolvimento do modelo.....	45
3.4.4	Verificação do modelo e validação .....	46
3.4.5	Projeto de experimento .....	46
3.4.6	Execução do modelo e avaliação do resultado .....	47
3.4.7	Documentação e apresentação.....	47
3.4.8	Implementação .....	47
<b>4</b>	<b>ESTUDO DO SISTEMA MODELADO .....</b>	<b>48</b>
4.1	Apresentação da interseção semaforizada.....	48
4.2	Coleta de dados .....	51
4.3	Formulação do modelo .....	56
4.4	Validação do modelo .....	59
<b>5</b>	<b>ANÁLISE E RESULTADOS DOS CENÁRIOS MODELADOS.....</b>	<b>61</b>
5.1	Cenário real.....	62

5.2	Cenário 01 .....	63
5.3	Cenário 02 .....	64
5.4	Cenário 03 .....	66
5.5	Cenário 04 .....	68
5.6	Comparações entre os cenários.....	70
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>73</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>75</b>
	<b>ANEXO .....</b>	<b>79</b>

# INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

O trânsito, segundo o Art. 1º do CTB (Código de Trânsito Brasileiro), é definido da seguinte forma: “Considera-se trânsito a utilização das vias por pessoas, veículos e animais, isolados ou em grupo, conduzidos ou não, para fins de circulação, parada, estacionamento e operação de carga e descarga” (BRASIL, 2008 – p. 11).

As cidades brasileiras, principalmente, as nomeadas como grandes cidades e aquelas em ascensão, têm seu trânsito bastante movimentado, com isto, o fluxo de veículos nas vias é intenso e predominante, em especial, nos momentos de pico, destacando-se os horários pela manhã, ao meio-dia e ao anoitecer, horários estes em que as pessoas costumam deslocar-se para seus locais de trabalho, escola, faculdade, residência, entre outros.

É notória a perda de tempo no trânsito brasileiro, poucas pessoas fazem a conta das perdas causadas pelo transtorno diário de ir e vir, mas a lentidão do trânsito tem um preço alto. Por um lado, há custos diretos com combustível, depreciação dos veículos e dificuldades para o transporte de carga. Mas há também os custos indiretos, como a perda de produtividade de uma pessoa que se estressa por ser obrigada a ficar parada por horas entre a casa e o trabalho ou a escola (MAIA JUNIOR, 2012).

As regras de tráfego impostas aos condutores de veículos são determinadas pela legislação de trânsito, cuja lei 9.503/97 determina que ações de trânsito de qualquer natureza nas vias terrestres do território nacional, para a circulação, regem-se pelo CTB (BRASIL, 2008).

As vias existentes são classificadas como terrestres urbanas e rurais. As vias urbanas são subdivididas em vias locais, coletoras, arteriais e de trânsito rápido. Para cada uma destas, há uma velocidade máxima associada, definida pela legislação e pela sinalização. As vias com sinalização semafórica, geralmente, são ditas como arteriais, pois possibilitam o trânsito entre as regiões da cidade, com acessibilidade às vias secundárias e locais, caracterizada por

interseções em nível. A definição para interseção, de acordo com o CTB, é todo cruzamento em nível, entroncamento ou bifurcação (BRASIL, 2008).

Partindo da concepção de que, no trânsito, há ocorrências de problemas relacionados ao fluxo do tráfego, a área do conhecimento da Pesquisa Operacional (PO) apresenta dispositivos que podem atuar de forma significativa, trazendo resultados satisfatórios na resolução destes problemas. A área de atuação é ampla e seu conceito, para autores como Arenales *et. al* (2007), está vinculado ao desenvolvimento de métodos científicos de sistemas complexos, com o intuito de prever e comparar estratégias ou decisões alternativas, cujo objetivo é dar suporte à definição de políticas e determinação de ações de forma científica.

A contribuição da PO, especificamente no que diz respeito ao fluxo do trânsito, está relacionada ao fato de que um dos campos de estudo da área é a simulação, ferramenta valiosa para resolução de problemas reais. Andrade (2004) refere-se à simulação de um sistema como a operação de um modelo que o represente, usualmente em computadores, restringindo-se as regras e condições reais estabelecidas pelo sistema.

Ainda com referência ao autor citado, o mesmo expõe, como exemplo, o estudo da sincronização de sinais de trânsito de uma via qualquer, podendo ser realizado de maneira experimental, fazendo-se ajustes sucessivos nos semáforos e verificando-se as consequências em termos de congestionamentos e acidentes. De fato, o processo não pode ser implementado na prática e um meio alternativo, para isto, é a criação de modelos que representem as situações reais. A razão que justifica tal fato é por ser impossível ou muito dispendioso observar certos processos no mundo real.

Corroborando com a ideia do autor supracitado, Prado (2003) considera que, em certos tipos de estudos de planejamento, é corriqueiro deparar-se com problemas de dimensionamento ou fluxo onde a solução é aparentemente complexa, podendo o cenário ser uma fábrica, o trânsito de uma cidade, um escritório, um porto ou uma mineração. O interesse do estudo é saber, por exemplo, qual a quantidade correta de pessoas e equipamentos; qual o melhor *layout* e o melhor roteiro de fluxo dentro do sistema que está sendo analisado, ou

seja, o desejo é que o sistema esteja balanceado e, para isto, há estudos de modelagem de sistemas.

A modelagem de sistemas abrange conceitos de teoria das filas e da simulação. Em linhas gerais, a teoria das filas tem um enfoque analítico, isto é, fórmulas matemáticas são empregadas para representar o sistema. Quanto à simulação, a mesma pode ser considerada sinonímia de simulação computacional, já que com o surgimento do computador a modelagem de filas pôde ser analisada pela ótica da simulação, a qual dispensa o uso de fórmulas matemáticas (FREITAS FILHO, 2008; PRADO, 2003).

Desta forma, a simulação computacional ganhou respaldo na modelagem de sistemas reais. O crescimento da utilização dessa ferramenta é condicionado à atual facilidade de uso e sofisticação dos ambientes de desenvolvimento de modelos computacionais (FREITAS FILHO, 2008).

Para Fitzsimmons e Fitzsimmons (2006), a simulação computacional oferece um ambiente experimental no qual se pode estudar o modelo de um sistema real e verificar como este modelo reage às mudanças. Para os mesmos autores, o sistema é entendido como uma combinação de elementos interagindo para obtenção de um fim comum.

O processo de simulação de um sistema é usado como uma ferramenta para avaliação de ideias. Com o intuito de tornar o desenvolvimento facilitado, empregam-se os recursos presentes nos *softwares*, os quais viabilizam a questão experimental e visual do modelo.

O presente trabalho parte do pressuposto de que a simulação computacional é uma ferramenta apta para o processo de desenvolvimento de um modelo capaz de configurar o funcionamento do sistema real em questão.

Serão descritos, a seguir, os procedimentos metodológicos necessários para construção do modelo computacional, sendo exposta nos próximos tópicos a definição do problema, bem como objetivos e justificativa. E, por fim, um estudo da arte sobre o tema proposto na pesquisa.

## 1.2 Definição do problema

No Brasil, a cada ano, aumenta o número de veículos novos ou usados, gerando congestionamentos mais frequentes e cada vez maiores.

Uma pesquisa feita sobre o aumento do número de carros nas ruas das grandes metrópoles (São Paulo, Rio de Janeiro, Porto Alegre e Belo Horizonte) constatou que, em um congestionamento, há cerca de 750 carros a cada quilômetro. E financeiramente, gera prejuízos econômicos ao país, pois empresas e empregados perdem dinheiro toda vez que o trânsito para. Paulo Resende, da Fundação Dom Cabral, diz que “Esse número representa em hora/salário e número de veículos, R\$ 4 bilhões de prejuízos por ano. Com esses R\$ 4 bilhões nós poderíamos construir cerca de 40 quilômetros de linhas de metrô. Mais que dinheiro, o motorista perde qualidade de vida” (G1, 2009).

Outra pesquisa mais recente, da Fundação Getúlio Vargas, coordenada pelo economista Marcos Cintra, estima que os congestionamentos vão causar prejuízo de 56 bilhões de reais para a economia paulista neste ano, o que corresponde a quase 10% do PIB da cidade (MAIA JUNIOR, 2012).

Conforme um estudo feito pela Associação Nacional dos Transportes Terrestres, nos municípios com mais de 1 milhão de habitantes, como Campinas, no interior de São Paulo, os moradores passam em média 1 hora por dia no trânsito – ou 11 dias por ano. Nem as localidades menores escapam de congestionamentos, como Bento Gonçalves, com 120.000 habitantes, possuindo 65.000 veículos, trava todos os dias nos horários de pico (MAIA JUNIOR, 2012).

De acordo com o que foi citado, pode-se verificar claramente a dificuldades que envolve o trânsito. Numa esfera de menor complexidade, existem problemas como as filas geradas em interseções semaforizadas, cujas consequências são negativas, entretanto, possuem um impacto em menor escala. Contudo, faz-se necessária uma intervenção para que haja um balanceamento no fluxo desses veículos.

Segundo dados do DETRAN-PE (2012), a cidade de Petrolina registrou um número de frota de veículos de 41.158 no ano de 2005, já no ano de 2011 o número foi de 86.700 veículos, caracterizando assim um aumento de 110,65% na frota de veículos (emplacados).

Em se tratando da cidade de Petrolina – PE, a mesma é considerada um polo de ascensão econômica, com a área urbana em crescimento, como foi mostrado numa reportagem do Diário da Região (2011). O mesmo publicou que a cidade possui 287.233 habitantes, conforme o censo 2010, e em dez anos este número corresponde a um aumento de mais de 32%, índice considerado bastante relevante se comparado com a cidade vizinha, Juazeiro – BA, que cresceu pouco mais que 12% no mesmo período.

Conforme a EPTTC (2012), o fluxo de veículos vem crescendo na cidade, com isto, há crescentes formações de filas nos semáforos. No entanto, a mesma relatou que os tempos de intervalo entre as cores de sinalização são revistos de acordo com a necessidade, ou seja, não há um planejamento para as revisões dos tempos dos sinais, elas ocorrem esporadicamente.

Com base nos dados apresentados sobre tráfego de grandes e pequenas cidades, citando também algumas características da cidade de Petrolina, este trabalho tem seu problema definido, cuja pergunta a ser respondida é: Como aplicar a simulação computacional na avaliação e proposta de melhorias para o fluxo de veículos em uma interseção semaforizada na cidade de Petrolina- PE?

Dessa forma, a situação a ser estudada caracteriza-se como um fenômeno aleatório, ou seja, trata-se de um sistema real variável, e isto implica em uma natureza probabilística, os eventos são definidos a partir de uma distribuição de probabilidades (FITZSIMMONS; FITZSIMMONS, 2006). Nesse sentido, a simulação computacional serve como ferramenta para modelagem e manipulação do sistema real, com o intuito de avaliar as informações geradas através de dados implementados em *softwares*.

### **1.3 Justificativa**

Os problemas envolvendo situações reais são passíveis de modelagem e simulação, de tal forma que o modelo imite as respostas do sistema real conforme a sucessão de eventos ocorridos ao longo do tempo (SCHRIBER, 1974 citado por FREITAS FILHO, 2008).

A resolução de problemas reais envolvendo situações de tomada de decisão, geralmente vinculada a modelos matemáticos e processados computacionalmente, faz parte da PO, subárea do conhecimento da Engenharia de Produção e, dentro dessa, há uma linha de estudo direcionada à simulação (ABEPRO, 2008), na qual abrange também estudos sobre a gestão do trânsito. Consoante Araujo (2009, p.335), “a gestão do trânsito nas grandes cidades exige estudo aprofundado de PO para conhecimento do fluxo de veículos nos horários de picos e também nas madrugadas”.

Para Gavira (2003), a simulação é uma ferramenta que permite aos engenheiros de produção desenvolver tarefas a que se propõem. É por meio dela que podem adquirir capacidade de identificar, formular e solucionar problemas ligados a várias atividades.

Tendo em vista o tema ao qual o trabalho se propõe e considerando a situação a ser simulada através de um *software*, este trabalho é compreensível e justificável segundo as razões descritas por Freitas Filho (2008), são elas: o modelo deve ser simulado por economizar tempo e recursos financeiros; pela percepção de que o comportamento do modelo a ser simulado é semelhante ao do sistema real; pelo estudo simulado admitir aos analistas detalhes importantes e também possibilitar o emprego de animações permitindo, assim, a visualização do comportamento do sistema durante a simulação.

Enfatizando o processo de simulação de um modelo, Moreira (2011, p.25) argumenta que:

Inegavelmente, os modelos apresentam algumas vantagens. A primeira delas é que se pode tirar conclusões válidas para a situação real por meio do modelo. Em segundo lugar, a experimentação com o modelo requer menos tempo e custa menos do que trabalhar com o objeto ou situação real. Finalmente, os modelos reduzem o risco associado à experimentação em situações reais.

Com base no que foi explanado, o presente estudo mostra-se relevante para a população Petrolinense, pois se trata de um trabalho voltado para a sociedade em geral, que poderá ser utilizado como base para outras pesquisas do mesmo ramo, ou então, para aplicações em outros locais com características semelhantes.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo Geral

Desenvolver um modelo computacional numa interseção semaforizada na cidade de Petrolina – PE utilizando o *software* ARENA 13.9 com a finalidade de avaliar e propor melhorias para o fluxo de veículos.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

Proposto o objetivo geral, delimitam-se alguns objetivos específicos, os quais irão nortear o processo de desenvolvimento do trabalho em questão.

- Analisar quais são as principais variáveis que compõem os processos do sistema e como elas interferem no meio em estudo;
- Modelar o sistema de tráfego em estudo, através do *software* ARENA 13.9;
- Validar o modelo criado através dos dados colhidos da realidade do sistema em questão;
- Simular o sistema real para identificação de cenários;
- Criar novos cenários e comparar os resultados gerados pelas simulações realizadas no *software*;
- Avaliar os cenários desenvolvidos e suas contribuições para o sistema real de acordo com as necessidades da região alvo.

## 1.5 Estrutura do Trabalho

A monografia foi desenvolvida em seis capítulos, o primeiro deles discorre em linhas gerais sobre o tema estudado, caracterizando o problema e justificando a importância de se estudar tal fato e expondo o objetivo da monografia.

O segundo faz menção aos temas que abrangem a pesquisa, uma abordagem da literatura sobre os conceitos envolvidos com a mesma e relata trabalhos de monografia, mestrado e doutorado relacionados à temática.

O terceiro apresenta a metodologia usada para elaboração da monografia e descreve todas as etapas que foram necessárias para a realização da pesquisa.

O quarto capítulo trata do sistema modelado, faz uma apresentação da interseção semaforizada, explana o passo a passo da coleta dos dados, algumas considerações sobre o objeto de estudo, detalha a formulação do modelo e a validação do mesmo.

O quinto capítulo mostra a forma como foram analisados os dados, detalha os resultados obtidos de cada cenário criado, e finaliza com uma comparação entre todos os cenários.

E, por fim, o sexto e último capítulo expõe as conclusões pertinentes à pesquisa e apresenta recomendações para os trabalhos futuros que envolvam a temática abordada nesta monografia.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Este capítulo é composto por uma revisão da literatura, na qual são descritos conceitos importantes a respeito do tema da pesquisa. São abordadas as características do trânsito urbano, a sua configuração, aspectos relacionados à engenharia de tráfego, uma contextualização sobre a PO e a Simulação Computacional como subárea do conhecimento da PO, relata trabalhos do meio acadêmico, com estudos na área de simulação computacional com uso do *software* Arena, e por fim, apresentação e aplicações do *software* Arena.

### **2.1 Trânsito Urbano**

O trânsito, nas palavras de Rozestraten (1988), é um conjunto de deslocamentos de pessoas e veículos nas vias públicas, em um sistema convencional de normas, que visa assegurar a integridade de seus usuários. Partindo deste conceito sobre o trânsito, tem-se a consideração sobre o deslocamento, que pode ter como sinônimo o “tráfego”, pois, de acordo com a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), o tráfego é o estudo da passagem de pedestres, animais e veículos, de natureza variada, por vias terrestres, aquáticas e aéreas, abertas ao trânsito do público.

A expansão das áreas urbanas é incentivada pelas facilidades de uso de automóveis, caracterizando assim o aumento do fluxo de veículos e, por consequência, surgimento de congestionamentos. O controle do tráfego urbano é uma das ferramentas que procura solucionar problemas ligados às cidades, principalmente os relativos aos congestionamentos (TRINDADE FILHO, 2002).

### **2.2 Engenharia de Tráfego**

A Engenharia de Tráfego é responsável pelo planejamento do projeto e da operação das vias públicas e das áreas adjacentes, assim como seu uso, para fins de transporte, sob os pontos de vista de segurança, conveniência e economia (ABNT, 1983).

De acordo com a definição de Leite (1980), a Engenharia de Tráfego trata do planejamento, projeto geométrico e operação de tráfego, com o objetivo de ter um movimento conveniente de pessoas e mercadorias, sendo de fundamental importância para seus ramos à obtenção de dados de tendências dos transportes e tráfego para toda uma região ou locais específicos de estudo.

Com base nos textos do mesmo autor, a Engenharia de Tráfego, para que haja o entendimento necessário acerca da sua atuação, consiste nos seguintes itens:

- Veículos e fatores humanos;
- Capacidade das ruas e interseções;
- Cadastro físico das vias, facilidades existentes e características geométricas recomendáveis;
- Sistema de transporte de massa;
- Volumes de tráfego;
- Parâmetros de tráfego;
- Tempo de percurso, demoras e velocidade local;
- Iluminação, entre outros.

No Brasil, as leis de trânsito estão contidas no CTB e os projetos desenvolvidos pela Engenharia de Tráfego estão sujeitos à legislação de trânsito.

O artigo 1º, parágrafo 3º, do CTB discorre sobre a responsabilidade dos órgãos e entidades componentes do Sistema Nacional de Trânsito. Os mesmos respondem no âmbito de suas respectivas competências, objetivamente, por danos causados aos cidadãos em virtude de ação, omissão ou erro na execução e manutenção de programas, projetos e serviços que garantam o exercício do direito do trânsito seguro (BRASIL, 2008).

Dessa forma, os municípios são responsáveis pelo planejamento, implantação, manutenção da sinalização semaforica para prover segurança e fluidez ao trânsito nas cidades.

## 2.3 Sinalização semaforizada

A sinalização, como ferramenta para o bom funcionamento do fluxo do trânsito nas vias, pode ser feita através de semáforos, cujo surgimento data de 1868, época em que eram operados manualmente. Em 1913, James Hoge inventou o semáforo elétrico, como hoje é conhecido, e na década de 30 começou a ser usado no Reino Unido. Este semáforo era um simples dispositivo de tempos fixos onde cada rota recebia um direito de passagem, os tempos eram pré-programados numa sequência pré-definida, mas não era observada a questão da demanda, no tráfego do cruzamento (CLOWES, 1980 citado por TRINDADE FILHO, 2002).

Os semáforos foram criados para determinar quando os motoristas têm a preferência na condução de seus veículos automotores (ARAUJO, 2009). E, em se tratando de pontos com interseções semaforizadas, o CTB determina que a sinalização deve ser respeitada para manter o fluxo do tráfego estável e organizado (BRASIL, 2008).

Conforme o texto do CTB, “a sinalização semafórica é um subsistema da sinalização viária que se compõe de indicações luminosas acionadas alternada ou intermitentemente através de sistema elétrico/eletrônico, cuja função é controlar os deslocamentos” (BRASIL, p. 242, 2008).

Para a ocorrência deste controle, segundo o CTB (BRASIL, 2008), existem dois grupos de sinalização:

- Sinalização semafórica de regulamentação: a qual tem a função de efetuar o controle do trânsito num cruzamento ou seção de via, através da indicação luminosa, alternando o direito de passagem para veículos e/ou pedestres. As características são: indicação luminosa de cores pré-estabelecidas (vermelho, amarelo e verde), agrupadas num único conjunto, dispostas verticalmente ao lado da via ou suspensa sobre ela na forma horizontal;
- Sinalização semafórica de advertência: tem a função de advertir da existência de obstáculos ou situações perigosas, devendo o condutor reduzir a velocidade e adotar medidas de precaução compatíveis com a segurança para seguir em frente. As características são: compõe-se de

uma ou duas luzes de cor amarela, cujo funcionamento é intermitente ou piscante alternado, no caso de duas indicações luminosas.

Para Setti (2002), a instalação de semáforos pode não trazer reduções de atrasos e melhoramento da segurança em uma via, pois, mesmo que instalado adequadamente, há um aumento no número de colisões traseiras em alguns casos, além disso, a instalação de semáforos pode reduzir a capacidade da interseção e aumentar os atrasos.

A implantação de semáforos em locais desnecessários ou mal projetados podem trazer problemas como (FORNACIARI, 2010):

- Aumento na frequência de acidentes;
- Atrasos excessivos o que aumenta os efeitos da poluição causada pelos veículos parados e;
- Incentivo ao desrespeito à sinalização.

## **2.4 Pesquisa Operacional**

O surgimento do termo Pesquisa Operacional (PO), de acordo com Arenales *et. al* (2007), está vinculado a uma invenção inglesa, o radar, de 1934. O termo é atribuído ao superintendente A. P. Rowe, da estação de Pesquisa Manor Bawdsey, na Inglaterra, que, em 1938 coordenava equipes para examinar a eficiência das técnicas de operações advindas de experimentos com interceptação de radar. Os mesmos descrevem a origem da PO em ordem cronológica da seguinte forma:

- Deu-se início na segunda guerra mundial, com as tentativas de resolução dos problemas da guerra, com a análise científica do uso operacional de recursos militares de maneira sistemática;
- Findada a guerra, houve uma evolução rápida na Inglaterra e nos Estados Unidos. Em 1947, foi criado um projeto (SCOOP – *Scientific Computation of Optimal Programs*) a fim de apoiar decisões de operações na força aérea americana;

- Em 1952 e 1953 foram fundadas a sociedade científica americana de PO (ORSA – *Operations Research Society of America*) e a sociedade inglesa de PO (ORS – *Operational Research Society*);
- Em 1957, realizou-se a primeira conferência internacional de PO em Oxford, na Inglaterra. Nesta conferência, constatou-se o foco de estudo por parte de cada grupo de cientista (ingleses e americanos), sendo objeto do interesse dos ingleses estudos de casos ou problemas específicos da área, e já os cientistas americanos se detiveram ao estudo de modelos e métodos matemáticos em diversos temas;
- Em 1960, a PO foi aplicada a uma variedade de problemas advindos dos setores público e privado. A partir dessa época, a PO tem sido aplicada a diversas áreas de produção e logística, incluindo indústrias de alimentação, automóveis, computadores, eletrônica, metalurgia, mineração, mísseis, móveis, papel, petróleo, telecomunicações, transportes; além de organizações de serviços (públicas e privadas), tais como: bancos, seguradoras, hospitais, bibliotecas, sistemas judiciais, agências de viagens, esportes, energia, trânsito, agências de governo etc. Nesta mesma década, era objeto de estudo em cursos de pós-graduação, mas, em 1970 foi inserida como disciplina do perfil curricular de vários cursos de graduação;
- No Brasil, seu início foi basicamente na década de 1960. Nessa época, aconteceu o primeiro simpósio brasileiro de PO, em 1968, no ITA (Instituto Tecnológico de Aeronáutica), na cidade de São José dos Campos – SP. Posteriormente, foi criada a SOBRAPO (Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional) que há mais de 25 anos publica o periódico científico *Pesquisa Operacional*.

Confirmando a informação de Arenales *et al* (2007), Moreira (2011) aponta

que:

Como disciplina de estudos acadêmicos, a Pesquisa Operacional teve seu primeiro currículo formalmente estabelecido em 1948, quando o Massachusetts Institute of Technology (MIT) iniciou um curso sobre as aplicações da Pesquisa Operacional em áreas não militares (...). A partir da década de 1950, outras universidades americanas seguiram os passos do MIT e criaram os seus cursos de Pesquisa Operacional. Também no Brasil, em escolas de Engenharia, Administração de

Empresas, Contabilidade e Economia, a Pesquisa Operacional ganhou seu próprio espaço, principalmente a partir da década de 1960 (MOREIRA, 2011, p. 24).

Com o nascimento desse novo campo do conhecimento, os profissionais de diferentes áreas puderam se apoiar nas técnicas e métodos científicos qualitativos, com o objetivo de facilitar o processo de análise de decisão, uma vez que, subsidiada por modelos de experimentação, possibilita a tomada de decisão bem mais avaliada e testada antes de efetivamente ser implementada. Complementando este pensamento, Andrade (2004, p. 1) julga que “por si sós, a economia de recursos e a experiência adquirida com a experimentação justificam o conhecimento e a utilização da PO como instrumento de gerência”.

Neste contexto, a PO tem seu conceito voltado à tomada de decisões, consiste na descrição de um sistema organizado com auxílio de um modelo, e, com a experimentação do mesmo, busca-se descobrir a melhor maneira de operar o sistema (SILVA et al, 2007).

Conforme as palavras de Andrade (2004), a PO é uma metodologia administrativa cuja estrutura teórica é alicerçada em quatro ciências fundamentais para o processo de preparação, análise e tomada de decisão: a economia, a matemática, a estatística e a informática. Ainda complementa que, a depender da ênfase que se queira abordar, a área detém três focos distintos de abordagens, são elas: a aplicabilidade gerencial; métodos matemáticos e estatísticos para a obtenção de soluções e; construção de modelos de algoritmos computacionais.

A visão de Lachtermacher (2004) sobre a PO tem o foco direcionado para a *Management Science* (MS), a qual é denominada como área de estudos para resolução de problemas de negócio, utilizando computadores, estatísticas e matemática. O autor considera a MS como uma subárea de PO, com objetivos inter-relacionados: converter dados em informações significativas; apoiar o processo de tomada de decisão de formas transferíveis e independentes e; criar sistemas computacionais úteis para os usuários não técnicos.

Vale salientar que o avanço da PO com relação às técnicas mais comuns deve-se, em particular, ao desenvolvimento dos computadores digitais, devido à velocidade de processamento e à capacidade de armazenamento e recuperação das informações, além do fato que a utilização intensiva de modelos em análise

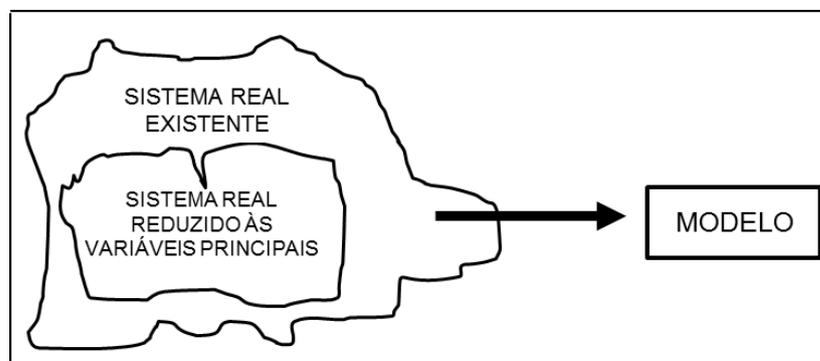
de decisões é devida à disseminação dos microcomputadores, proporcionando, assim, oportunidades para os profissionais da PO no desenvolvimento de modelos mais versáteis, rápidos e, sobretudo, interativos, que permitem maior participação do pesquisador no desenvolver dos cálculos (ANDRADE, 2004).

Tendo em vista a contextualização a respeito da PO, a mesma abrange conteúdos referentes à: programação linear, teoria das filas, problemas de transporte, riscos e incertezas, simulação, programação dinâmica, teoria dos jogos e outros.

A natureza da PO consiste em um estudo apoiado na construção de um modelo para um sistema real, o mesmo contribui como instrumento de análise e compreensão do comportamento do sistema, objetivando apresentar o desempenho esperado (ANDRADE, 2004).

Andrade (2004) reforça que o sistema modelado pode ser a representação de uma situação real ou de algo ainda em desenvolvimento. Desta forma, a finalidade para algo que já exista é o aprimoramento através da análise e verificação do desempenho; com relação à outra situação, o desejo é identificar uma melhor forma de atuação do sistema futuro.

Andrade (2004) ressalta que um sistema real possui uma complexidade, tal que influencia o comportamento do mesmo por ter um grande número de variáveis. Embora estas variáveis sejam reduzidas às variáveis principais, as quais, realmente, têm um poder de influência maior sobre o sistema. Isto implica na necessidade de identificação dessas variáveis principais. A **Figura 1** mostra uma representação da simplificação de um processo com a modelagem.



**Figura 1:** Representação simplificada do processo de modelagem

**Fonte:** adaptado de Andrade (2004, p.7)

O estudo da PO é baseado em fases segundo as considerações de Silva *et. al* (2007). Para eles, é necessária a ocorrência de seis fases, são elas:

- Formulação do problema;
- Construção do modelo do sistema;
- Cálculo da solução através do modelo;
- Teste do modelo e da solução;
- Estabelecimento de controles da solução;
- Implantação e acompanhamento.

Consoante Moreira (2011), quando o problema é considerado incomum e complexo, por possuir muitas variáveis importantes, será fundamental a análise quantitativa. Este processo é desencadeado de acordo com a sequência de passos.

- a. Definição do problema;
- b. Desenvolvimento do modelo;
- c. Preparação dos dados;
- d. Solução do modelo;
- e. Relatório dos resultados.

Em virtude da percepção dos dois autores sobre a abordagem do problema, tem-se um resumo acerca de cada fase na visão dos autores em questão.

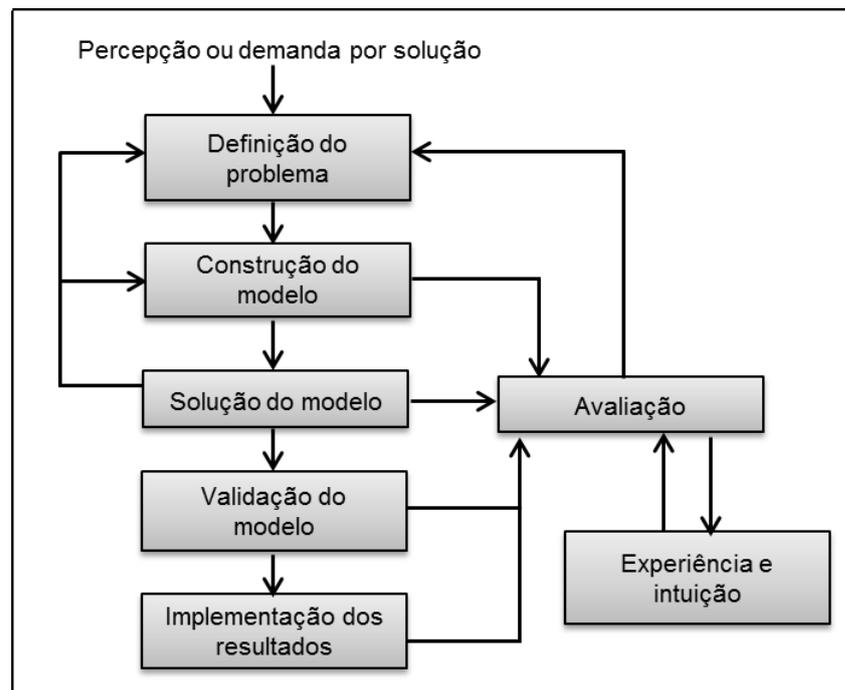
A etapa inicial caracteriza-se como crítica, pois exige empenho da equipe ou pesquisador em formular o problema de maneira clara e coerente, definir os objetivos e os caminhos possíveis para que os mesmos ocorram, além de levantar as limitações técnicas do sistema e as relações com outros sistemas, seja da empresa ou do ambiente externo, com a finalidade de criticar a validade de possíveis soluções diante dos obstáculos.

O passo da construção do modelo está relacionado aos modelos matemáticos, representação da situação-problema por um sistema de símbolos e as relações matemáticas como as equações e inequações.

A fase de cálculo é feita por técnicas matemáticas específicas. A parte de solução do modelo, diz respeito à testagem de dados empíricos do sistema, sendo que, se houver dados históricos, os mesmos serão aplicados no modelo. Caso não sejam satisfatórios, é feita a reformulação ou abandono do modelo.

O estabelecimento de controles da solução está vinculado à construção e experimentação do modelo identificando parâmetros fundamentais para solução do problema, e, por fim, a fase de implementação e acompanhamento onde serão gerados os relatórios de resultados, em que será observada a solução recomendada e outras informações úteis sobre o modelo.

De modo geral, as fases necessárias num trabalho de PO podem ser definidas pelo fluxograma ilustrado na **Figura 2**.



**Figura 2:** Fases de um estudo de Pesquisa Operacional  
**Fonte:** adaptado de Andrade (2004, p.8)

Em suma, Moreira (2011) diz que o campo da PO ou ciência da gerência está em constante avanço, dificultando a relação de elementos pertencentes ao conjunto de modelos que utiliza. No entanto, existem os modelos generalizados, ou seja, aqueles cujo uso serve de referência para a área. Os principais são:

- a. Probabilidade e Distribuição de Probabilidade;
- b. Programação Linear;
- c. Programação Linear Inteira;
- d. PERT e CPM;
- e. Previsão;
- f. Teoria da Decisão;

- g. Modelos de Rede;
- h. Modelos de Linhas de Espera (Filas);
- i. Simulação;
- j. Teoria dos Jogos;
- k. Análise de Regressão.

Pelo fato desta pesquisa ser a modelagem de um sistema real, cujo interesse é representá-la por meio de uma simulação computacional, o tópico subsequente apresenta conceitos e opiniões que envolvem o tema, bem como os motivos para utilização dos mesmos.

## **2.5 Simulação computacional**

A simulação, como subárea do conhecimento da PO, é bastante discutida e estudada por vários autores, desde os pioneiros no assunto, na época da segunda guerra mundial, até os dias atuais onde são realizadas pesquisas voltadas a diversos temas.

Como explica Shannon (1975) citado por Chwif (1999), a simulação por ser um termo de vasta amplitude e pode ser definida como um processo de elaboração de um modelo de algum sistema real ou mesmo hipotético, com a experimentação do modelo, cuja finalidade é entender o comportamento de um sistema ou avaliar sua operação.

Freitas Filho (2008) relata que um dos desenvolvedores de programas de computadores e linguagens de simulação foi Schriber, com o desenvolvimento do GPSS (*General Purpose Simulation System*), a primeira linguagem comercial de computadores para a simulação, desenvolvida em 1961 em um trabalho conjunto da IBM com os laboratórios BELL. A definição de Schriber para simulação não deixa claro que o modelo deve ser computacional, isto se explica pelo fato de que, na época, os modelos eram analógicos e físicos, no estudo e análise do comportamento dos sistemas.

Atualmente, quando se fala em simulação, está subentendido o uso da computação. Shannon (1975) citado por Freitas Filho (2008) definiu o modelo

computacional como um programa de computador cujas variáveis apresentam o mesmo comportamento dinâmico e estocástico do sistema real que representa.

Em outras palavras, Pegden (1991) também citado por Freitas Filho (2008, p.22), apresenta uma definição mais completa, abarcando todo o processo de simulação, o mesmo diz que “simulação é o processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação”.

Em consequência do que foi exposto, as opiniões e definições voltadas ao tema de simulação concentram-se em três macro etapas: o modelo de um sistema real ou hipotético, a experimentação e a avaliação do comportamento.

Dessa forma, cabe uma definição sobre modelagem que, segundo Moreira (2011), é o processo de transformar os dados de um problema e organizá-los segundo as necessidades formais de um modelo matemático. Para Arenales *et. al.* (2007), o termo *modelo* pode ser usado como objeto abstrato, que procura imitar as principais características de um objeto real para fins de representação do mesmo.

Freitas Filho (2008) entende a modelagem como um processo de criação e descrição, envolvendo um grau de abstração que, na maioria das vezes, acarreta numa série de simplificações sobre a organização e o funcionamento do sistema real; geralmente, essa descrição é feita com base em relações matemáticas ou lógicas que, no seu conjunto, constituem o que se denomina de modelos.

O autor ainda ressalta que o emprego de modelos para estudar um sistema não se restringe aos modelos matemáticos, pois podem ser usados modelos físicos ou analíticos, mas, no caso da simulação computacional, utiliza-se de modelos computacionais, os quais são dependentes da natureza do sistema estudado.

Segundo Chwif (1999), como o modelo analítico é representado por um conjunto de equações, o modelo de simulação, por sua vez, é representado através de uma linguagem de programação. Com isto, os modelos de simulação são executados, ao invés de solucionados, como é o caso dos analíticos.

A simulação computacional pode ser classificada em três categorias, são elas: simulação de Monte Carlo, simulação contínua e simulação de eventos

discretos, de acordo com a conceituação de Nance (1993) citado por Chwif (1999).

Segundo Andrade (2004), o método de Monte Carlo é considerado como um processo de operação de modelos estatísticos, com a possibilidade, experimentalmente, de trabalhar com variáveis descritas por funções probabilísticas.

Silva *et al.* (2007) reforçam que a simulação em sistemas incorporando elementos aleatórios é definida como simulação estocásticas ou de Monte Carlo, que na prática é viável por causa do uso de computadores, pois há uma grande quantidade de dados a serem processados.

De acordo com Chwif (1999), embora a simulação computacional tenha surgido na década de 1950, para fins militares, sua popularidade intensificou-se na última década para outras áreas, como: manufatura e serviços entre engenheiros, administradores e leigos. A explicação para isto se deve pelos seguintes fatores:

- Desenvolvimento dos computadores, que apresentaram um grande crescimento nos últimos anos;
- Desenvolvimento de *softwares* de simulação, com interfaces homem-máquina mais “amigáveis” e com capacidade de processamento gráfico;
- Natureza da simulação: capacidade de avaliar sistemas complexos e modelar seu comportamento dinâmico, sendo especialmente importante quando inexistente solução analítica.

Conforme Prado (2003), as áreas de aplicações da simulação são amplas, envolvem desde setores da produção em uma manufatura até a movimentação de papéis em um escritório. O autor expressa-se da seguinte maneira: “tudo que pode ser descrito pode ser simulado”. Seguem algumas aplicações da simulação:

- 1) Linhas de produção: uma área que apresentou uma grande quantidade de aplicações de modelagem, com inúmeros cenários que vão desde empresas manufatureiras até minerações;
- 2) Logística: área com um crescente uso da simulação. Alguns exemplos de cenários simulados:
  - a. No transporte ferroviário, onde se pode analisar o movimento de carros vazios como objetivo da minimização dos mesmos;

- b. No transporte marítimo e aéreo, podendo ser o caso de aplicações referentes à confecção da tabela de horários e dimensionamento de portos e aeroportos;
  - c. No modelo rodoviário, com possibilidade de dimensionar um pedágio ou estabelecer esquema do fluxo de veículos pelas ruas da cidade, com as durações dos semáforos, para o melhoramento do serviço, agilizando o sistema e, conseqüentemente, diminuindo os gastos com combustível;
  - d. No modelo de elevadores, com a possibilidade de minimizar o tempo de espera e o custo de movimentação dos mesmos;
- 3) Comunicações: os problemas relacionados à comunicação podem ser analisados pela modelagem de filas;
- 4) Bancos, supermercados, escritórios e outros: com a simulação pode-se dimensionar o número de caixas para que as filas fiquem em um valor especificado;
- 5) Confiabilidade: a simulação é usada como uma ferramenta para se obter uma medição quantitativa da confiabilidade do sistemas, se as características dos componentes individuais forem conhecidas, bastante válido para sistemas militares ou de computadores *on line*;
- 6) Processamento de dados: utilização da modelagem de filas pelas empresas que desenvolvem computadores e pelas universidades de modo a se medir a produtividade ou o tempo de resposta de certo sistema de computadores e terminais;
- 7) *Call center*: a simulação é usada para o dimensionamento da quantidade de atendentes, vital para a manutenção das empresas com lucratividade e competitividade.

Abordadas as definições, categorias e aplicações da simulação, abre-se espaço para explanação das vantagens. Segundo Andrade (2002), as vantagens associadas ao uso da simulação, são:

- A simulação possibilita o estudo e a experimentação de complexas interações internas de um dado sistema, seja uma empresa ou parte dela;
- Por meio da simulação podem ser estudadas algumas variações do meio ambiente e verificados seus efeitos em todo o sistema;

- A experiência adquirida em construir os modelos e realizar a simulação pode levar a uma melhor compreensão do sistema, o que possibilita melhorá-lo;
- A simulação de sistemas complexos pode fornecer valiosa intuição no sentido de descobrir as variáveis mais importantes do sistema e a maneira como elas interagem;
- A simulação pode ser usada para experiências com novas situações sobre as quais se tem pouca ou mesmo nenhuma informação, no intuito de preparar a administração para o que possa acontecer;
- A simulação pode servir como um primeiro teste para se delinearem novas políticas e regras de decisão para a operação de um sistema, antes de experimentá-las no sistema real.

Em textos de Banks (1984) e Pegden (1991), citados por Freitas Filho (2008), são determinadas outras vantagens e algumas desvantagens, a cerca da simulação. Desta forma, são ditas como vantagens:

- A metodologia de análise utilizada pela simulação permite a avaliação de um sistema proposto, mesmo que os dados de entrada estejam, ainda, na forma de “esquemas” ou rascunhos;
- Depois de criado um modelo de simulação, o mesmo pode ser utilizado inúmeras vezes para avaliar os projetos e políticas propostas;
- A simulação é, geralmente, mais fácil de aplicar do que métodos analíticos;
- Uma vez que os modelos de simulação podem ser quase tão detalhados quanto os sistemas reais, novas políticas e procedimentos operacionais, regras de decisão, fluxos de informação, entre outras; podem ser avaliados sem que o sistema real seja perturbado.
- O tempo pode ser controlado, comprimido ou expandido, permitindo reproduzir os fenômenos de maneira lenta ou acelerada, para que se possa melhor estudá-los;
- Um estudo de simulação costuma mostrar como realmente um sistema opera; isto é, às vezes, mostra uma realidade diferente daquela como todos pensavam que o mesmo operava;
- Novas situações sobre as quais se tenha pouco conhecimento e experiência podem ser tratadas de tal forma que se possa ter,

teoricamente, alguma preparação diante de futuros eventos. A simulação é uma ferramenta especial para explorar questões do tipo: “O que aconteceria se?”.

As desvantagens estão relacionadas aos seguintes fatores:

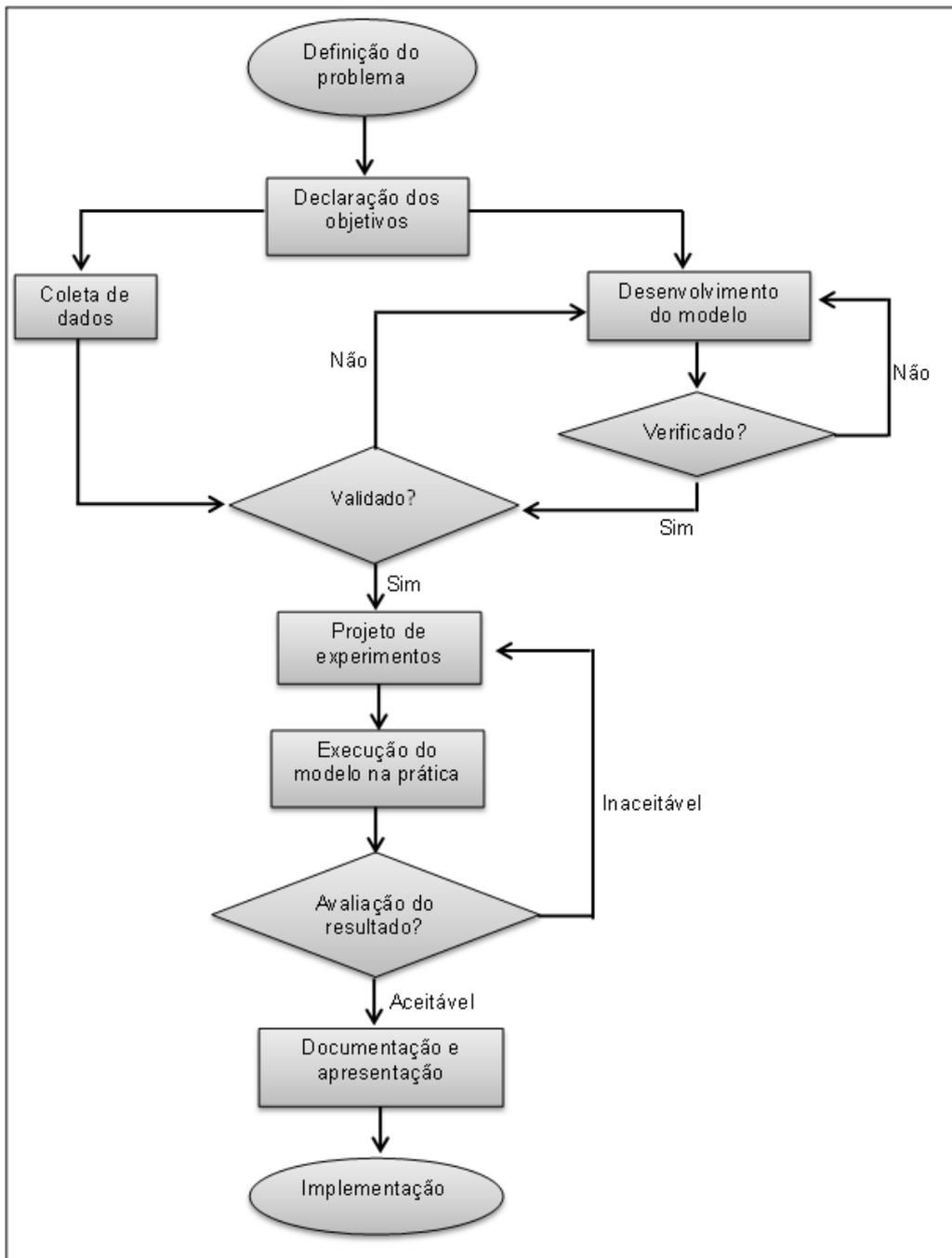
- A construção de modelos requer treinamento especial. Envolve arte e, portanto, o aprendizado se dá ao longo do tempo, com a aquisição de experiência. Dois modelos de um sistema construídos por dois indivíduos competentes terão similaridades, mas dificilmente serão iguais;
- Os resultados da simulação são, muitas vezes, de difícil interpretação. Uma vez que os modelos tentam capturar a variabilidade do sistema, é comum que existam dificuldades em determinar quando uma observação realizada durante uma execução se deve a alguma relação significativamente no sistema ou a processos aleatórios construídos e embutidos no modelo;
- A modelagem e a experimentação associadas a modelos de simulação consomem muitos recursos, principalmente tempo. A tentativa de simplificação na modelagem ou nos experimentos objetivando economia de recursos costuma levar a resultados insatisfatórios. Em muitos casos a aplicação de métodos analíticos pode trazer resultados menos ricos e mais econômicos.

Para finalizar o tópico de simulação computacional, seguem os passos necessários para a formulação de um estudo com a modelagem e a simulação, são listados, por Freitas Filho (2008), de acordo com a sequência:

- Formulação e análise do problema;
- Planejamento do projeto;
- Formulação do modelo conceitual;
- Coleta de macroinformações e dados;
- Tradução do modelo;
- Verificação e validação;
- Projeto experimental final;
- Experimentação;
- Interpretação e análise estatística dos resultados;

- Comparação de sistemas e identificação das melhores soluções;
- Documentação;
- Apresentação dos resultados e implementação.

De forma resumida, os passos podem ser representados por um algoritmo, como pode ser visualizado na **Figura 3**, proposta por Fitzsimmons e Fitzsimmons (2006). E que sugere a natureza experimental da simulação de sistemas.



**Figura 3:** O processo de simulação de sistemas  
**Fonte:** adaptado de Fitzsimmons & Fitzsimmons (2006, p.304)

## 2.6 Simulação aplicada

Estudos de simulação computacional com utilização do software ARENA são notáveis no meio acadêmico, foram desenvolvidos trabalhos em diversas áreas nessa última década, tais como:

Ribeiro (2003), com o desenvolvimento de um modelo no *software* ARENA, estudou a utilização do pátio do Aeroporto de Congonhas e o tempo de *turn around* das aeronaves operantes no local. O objetivo foi determinar a capacidade máxima do pátio, bem como oferecer subsídios para o balanceamento da oferta de serviços prestados às aeronaves estacionadas.

Muniz (2008) utilizou a simulação computacional para analisar o tráfego em um cruzamento semaforico na cidade de Ouro Preto – MG, com o modelo computacional feito no *software* ARENA.

Oliveira (2008) usou a simulação como base para a tomada de decisão, desenvolvendo uma metodologia para a utilização de simulação em projetos de manufatura enxuta, cuja construção do modelo computacional se deu pelo *software* ARENA.

Fioroni (2008) teve sua pesquisa voltada para a confirmação da hipótese de que os algoritmos propostos para o detalhamento de malhas ferroviárias, juntamente, com o método de direcionamento de trens escolhidos, são capazes de validar um modelo de simulação de malha ferroviária com trens em ciclo fechado. A pesquisa adotou a ferramenta computacional ARENA da *Rockwell Software* para a realização da tradução do modelo.

## 2.7 Software ARENA

A simulação computacional em sua essência é viabilizada com o uso de *softwares*, com linguagens de programação adequadas, para implementação dos dados.

Com relação aos *softwares* específicos para modelagem, o *software* ARENA enquadra-se como uma ferramenta útil, por ser uma das linguagens mundialmente conhecidas e por ser um programa modelador de cenários a partir

de dados reais. Prado (2003) relata que, na década de oitenta, a simulação passou a explorar o enorme potencial do computador pessoal e ocorreu a chamada “simulação visual”. Hoje há inúmeros programas com esta habilidade, tais como: ARENA, TAYLOR, PROMODEL, AUTOMOD e GPSS.

De acordo com Prado (2003), o ARENA é um programa apto à simulação, pois os recursos disponíveis oferecem subsídios à construção de um modelo desejado.

Conforme Prado (2003), o ARENA foi o aperfeiçoamento e a unificação entre dois programas, o SIMAN – evolução da arquitetura do GPSS – e o CINEMA – *software* de animação para PC (*Personal Computer*) - ambos criados pela empresa americana *Systems Modeling*, sendo lançado no mercado em 1993; mas, em 1998 a empresa *Rockwell Software* incorporou a *Systems Modeling*.

O ambiente ARENA é composto por quatro temas básicos, que permitem a construção completa de um modelo de sistema, segundo Freitas Filho (2008), são eles:

- Interface básica do ambiente;
- Construção de modelos;
- Execução de simulações;
- Animação da simulação.

O ARENA é composto por uma interface gráfica (GUI – *Graphical User Interface*), que automatiza o processo e reduz a utilização do teclado, sendo de maior uso o *mouse* (PRADO, 2003).

Conforme Freitas Filho (2008), cada modelagem possui sua peculiaridade, no entanto, a construção de um modelo simples obedece aos seguintes passos:

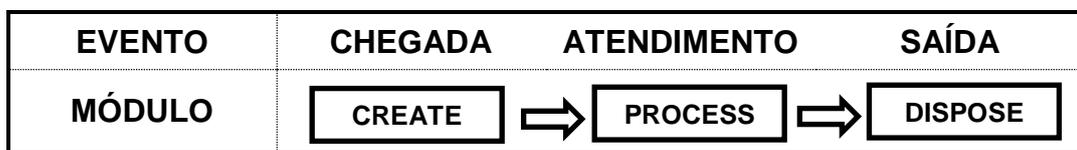
- Passo 1: inserir e interconectar módulos para representar o sistema de acordo com sua lógica de operação, obtidos a partir do *Template Basic Process*;
- Passo 2: fornecer dados para o modelo;
- Passo 3: executar a simulação do modelo;
- Passo 4: obter relatório final da simulação e interpretar seus resultados.

De forma resumida, Prado (2003) expõe que, para simular qualquer sistema no ARENA, é necessário descrever:

- As estações de trabalho;

- O fluxo dentro do sistema;
- As durações, distâncias, velocidades e entre outros.

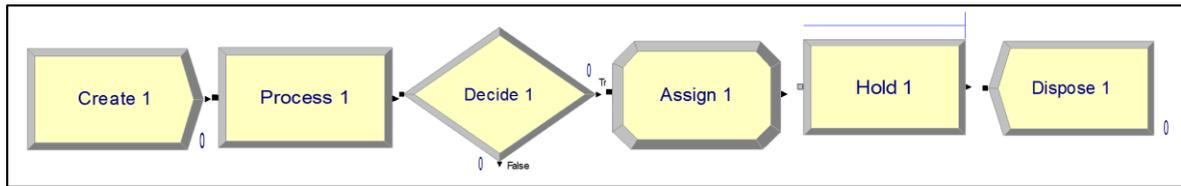
O autor ainda afirma que o ARENA utiliza a técnica de programação visual para montar qualquer modelo, em que o fluxo do sistema é criado na tela do computador na forma de um fluxograma. Uma exemplificação para isto seria a situação de um pedágio, em que se tem a chegada do veículo, seu atendimento, e a saída. Desta forma, o fluxograma pode ser representado de acordo com a **Figura 4**.



**Figura 4:** Eventos e fluxograma  
**Fonte:** adaptado de Prado (2003, p.48)

O processo de modelagem no Arena é por fluxograma, que dispõe de figuras geométricas, chamados de módulos de fluxograma. Segue uma explicação simplificada da função de alguns módulos do *template basic process*, a **Figura 5** mostra os desenhos geométricos referentes a cada módulo:

- *Create*: destina-se como ponto de partida para as entidades. A entidade é especificada neste módulo;
- *Process*: destina-se como o principal método de processamento na simulação, tem a função de liberar ou reter os recursos disponíveis;
- *Decide*: destina-se à tomada de decisão no sistema, esta pode ser baseada em uma ou mais condições ou baseada em uma ou mais probabilidades;
- *Assign*: destina-se à atribuição de valores para as variáveis do sistema;
- *Hold*: este módulo controla uma entidade em uma fila de modo a esperar por um sinal, ou seja, esperar que a condição especificada se torne verdade ou considerada infinitamente (módulo do *Advanced process*);
- *Dispose*: destina-se como ponto de saída das entidades do sistema.



**Figura 5:** Módulos do *template basic process* Arena  
**Fonte:** Elaborada pela autora

O ARENA dispõe de recursos para animações que, segundo Prado (2003), através da animação visual da tela, se torna muito mais atrativo, além de ser uma excelente ferramenta para verificar se o modelo está correto. Ademais, a animação é uma forma simpática de mostrar os resultados do estudo para um cliente.

Para a criação da animação de cenários as etapas podem ser decompostas em diversos passos:

- a. Escolher o símbolo da animação;
- b. Escolher o espaço para a animação;
- c. Criação do *layout* do sistema sendo simulado;
- d. Colocação da animação: para os recursos, ponto de entrada/saída, para as rotas, filas, melhoria do visual, alteração da cor da janela de fundo.

Outra forma de uso de animações no Arena, é pelo mesmo permitir a inserção de desenhos já feitos previamente em algum *software* como o *AutoCad* (Prado, 2003).

### **3 METODOLOGIA DA PESQUISA**

O capítulo apresenta os procedimentos técnicos e metodológicos que foram adotados para responder as questões propostas, bem como, a forma como estes auxiliaram no desenvolvimento da pesquisa e no alcance dos objetivos definidos pelo trabalho de monografia. Serão apresentados os passos para o desenvolvimento do mesmo, bem como as características que norteiam a pesquisa, com relação à sua natureza, à tipologia, às ferramentas que foram utilizadas na coleta de dados e serão explanadas todas as outras etapas que compuseram a elaboração desta monografia.

#### **3.1 Natureza da pesquisa**

“A pesquisa é o conjunto de procedimentos sistematizados, baseados em raciocínio lógico, na busca de soluções para problemas nas diversas áreas, utilizando metodologia científica” (FERRÃO, p.77, 2003).

Uma pesquisa é classificada mediante algum critério, o mais comumente usado é com base no objetivo geral. Assim, a natureza da pesquisa, como algo de maior abrangência, pode ser entendida em três grandes grupos: exploratória, descritiva e/ou explicativa (GIL, 2002).

Conforme Gil (2002), a pesquisa descritiva tem o objetivo primordial da descrição das características de uma população ou fenômeno ou, então, o estabelecimento de relações entre variáveis.

Para Reis (2008), a pesquisa explicativa tem como objetivo identificar os fatores determinantes que contribuem para que os fenômenos ocorram e explica a razão destes acontecerem.

Tendo em vista estas classificações, vale salientar que, a pesquisa pode ter caráter quantitativo ou qualitativo. Segundo Reis (2008), a pesquisa quantitativa usa a quantificação na coleta e tratamento das informações por meio de técnicas estatísticas. Tem o objetivo de garantir resultados e evitar distorções de análise e de interpretação, traduzindo em números as informações analisadas e dados coletados.

Já a pesquisa qualitativa tem por objetivo a interpretação e os significados dos fenômenos analisados, pois considera a relação dinâmica entre o tema e o objeto de estudo e o sujeito, bem como o vínculo indissociável entre o mundo objetivo e a subjetividade do sujeito que não pode ser traduzido em números (REIS, 2008).

O caso estudado neste trabalho se insere no escopo de uma pesquisa quantitativa de natureza descritiva, de acordo com as definições acima.

Segundo Andrade (2009), outro ponto importante na pesquisa é sua finalidade, podendo ser de ordem intelectual ou de ordem prática; esta pesquisa se enquadra nas questões de ordem prática. Como relata o mesmo autor, a pesquisa com esta finalidade visa às aplicações práticas, com o objetivo de atender às exigências da vida moderna, por esta razão, a busca de soluções para problemas concretos, denomina-se pesquisa “aplicada”.

### **3.2 Tipologia de pesquisa**

As tipologias para uma pesquisa podem ser de ordem descritiva, experimental e pesquisa-ação, classificações sujeitas às formas de estudo do objeto de pesquisa (BARROS; LEHFELD, 2000).

O presente trabalho possui características experimentais, uma vez que o objetivo geral propõe o desenvolvimento de um modelo computacional para uma dada situação; sendo assim, a pesquisa experimental caracteriza-se por manipular diretamente as variáveis relacionadas ao estudo, ou seja, a manipulação das variáveis proporciona o estudo da relação entre as causas e os efeitos do determinado fenômeno, com a criação de situações de controle que procura evitar a interferência de variáveis intervenientes (CERVO; BERVIAN; SILVA, 2007).

### **3.3 Variáveis da Pesquisa**

As variáveis estudadas são aquelas que compõem o fluxo na interseção semaforizada, sendo elas: os tempos de sinal verde, tempos de sinal vermelho,

tempo de ciclo do semáforo, os tempos de chegada, tempo de utilização das vias, tempo de atravessamento do cruzamento ao destino (saída) e o fluxo de veículos na interseção. Uma ressalva para os tempos de amarelo, pois não foi feita nenhuma alteração com relação a esses tempos, já que são considerados fixos e padronizados por questões de segurança. Como ressalta FHWA (2008), a duração do intervalo amarelo não pode variar de ciclo para ciclo, o intervalo de amarelo deverá ter duração de 3 segundos a 6 segundos, os intervalos mais longos devem ser utilizados em interseções onde as velocidades de aproximação são maiores.

### **3.4 Delineamento da pesquisa**

Este trabalho de monografia partiu inicialmente de um projeto de TFC onde foi feita a etapa de pesquisa em livros, teses, dissertações, monografias e artigos científicos, dentre outros, sobre o tema proposto do trabalho com o intuito de se fazer um resumo teórico garantindo uma base para a continuação da pesquisa. E, no que se refere ao processo de simulação, buscou-se, como base de orientação, o fluxograma apresentado por Fitzsimmons & Fitzsimmons (2006), mostrado na **Figura 3**, no capítulo anterior. Os autores detalham a sua metodologia nos seguintes passos:

#### **3.4.1 Definição do problema**

Para Fitzsimmons & Fitzsimmons (2006) definir o problema é fazê-lo de forma concisa e precisa. Nesta fase os objetivos devem ser claros, avaliar a importância de se estudar o sistema, os critérios adotados na análise de desempenho do sistema e os resultados que o estudo deseja alcançar. O pesquisador deve se aprofundar no seu objeto de estudo para conhecer os detalhes que lhes serão úteis no desenvolvimento da pesquisa.

### 3.4.2 Declaração dos objetivos

Fitzsimmons & Fitzsimmons (2006) declaram que se deve seguir naturalmente com a elaboração dos objetivos, pois têm que proporcionar um enquadramento para o alcance do modelo e medidas de desempenho do sistema. Para Banks (1988) os objetivos indicam as questões que devem ser respondidas pelo estudo de simulação.

### 3.4.3 Coleta dos dados e Desenvolvimento do modelo

Para Marconi e Lakatos (2005), a execução da pesquisa tem como tarefa inicial a coleta de dados e, para ocorrência desta, há vários procedimentos que variam de acordo com as circunstâncias ou com o tipo de investigação. Como se trata da coleta de dados para a elaboração de um modelo a ser simulado computacionalmente, Fitzsimmons & Fitzsimmons (2006) propõem que se reúnam os dados e desenvolva o modelo, simultaneamente, para poupar tempo.

Harrel *et al* (2000) reforçam que a coleta de dados é um dos pontos chaves no processo de simulação, pois caso os dados não sejam consistentes o modelo também não o será.

Para a coleta de dados deste trabalho necessitou-se de informações sobre a interseção semaforizada, as quais foram obtidas com a EPTTC – Empresa Petrolinense de Trânsito e Transporte Coletivo, a mesma informou os horários de picos considerados na cidade de Petrolina-PE, são eles:

- 07:00 às 09:00 primeiro horário de pico do dia;
- 11:00 às 13:00 segundo horário de pico do dia;
- 17:00 às 19:00 terceiro horário de pico do dia.

Considerando tais horários, foi escolhido o horário de 07h00 às 09h00 da manhã de acordo com a disponibilidade de tempo da pesquisadora e de seu ajudante. A ferramenta utilizada para a coleta de dados foi a filmagem das vias. A Prefeitura Municipal de Petrolina, que fica adjacente à interseção, possui uma sacada que forneceu uma visão sobre o trânsito na interseção. Dessa forma, a filmagem de cada via proporcionou um arquivo que pôde ser visto várias vezes e

assim se pôde coletar os tempos desejados de forma mais confiável, pois caso ocorresse um erro na coleta de algum tempo, poderia repetir o vídeo e coletar novamente. O próximo capítulo fornecerá detalhes sobre o período de coleta de dados.

#### 3.4.4 Verificação do modelo e validação

Para a verificação do modelo, o trabalho de depuração da programação é feito para procurar erros de sintaxe e de semântica (HARREL *ET AL* 2000). É a fase onde se certificar-se do funcionamento do modelo, e se está de acordo com o esperado (FITZSIMMONS & FITZSIMMONS 2006). Banks (1998) relata que o processo de verificação não é para ocorrer apenas quando o modelo estiver finalizado, mas deve ser um processo contínuo.

A validação é o processo de determinar a relação entre o modelo e o sistema real, há várias técnicas de validação. A mais comum é a comparação entre os resultados do modelo com os resultados do sistema real. O propósito da validação é diminuir os riscos associados às tomadas de decisões com base no simulado (HARREL *ET AL* 2000). Para Fitzsimmons & Fitzsimmons (2006) a validação é confirmar se o modelo reflete às operações do sistema real com detalhes suficientes para lidar com o problema.

#### 3.4.5 Projeto de experimento

Quando o modelo é julgado válido poderá ser desenvolvido um conjunto de experimentos de simulação para estimar o desempenho do modelo e assim auxiliar na resolução do problema do projeto. Dessa forma, é selecionado um número de cenários e executadas as simulações para reunir os critérios de funcionamento do modelo simulado. Assim, para atingir a confiabilidade estatística suficiente das medidas relacionadas com o cenário de desempenho, cada cenário é replicado e executado várias vezes, e os resultados, em média, reduzem a variabilidade estatística (ALTIOK; MELAMED, 2007).

#### 3.4.6 Execução do modelo e avaliação do resultado

Nesta etapa, os procedimentos, testes de análise e comparação das alternativas são formulados.

Os resultados da simulação deverão ser avaliados e, caso ocorra algo insatisfatório, deverá, novamente, ser experimentado (FITZSIMMONS & FITZSIMMONS 2006).

Este trabalho simulou o modelo no *software* Arena 13.9, o qual disponibiliza relatórios ao final das simulações para avaliação dos resultados. As explicações referentes aos resultados das simulações serão apresentadas nos próximos capítulos.

#### 3.4.7 Documentação e apresentação

Fitzsimmons & Fitzsimmons (2006) declaram que todas as configurações do modelo e os resultados devem ser documentados para referências futuras e que há *softwares* com capacidade de representação gráfica, que podem ser autoexplicáveis.

Banks (1998) afirma que a fase de documentação é necessária por inúmeras razões, pois, se o modelo for usado novamente pelo mesmo pesquisador ou por outros, a documentação pode ser precisa para compreender como o modelo de simulação opera. Além disso, se o modelo precisar sofrer alterações posteriores, a documentação facilitará o trabalho.

#### 3.4.8 Implementação

Esta etapa se configura na alteração do sistema real, ou seja, o sistema real será modificado com base nas informações e resultados do modelo simulado.

## 4 ESTUDO DO SISTEMA MODELADO

O capítulo apresenta o objeto de estudo deste referido trabalho, com ilustrações da localização da interseção semaforizada, detalha a coleta de dados, a formulação do modelo, desenvolvido no *software* Arena 13.0, a validação do modelo e observações feitas sobre o sistema modelado.

### 4.1 Apresentação da interseção semaforizada

A interseção semaforizada está localizada na Av. Guararapes (via horizontal) com a Av. Joaquim Nabuco (via vertical) como mostra a **Figura 6**, situada no centro da cidade Petrolina-PE, possui um conjunto de três semáforos controlando o fluxo de veículos nas avenidas. Seus pontos de referências são a Praça Maria Auxiliadora (lado esquerdo superior), a Prefeitura Municipal de Petrolina (lado esquerdo inferior), o Banco Itaú (lado direito inferior) e o Colégio Maria Auxiliadora (lado direito superior), conforme a **Figura 7**.



**Figura 6:** Vista aérea da interseção semaforizada.  
**Fonte:** Google Earth, acessado 31.03.2012 as 16h33



A interseção semafórica da Av. Joaquim Nabuco com a Av. Guararapes foi escolhida com base nas informações prestadas pela EPTTC (2012), pois segundo a mesma, esta interseção apresenta, atualmente, o maior fluxo de veículos no centro da cidade.

Para a realização deste estudo algumas considerações foram necessárias com relação ao objeto de estudo.

Como foi dito pela EPTTC (2012), o horário entre 7 horas da manhã e 9 horas compreende um dos horários de pico do dia, e, por isso, inicialmente, tinha-se cogitado a possibilidade de coleta no horário de 07h00 às 08h00 da manhã, mas foi percebido que este horário se torna caótico, por ser o horário de entrada do alunos no Colégio Maria Auxiliadora, ocasionando um fluxo intenso de veículos.

Durante a coleta teste observou-se situações em que o sinal de algumas das vias mesmo estando aberto, os veículos não conseguiam prosseguir, devido ao engarrafamento nas imediações do Colégio, pois haviam paradas dos veículos para o desembarque de estudantes e entrada de professores. Então, ocorreram situações em que alguns veículos esperaram dois tempos de ciclo do semáforo para poderem passar pela interseção.

Esta situação ocorre em todos os dias úteis da semana, nos horários de 07h00 as 07h30, ocorre também no horário de saída dos estudantes matutinos, novamente, no horário de entrada das aulas vespertina e no horário de saída no fim da tarde, por volta das 18h00.

Durante o processo de coleta teste foi observado este fato que causa perturbação no fluxo das vias. Para melhor compreensão desse fato, a **Figura 8** ilustra uma imagem da área do Colégio Maria Auxiliadora, adjacente à interseção semaforizada, e os locais de entrada dos estudantes, pontos que interferem no fluxo dos veículos que passam pela via, devido à parada de outros veículos nestes locais.

Então, pelas razões descritas, o sistema simulado considerou como verdadeiro horário de pico o intervalo entre 07h45 a 8h45 da manhã. Pois, não teria condições de fazer a simulação com os dados coletados entre o horário de 7 horas às 8 horas, uma vez que qualquer cenário criado estaria sujeito sempre ao intenso fluxo desse horário, não havendo então muito que fazer para melhorar o

fluxo de veículos das vias. A intervenção necessária seria proibir a parada desses veículos na frente da escola, obrigando os veículos a pararem em outro local próximo à mesma.



**Figura 8:** Área do Colégio Maria Auxiliadora  
**Fonte:** Elaborada pela autora.

## 4.2 Coleta de dados

O levantamento dos dados ocorreu num período de 10 dias úteis, sendo que cinco desses dias foram para uma coleta teste, nesta foram aperfeiçoados os ângulos de observação, as posições e sincronização das filmagens, serviu para orientar o ajudante no que era importante observar e filmar, para a coleta de dados.

Durante a etapa da coleta de dados foram utilizadas as ferramentas: câmeras digitais de resolução 12.1 megapixel e um notebook de configurações processador Intel ® Core i3 2.53 GHz, 3.0 GB de Memória RAM e sistema operacional Windows 7. Necessitou-se de uma autorização da Prefeitura Municipal de Petrolina, para que as filmagens pudessem ser feitas da sacada do prédio, já que a mesma proporcionava uma visão sobre o tráfego, com os ângulos

favoráveis à observação dos momentos de parada de cada veículo, bem como os momentos de movimentação dos veículos após a abertura dos sinais.

A presença do ajudante foi fundamental, possibilitando fazer a filmagem em dois ângulos: uma pessoa fazendo a filmagem de certo ponto da via direcionada ao semáforo e, a outra pessoa, filmando deste ponto comum em direção ao final da via, sendo que os tempos de filmagem eram sincronizados, ou seja, as filmagens começavam e finalizavam ao mesmo tempo. Dessa forma, foi possível observar a chegada dos veículos na faixa de retenção e ao final das filas, uma vez que o equipamento de filmagem não tinha lente de alcance dessa magnitude.

As **Figura 9** e **Figura 10** exemplificam a forma de filmagem das vias para a coleta dos tempos necessários a formulação do modelo. Estas imagens demonstram a visão do trânsito da sacada do prédio da Prefeitura Municipal e os ângulos de filmagem na Av. Guararapes para observação do fluxo das vias da mesma.



**Figura 9:** Visão sobre o trânsito ângulo em direção ao final das vias  
**Fonte:** Elaborada pela autora



**Figura 10:** Visão sobre o trânsito ângulo em direção ao semáforo  
**Fonte:** Elaborada pela autora

Os tempos de filmagens foram de 60 minutos para cada via, com filmagens de uma via por dia, nos horários de 07h45 as 08h45 da manhã, para coletar os tempos entre chegadas e os tempos de utilização das vias, sendo estes representados na **Tabela 1** e **Tabela 2**.

No período da coleta teste foi possível fazer vídeos de 20 minutos, para coletar dos tempos de atravessamento e destino de saída das vias, as **Tabela 3**, **Tabela 4**, **Tabela 5** e **Tabela 6** mostram os resultados. Não foram feitas coletas nos fins de semana e tão pouco nos feriados, pois estes não configuram dias

representativos, com picos de fluxo de veículos, conforme se observa durante a semana.

O **Quadro 1** ilustra como ocorreu o período de coleta de dados, especificando cada período da coleta e as datas.

**Quadro 1:** Cronograma da coleta de dados.

<b>Cronograma da Coleta de Dados</b>					
Período da Coleta: 09 a 20 de abril					
Horário: 07h00 às 08h00					
Datas	09/04/2012	10/04/2012	11/04/2012	12/04/2012	13/04/2012
Período de teste					
Acompanhamento					
Horário: 07h45 as 08h45					
Datas	16/04/2012	17/04/2012	18/04/2012	19/04/2012	20/04/2012
Sinal 01 _ Banco Itaú					
Sinal 02 _ Prefeitura de Petrolina					
Sinal 03 _ Colégio M <sup>a</sup> Auxiliadora					
Acompanhamento					

**Fonte:** Elaborada pela autora.

Para a obtenção de todas as distribuições estatísticas necessárias para construção do fluxograma a ser simulado computacionalmente foram realizados alguns passos.

- 1º passo: foram filmadas as vias de interesse;
- 2º passo: cada vídeo feito foi assistido pela pesquisadora e a mesma utilizou um *software* contador de tempos em segundos para coletar cada tempo necessário ao modelo;
- 3º passo: o *software* contador gerou arquivos no formato txt.
- 4º passo: os arquivos txt dos tempos entre chegadas foram importados para o excel, pois o *software* não gerava de imediato os valores desejados, era gerado uma lista crescente dos tempos de chegadas, fazendo-se necessário uma operação de subtração entre o sucessor e o anterior, para se obter os valores desejados;

5º passo: os arquivos txt foram importados para o *software* Arena 13.9 que possui a ferramenta *Input Analyzer*, a qual permite a análise de dados reais de um sistema e fornece a melhor distribuição estatística aplicada aos dados.

6º passo: com o resultado obtido do *Input Analyzer* foram feitas as tabelas das distribuições estatísticas referentes a cada tempo coletado.

Para melhor entendimento do modelo simulado, seguem as explicações de cada tempo utilizado na construção do modelo.

Os tempos entre chegadas configuram na diferença entre o tempo de chegada do veículo sucessor e do veículo anterior, em segundos. A **Tabela 1** mostra as distribuições estatísticas dos tempos entre chegadas.

**Tabela 1:** Distribuição estatística das chegadas

TEMPOS ENTRE CHEGADAS				
Nome da Variável	Distribuição Estatística	Expressão obtida pelo <i>Input Analyzer</i> (segundos)	Erro quadrado	Amostra
Via - Sinal 01	Weibull	1.5 + WEIB(10.7, 0.833)	0,00343	268
Via 1 - Sinal 02	Beta	0.999 + 136 * BETA(0.634, 2.86)	0,00220	141
Via 2 - Sinal 02	Lognormal	-0.5 + LOGN(11.2, 14.2)	0,01036	313
Via 3 - Sinal 02	Weibull	1.5 + WEIB(4.49, 0.735)	0,00598	366
Via - Sinal 03	Lognormal	0.5 + LOGN(19.8, 45.4)	0,004842	194

**Fonte:** elaborada pela autora

O tempo de utilização da via considera o tempo de deslocamento que cada veículo leva de quando parou na fila até chegar à faixa de retenção da via. Nele também está incluído os tempos de reação dos motoristas. A **Tabela 2** mostra as distribuições estatísticas dos tempos de utilização da via.

**Tabela 2:** Distribuição estatística dos tempos de utilização das vias

TEMPO DE UTILIZAÇÃO DA VIA				
Nome da Variável	Distribuição Estatística	Expressão obtida pelo <i>Input Analyzer</i> (segundos)	Erro quadrado	Amostra
Via - Sinal 01	Beta	-0.5 + 25 * BETA(1.33, 1.55)	0,00871	54
Via 1 - Sinal 02	Weibull	1.5 + WEIB(11.5, 1.41)	0,01451	56
Via 2 - Sinal 02	Beta	1.5 + 35 * BETA(1.31, 1.56)	0,01280	59
Via 3 - Sinal 02	Beta	1.5 + 45 * BETA(1.19, 1.3)	0,00578	62
Via - Sinal 03	Beta	2.5 + 29 * BETA(1.26, 1.41)	0,01760	49

**Fonte:** elaborada pela autora

Quanto aos tempos de atravessamento, estes consistem no tempo (em segundos) em que cada veículo leva para sair da faixa de retenção da via e atravessar a outra faixa de retenção da sua via de destino. A **Tabela 3** mostra a distribuição estatística do tempo de atravessamento para a via de destino.

**Tabela 3:** Distribuição estatística dos tempos de atravessamento

<b>TEMPO DE ATRAVESSAMENTO PARA VIA DE DESTINO</b>				
<b>Nome da Variável</b>	<b>Distribuição Estatística</b>	<b>Expressão obtida pelo <i>Input Analyzer</i> (segundos)</b>	<b>Erro quadrado</b>	<b>Amostra</b>
Via - Sinal 01 - Sentido Centro	Normal	NORM(3.96, 0.96)	0,00302	52
Via - Sinal 01 - Sentido Upe	Lognormal	1.5 + LOGN(1.88, 0.893)	0,03485	18
Via 1 - Sinal 02 - Sentido Upe	Gamma	1.5 + GAMM(0.617, 3.24)	0,01473	34
Via 1 - Sinal 02 - Sentido Orla	Normal	NORM(4, 0.683)	0,00047	30
Via 2 - Sinal 02 - Sentido Upe	Normal	NORM(3.29, 0.7)	0,00090	35
Via 3 - Sinal 02 - Sentido Centro	Normal	NORM(3.03, 0.766)	0,02661	68
Via - Sinal 03 - Sentido Centro	Lognormal	0.5 + LOGN(2.1, 1.05)	0,00734	33
Via - Sinal 03 - Sentido Orla	Erlang	2.5 + ERLA(0.35, 6)	0,00178	20

**Fonte:** elaborada pela autora

As **Tabela 4**, **Tabela 5** e **Tabela 6** possuem as porcentagens de destino das vias, os valores apresentados são resultados da observação das filmagens e contagem visual dos veículos quando estes se deslocavam para suas vias de destino. Como visto anteriormente, a **Figura 7** mostra que as únicas vias que possuem dois destinos de saída são: Via – Sinal 01, Via 1 – Sinal 02 e Via – Sinal 03.

**Tabela 4:** Porcentagem de destino da Via - Sinal 01

<b>Destino de saída da Via - Sinal 01</b>		
<b>Nome da variável</b>	<b>Porcentagem</b>	<b>Amostra</b>
Saída sentido Centro	95%	212
Saída sentido Upe	5%	10
Total	100%	222

**Fonte:** elaborada pela autora

**Tabela 5:** Porcentagem de destino da Via 1 - Sinal 02

Destino de saída da Via 1 - Sinal 02		
Nome da variável	Porcentagem	Amostra
Saída sentido Orla	52%	76
Saída sentido Upe	48%	70
Total	100%	146

Fonte: elaborada pela autora

**Tabela 6:** Porcentagem de destino da Via - Sinal 03

Destino de saída da Via - Sinal 03		
Nome da variável	Porcentagem	Amostra
Saída sentido Centro	89%	134
Saída sentido Orla	11%	16
Total	100%	150

Fonte: elaborada pela autora

### 4.3 Formulação do modelo

O modelo desenvolvido para simular o fluxo de veículos da interseção semaforizada foi feito em paralelo à coleta de dados, conforme orienta Fitzsimmons & Fitzsimmons (2006).

Para a modelagem do sistema necessitou-se da elaboração de um fluxograma, desenvolvido no ambiente do *software* Arena 13.9. O fluxograma geral consistiu de cinco ramos de fluxogramas, cada um representando o sistema de fluxo de uma via, a **Figura 11** mostra quais os módulos utilizados na criação do fluxograma. Criou-se também um ramo de fluxograma de controle do tempo de ciclo dos semáforos (vide **Figura 12**). Observa-se que estes fluxogramas pertencem à mesma área de trabalho no ambiente do *software* Arena.

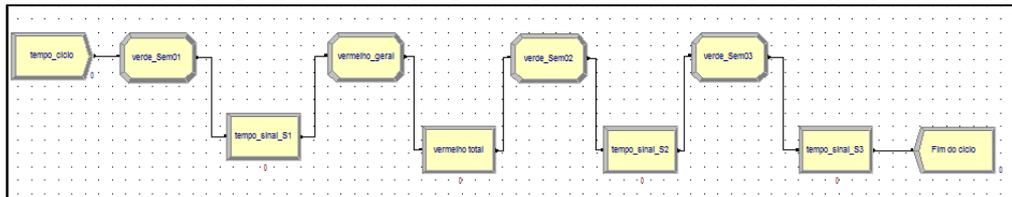
Lembrando que as formas geométricas dos módulos estão demonstradas na **Figura 5**. Portanto, a lógica de funcionamento do modelo é a seguinte:

- O módulo *create* serve para determinar as chegadas dos veículos no sistema, estes são chamados de entidades no *software*;
- Na sequência as entidades passam para o *decide*, o qual indica a situação do semáforo, se o sinal está aberto (verde) ou se o sinal

está fechado (vermelho), esta informação é recebida do fluxograma de controle do tempo de ciclo;

- Se as entidades encontram o sinal fechado no *decide* prosseguem para o *hold*, módulo que tem a função de reter as entidades até que o sinal esteja aberto, esta informação é recebida do fluxograma de controle do tempo de ciclo;
- Caso encontrem o sinal aberto no *decide* prosseguem para outro módulo, podendo ser:
  - outro *decide* – usado quando a via tem dois sentidos de saída, nele há a porcentagem de destino de saída da via, ou;
  - um *process* – este possui as distribuições estatísticas dos tempos de atravessamento da interseção para a saída de destino;
- Quando a entidade segue o caminho do primeiro *decide* e o módulo *hold*, na sequência há o *process* responsável pelos tempos de utilização da via;
- Após as entidades seguirem o caminho *create-decide-hold-process-decide* ou *create-decide-decide* estas são encaminhadas para o *process* de atravessamento da interseção, referente a sua saída de destino.
- Por fim, as entidades que passam pelo *process* de atravessamento da interseção são enviadas para o módulo *dispose*, responsável pela saída da entidade do sistema.





**Figura 12:** Fluxograma do tempo de ciclo do semáforo  
**Fonte:** Elaborada pela autora

#### 4.4 Validação do modelo

Para validar o modelo criado, foram feitas comparações entre os valores coletados do sistema real e os resultados gerados do modelo simulado no Arena 13.9.

A variável utilizada para validar o modelo foi o número de veículos que passaram pelo sistema, no intervalo de 60 minutos. Dessa forma, foram comparadas as quantidades de veículos que passaram em cada via existente na interseção semaforizada.

A **Tabela 7** mostra o quantitativo de veículos que passaram em cada via no sistema real, no sistema simulado e a porcentagem de erro.

Para o sistema simulado foram consideradas as seguintes condições, um tempo de aquecimento de 30 minutos, tempo de simulação de 60 minutos e 100 replicações, o que garante uma maior confiabilidade estatística dos resultados.

**Tabela 7:** Validação do modelo por número de veículos no sistema

<b>QUANTITATIVO DE VEÍCULOS QUE PASSARAM PELO SISTEMA EM 1 HORA</b>			
<b>Vias</b>	<b>REAL (estimado)</b>	<b>SIMULADO</b>	<b>ERRO</b>
Via - Sinal 01	335	324	3,284%
Via 1 - Sinal 02	143	138	3,497%
Via 2 - Sinal 02	315	310	1,587%
Via 3 - Sinal 02	464	507	-9,267%
Via - Sinal 03	190	163	14,211%
<b>Total de veículos</b>	<b>1447</b>	<b>1442</b>	<b>0,346%</b>

**Fonte:** Elaborada pela autora

Os resultados da **Tabela 7** mostram os erros associados a cada via, como se pode notar, o Sinal 03 apresentou o maior erro, pois houve dificuldades na coleta dos tempos desta via, não havia local disponível para a filmagem da avenida, que tivesse um ângulo de visão suficiente para observar desde o semáforo até certo ponto de alcance de formação da fila. Sendo assim, foi feita a coleta dos tempos entre chegadas uma única vez, usando o programa contador, com o auxílio do notebook. Por esta razão, os dados não foram muito precisos, além de que esta via possui local de estacionamento, ponto de moto táxi e árvores que dificultaram a visão no momento da coleta e o outro lado da via possui uma parada de ônibus, sendo estes os fatores que ocasionaram a imprecisão nos dados.

Outra explicação cabível é sobre o percentual da Via 3 - Sinal 02, esta por apresentar o maior fluxo de veículo de todas as vias, também teve seus dados não muito precisos, por não se conseguir um alcance preciso do final das filas, acarretando dificuldades na coleta dos tempos entre chegadas dos veículos.

No entanto, as outras vias tiveram erros menores ocasionando um percentual geral aceitável, garantindo a validação do modelo simulado.

## 5 ANÁLISE E RESULTADOS DOS CENÁRIOS MODELADOS

Este capítulo se dedica a apresentar os resultados e fazer as observações pertinentes a todo o processo de desenvolvimento do estudo da interseção semaforizada. Conforme o manual do Arena (2011), o número de replicações é determinado de acordo com a precisão requerida dos resultados.

Quanto ao tempo de simulação, este foi definido com base nas referências de Goldner (2008), pois para a autora as contagens em interseções que visem à elaboração do fluxograma do tráfego e cálculos da capacidade devem ser divididas em intervalos de 15 minutos, tempo estimado para observação das variações dentro da hora de pico. Sendo assim, os cenários deste trabalho foram manipulados com tempo de 30 minutos, o que significa dois intervalos de avaliação do sistema.

Todos os cenários foram configurados da seguinte forma:

- *Number of replications* (Número de replicações): 100
- *Warm up* (tempo de aquecimento): 1800 segundos
- *Replication length* (tempo de simulação): 3600 segundos

Com relação ao tempo de aquecimento (*warm up*) não há recolhimento de estatísticas neste tempo, e o valor do tempo varia conforme o modelo, sendo estimado por tentativas (KELTON; SADOWSKI; SWETS, 2009).

Os relatórios obtidos pelo Arena 13.9 disponibilizam informações sobre as entidades, filas, processos, recursos e outras. O relatório de interesse deste estudo foi o *category overview*, o mesmo continha as seguintes informações que foram analisadas de cada cenário:

- Número de entidades que passaram pelo sistema – *number out - NO*;
- O tempo médio e máximo de espera das entidades – *wait time - WTA WTM*;
- O tempo médio e máximo da entidade no sistema – *total time – TTA TTM*;
- O tempo médio e máximo de espera na fila – *waiting time queue – WTQA WTQM*;
- O número médio e máximo de entidades esperando na fila – *number waiting queue – NWQA NWQM*.

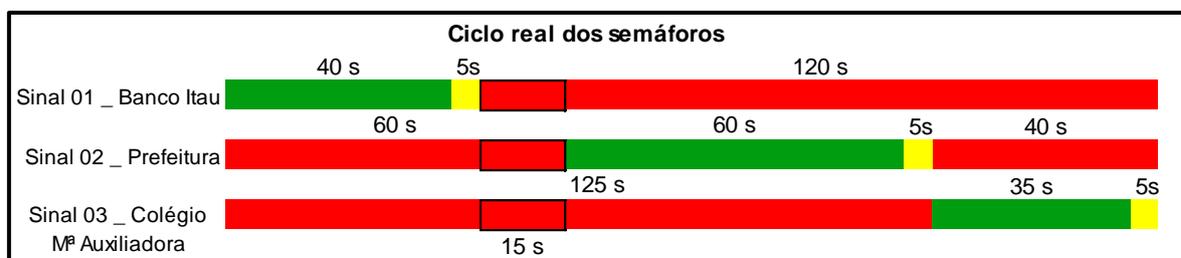
Para efeitos de identificação do melhor cenário foram comparadas as informações citadas.

Quanto à interseção semaforizada, o ciclo de um semáforo é o tempo total necessário para a completa sequência de todos os estágios de sinalização da interseção, ou seja, o tempo necessário para que o semáforo inicie no estágio verde e retorne a esta situação (EJZENBERG, 1994).

Uma observação para os tópicos a seguir deste capítulo. Para cada tempo de verde foram acrescentados os 5 segundos de amarelo do respectivo sinal no processo de simulação, como foram explicados no tópico Formulação do modelo, no entanto, as figuras que representam os tempos de ciclo dos cenários mostram os tempos de amarelo tal como são, para efeitos de visualização.

## 5.1 Cenário real

Para a simulação do cenário real, o fluxograma de controle do tempo de ciclo teve o tempo total de 165 segundos, com os tempos de verde de cada sinal indicado na **Figura 13**.



**Figura 13:** Tempo de ciclo do cenário real  
**Fonte:** Elaborada pela autora

Após a simulação, foram obtidos os seguintes resultados, mostrados na **Tabela 8**. As variáveis avaliadas deste cenário apresentam o quadro da situação cotidiana na interseção da Avenida Joaquim Nabuco com a Avenida Guararapes. Pode-se ver que no horário de pico tem-se geração de grandes filas nas vias 03 e 02 do sinal 02 e na mesma proporção nas vias do sinal 03 e 01, quando se observa o número máximo de veículos que esperam na fila (variável NWQM).

As filas são consideradas grandes, pois, se for considerado que, em média, um veículo tenha 3,90 metros de comprimento, isto acarreta um comprimento de fila de 109,2 metros, causando prejuízo às vias adjacentes às avenidas, e um agravante para a interseção é o fluxo razoável de transporte coletivo nessas avenidas em questão.

**Tabela 8:** Quantitativos das variáveis do cenário real

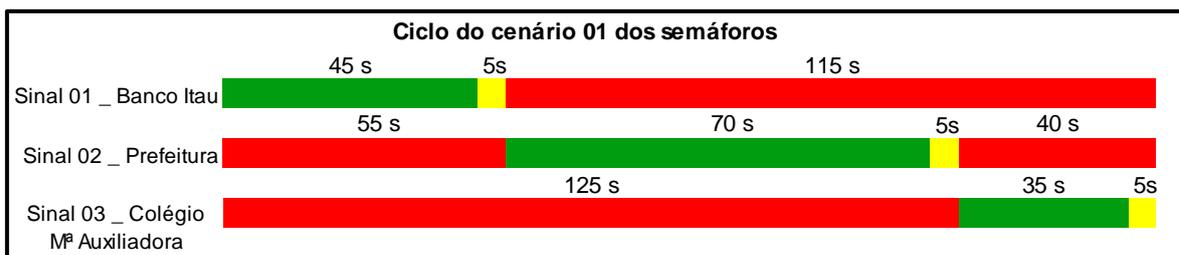
<b>CENÁRIO REAL</b>				
<b>NO</b>	<b>WTA (segundos)</b>	<b>WTM (segundo)</b>	<b>TTA (segundos)</b>	<b>TTM (segundos)</b>
733 entidades	34,44	124,99	48,85	157,67
<b>Filas</b>	<b>WTQA (segundos)</b>	<b>WTQM (segundos)</b>	<b>NWQA (entidade)</b>	<b>NWQM (entidade)</b>
Sinal 01. <i>queue</i>	60,39	120	3,22	21
Sinal 02 via 01. <i>queue</i>	49,86	99,95	1,21	11
Sinal 02 via 02. <i>queue</i>	49,08	100	2,71	22
Sinal 02 via 03. <i>queue</i>	49,76	100	4,37	28
Sinal 03. <i>queue</i>	61,93	124,99	2,36	21

**Fonte:** Elaborada pela autora

Tendo em vista os valores da **Tabela 8**, os próximos cenários criados terão como objetivo minimizar os valores das variáveis WTA, WTM, TTA, TTM, WTQA, WTQM, NWQA, NWQM e consequentemente aumentar ou manter o número de entidades que passaram pelo sistema – NO.

## 5.2 Cenário 01

O primeiro cenário se diferencia do real no aspecto de não possuir o tempo de 15 segundos de vermelho total, sendo este tempo adicionado aos tempos de verde do Sinal 01\_Banco Itau e Sinal 02\_Prefeitura, com 5 e 10 segundos para cada, respectivamente, a **Figura 14** ilustra a situação descrita para os tempos dos semáforos.



**Figura 14:** Tempo de ciclo do cenário 01  
**Fonte:** Elaborada pela autora

Realizada a simulação a **Tabela 9** apresenta os novos resultados. Conseguiu-se êxito nas variáveis WTA, TTA, WTQA, WTQM, NWQA, NWQM, e mantiveram-se os valores das variáveis NO, WTM, WTQM – Sinal 03, e houve um pequeno aumento das variáveis TTM e WTQA.

Como era de se esperar os resultados atingiram a maioria dos objetivos, no entanto, ainda não se pode considerar como uma situação ótima. Tendo em vista que, as filas das vias não estão balanceadas, com uma via mais sobrecarregada do que as outras.

**Tabela 9:** Quantitativos das variáveis do cenário 01

CENÁRIO 01				
NO	WTA (segundos)	WTM (segundo)	TTA (segundos)	TTM (segundos)
733 entidades	30,05	125	43,62	158,96
Filas	WTQA (segundos)	WTQM (segundos)	NWQA (entidade)	NWQM (entidade)
Sinal 01. <i>queue</i>	57,53	115	2,93	19
Sinal 02 via 01. <i>queue</i>	45,37	89,98	0,98	10
Sinal 02 via 02. <i>queue</i>	44,74	89,93	2,26	19
Sinal 02 via 03. <i>queue</i>	44,98	89,99	3,56	26
Sinal 03. <i>queue</i>	63,12	125	2,29	19

**Fonte:** Elaborada pela autora

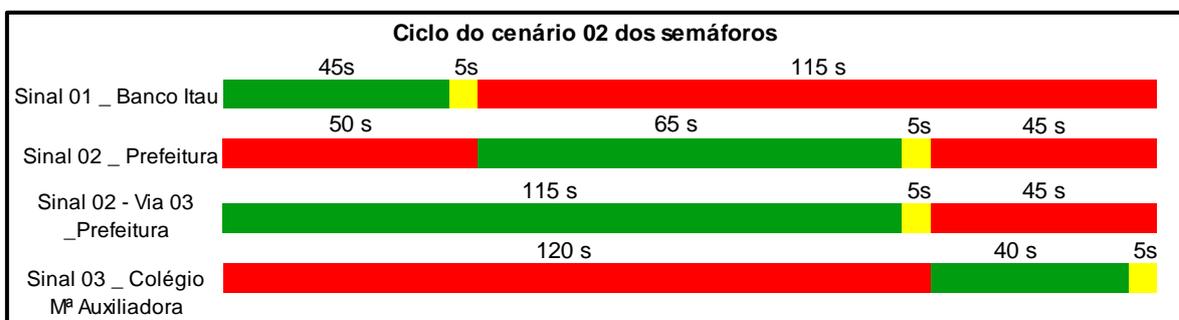
### 5.3 Cenário 02

Para o cenário 02 foi feita uma redistribuição do tempo de vermelho total, sendo acrescentado para cada semáforo 5 segundos de verde, com o tempo de ciclo permanecendo o mesmo do cenário real, observar a **Figura 15**.

Além disso, houve uma mudança com relação ao Sinal 02 via 03, sendo adicionada a interseção um semáforo que controle os tempos de sinal desta via, cogitando a possibilidade de haver abertura de sinal para esta via em dois momentos, no mesmo tempo de abertura do sinal 02\_Prefeitura e sinal 01\_Banco Itau, sem prejuízo no deslocamento dos veículos. Pois, como fluxo do Sinal 02 via 03 (ver **Figura 7**) exige apenas deslocamento para esquerda, essa condição não interferiria no fluxo da via do Sinal 01\_Banco Itau, desde que se fizesse uma restrição na faixa da esquerda na Avenida Joaquim Nabuco, para não interferir a passagem dos veículos que viessem à direita da mesma.

Para que esta mudança se efetivasse, seria requerida a retirada do ponto de ônibus que fica em frente ao Colégio Maria Auxiliadora, ponto verde ilustrado na **Figura 16**. Pois, este ponto interfere no fluxo dos veículos nos momentos de pico.

Esta mudança não seria difícil já que a menos de 200 metros existe outra parada de ônibus, na mesma avenida, e como a responsável pela organização do trânsito na cidade é a EPTTC, a mesma também tem como uma de suas competências a regulamentação das paradas de ônibus da cidade.



**Figura 15:** Tempo de ciclo do cenário 02  
**Fonte:** Elaborada pela autora

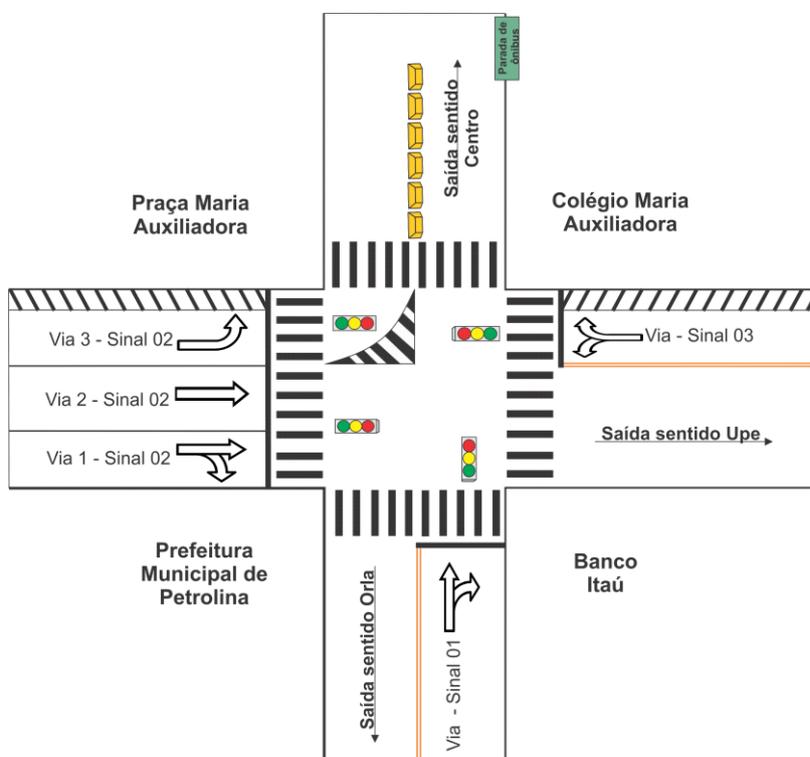
Com a simulação deste cenário, houve significativa mudança nas variáveis analisadas, como poder ser visto na **Tabela 10**.

As principais delas foram a diminuição do tempo médio de espera no sistema, aumento do número de entidades no sistema, e a queda nos valores das variáveis associadas à fila Sinal 02 via 03.

**Tabela 10:** Quantitativos das variáveis do cenário 02

CENÁRIO 02				
NO	WTA (segundos)	WTM (segundo)	TTA (seundos)	TTM (segundos)
736 entidades	23,99	119	35,36	156
Filas	WTQA (segundos)	WTQM (segundos)	NWQA (entidade)	NWQM (entidade)
Sinal 01. <i>queue</i>	57,48	114	2,96	20
Sinal 02 via 01. <i>queue</i>	48,1	94,99	1,1	12
Sinal 02 via 02. <i>queue</i>	46,98	94,99	2,55	23
Sinal 02 via 03. <i>queue</i>	22,64	44,99	0,84	15
Sinal 03. <i>queue</i>	58,79	119	2,16	18

Fonte: Elaborada pela autora



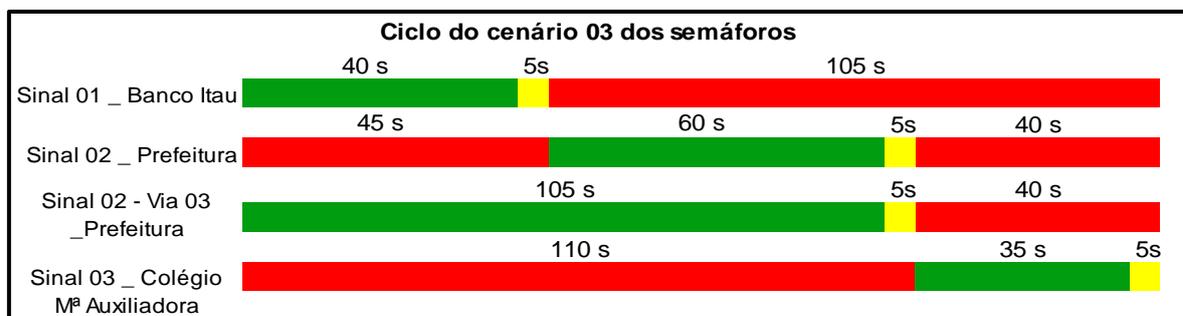
**Figura 16:** Interseção modificada para o cenário 02

Fonte: Elaborada pela autora

## 5.4 Cenário 03

Quanto ao cenário 03, este manteve a lógica de fluxo do cenário anterior, porém com o tempo de ciclo menor, no total de 150 segundos, como ilustra a **Figura 17**.

O propósito deste cenário foi de perceber como o fluxo funcionaria, mantendo os mesmos tempos de verde do cenário real, retirando os 15 segundos de vermelho total e mantendo a situação de sinal verde em dois momentos para o Sinal 02\_Via 03.



**Figura 17:** Tempo de ciclo do cenário 03

Fonte: Elaborada pela autora

Os resultados, no geral, não foram melhores que o do cenário anterior, mas, ainda superior ao cenário real, esta configuração beneficiou mais a Via Sinal 03, sendo esta via a que possuía o maior tempo de espera de todas as vias, indicado no cenário real. Como o tempo de ciclo foi reduzido isto implica num menor tempo de espera para a mesma. A **Tabela 11** expõe os resultados desta simulação.

**Tabela 11:** Quantitativos das variáveis do cenário 03

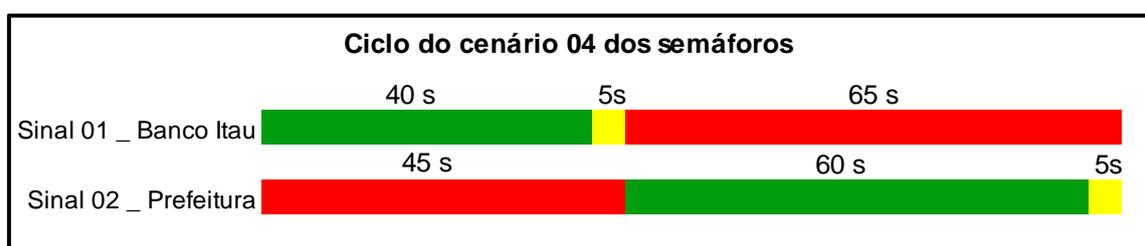
<b>CENÁRIO 03</b>				
NO	WTA (segundos)	WTM (segundo)	TTA (seundos)	TTM (segundos)
736 entidades	25,99	120	38	146
Filas	WTQA (segundos)	WTQM (segundos)	NWQA (entidade)	NWQM (entidade)
Sinal 01. <i>queue</i>	59,28	120	3,26	19
Sinal 02 via 01. <i>queue</i>	49,86	100	1,14	13
Sinal 02 via 02. <i>queue</i>	49,84	100	2,77	21
Sinal 02 via 03. <i>queue</i>	27,25	55	1,28	19
Sinal 03. <i>queue</i>	55,78	110	1,94	19

Fonte: Elaborada pela autora

## 5.5 Cenário 04

O cenário 04 representa uma modificação no sentido do fluxo da Avenida Guararapes, tornando-a de mão única, dessa forma só existiriam dois semáforos, observar a **Figura 19**.

Para esta circunstância foi reduzido o tempo de ciclo para 110 segundos, com o intuito de minimizar o tempo de espera nas filas, sem a existência do tempo de vermelho total e os tempos de verde iguais aos do cenário real (vide **Figura 18**).



**Figura 18:** Tempo de ciclo do cenário 04

**Fonte:** Elaborada pela autora

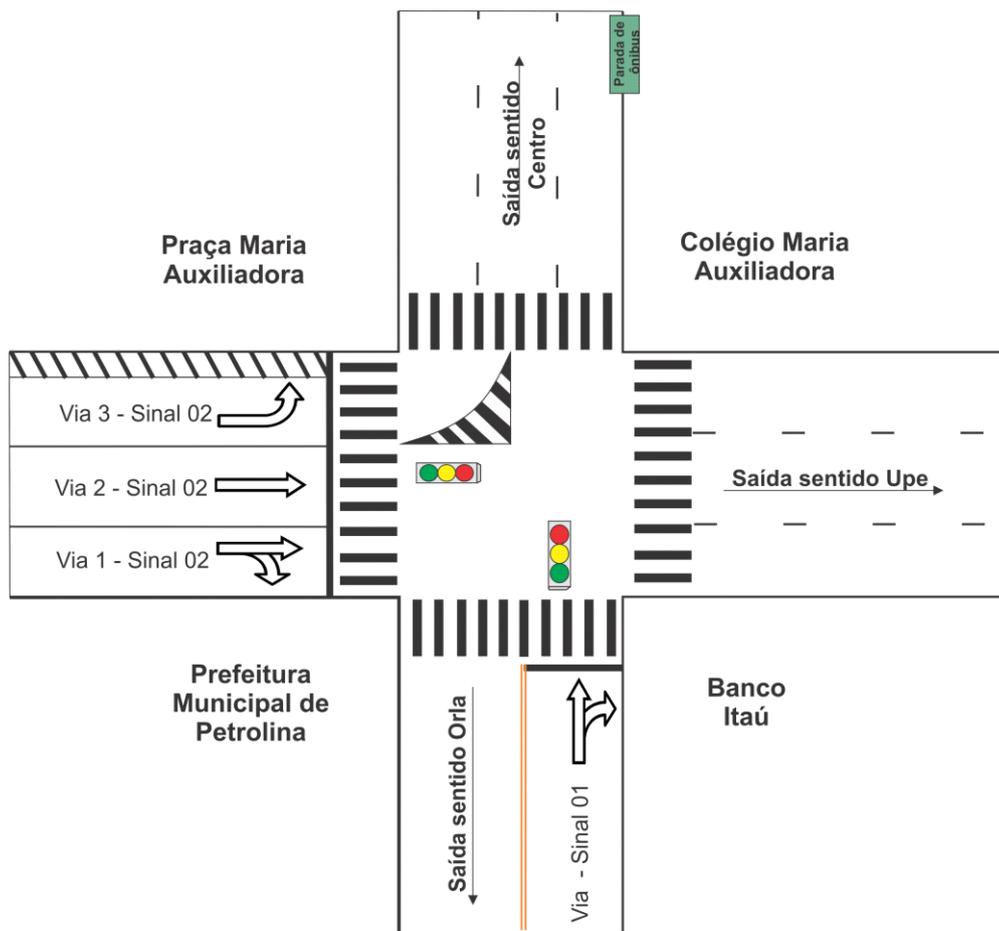
Com a simulação, os resultados foram bons comparados aos dos outros cenários, como expõe a **Tabela 12**. O número de entidades que passaram pelo sistema teve um resultado bastante positivo, pois das 642 entidades, 512 foram a soma de entidades das vias 01,02 e 03 do sinal 02, representando um aumento de 9,96% de veículos nestas vias. Para o valor deste percentual tomou-se como base o valor de 461veículos (referente ao período de 30 minutos), podendo ser deduzido da **Tabela 7**: Validação do modelo por número de veículos no sistema. Com relação às outras variáveis o valores foram ótimos, a diminuição dos tempos de esperas foi muito significativa, quanto às entidades que esperavam nas filas as reduções também foram bastante expressivas.

**Tabela 12:** Quantitativos das variáveis do cenário 04

<b>CENÁRIO 04</b>				
<b>NO</b>	<b>WTA</b> (segundos)	<b>WTM</b> (segundo)	<b>TTA</b> (seundos)	<b>TTM</b> (segundos)
642 entidades	14,14	120	23,44	147,15
<b>Filas</b>	<b>WTQA</b> (segundos)	<b>WTQM</b> (segundos)	<b>NWQA</b> (entidade)	<b>NWQM</b> (entidade)
Sinal 01. <i>queue</i>	58,93	120	3,21	20
Sinal 02 via 01. <i>queue</i>	22,43	45	0,24	7
Sinal 02 via 02. <i>queue</i>	22,78	45	0,57	12
Sinal 02 via 03. <i>queue</i>	22,13	45	0,87	16

**Fonte:** Elaborada pela autora

Entretanto, este cenário deve ser avaliado com mais precisão, pois os veículos que utilizavam a via do Sinal 03 teriam que optar pelas vias adjacentes para ir ao destino pretendido, e isto, pode acarretar problemas de congestionamento em outros locais. Mas, para atestar tal afirmação somente um estudo de maior abrangência, que simule o comportamento do tráfego num raio que englobe os pontos onde há maiores incidências de congestionamento.



**Figura 19:** Interseção modificada para o cenário 04  
**Fonte:** Elaborada pela autora

## 5.6 Comparações entre os cenários

Em síntese, todos os cenários apresentaram algum tipo de melhoria com relação à diminuição de alguma das variáveis analisadas. A **Tabela 13** exibe todos os percentuais comparativos entre os cenários elaborados com o cenário real.

Para cada variável foi feita uma marcação, para poder identificar o melhor cenário. Marcações na cor amarela nos melhores percentuais, e em específico, uma marcação na cor amarelo escuro para os percentuais do cenário 04, que será melhor explicado adiante.

**Tabela 13:** Percentuais comparativos entre os cenários criados

<b>COMPARATIVO ENTRE OS CENÁRIOS</b>					
<b>Variáveis</b>	<b>Cenário real</b>	<b>Cenário 01</b>	<b>Cenário 02</b>	<b>Cenário 03</b>	<b>Cenário 04</b>
NO	733	0,00%	0,41%	0,41%	-12,41%
WTA	34,44	-12,75%	-30,34%	-24,54%	-58,94%
WTM	124,99	0,01%	-4,79%	-3,99%	-3,99%
TTA	48,85	-10,71%	-27,62%	-22,21%	-52,02%
TTM	157,67	0,82%	-1,06%	-7,40%	-6,67%
<b>SINAL 01.QUEUE</b>					
WTQA	60,39	-4,74%	-4,82%	-1,84%	-2,42%
WTQM	120	-4,17%	-5,00%	0,00%	0,00%
NWQA	3,22	-9,01%	-8,07%	1,24%	-0,31%
NWQM	21	-9,52%	-4,76%	-9,52%	-4,76%
<b>SINAL 02 VIA 01.QUEUE</b>					
WTQA	49,86	-9,01%	-3,53%	0,00%	-55,01%
WTQM	99,95	-9,97%	-4,96%	0,05%	-54,98%
NWQA	1,21	-19,01%	-9,09%	-5,79%	-80,17%
NWQM	11	-9,09%	9,09%	18,18%	-36,36%
<b>SINAL 02 VIA 02.QUEUE</b>					
WTQA	49,08	-8,84%	-4,28%	1,55%	-53,59%
WTQM	100	-10,07%	-5,01%	0,00%	-55,00%
NWQA	2,71	-16,61%	-5,90%	2,21%	-78,97%
NWQM	22	-13,64%	4,55%	-4,55%	-45,45%
<b>SINAL 02 VIA 03.QUEUE</b>					
WTQA	49,76	-9,61%	-54,50%	-45,24%	-55,53%
WTQM	100	-10,01%	-55,01%	-45,00%	-55,00%
NWQA	4,37	-18,54%	-80,78%	-70,71%	-80,09%
NWQM	28	-7,14%	-46,43%	-32,14%	-42,86%
<b>SINAL 03.QUEUE</b>					
WTQA	61,93	1,92%	-5,07%	-9,93%	-
WTQM	124,99	0,01%	-4,79%	-11,99%	-
NWQA	2,36	-2,97%	-8,47%	-17,80%	-
NWQM	21	-9,52%	-14,29%	-9,52%	-

Fonte: Elaborada pela autora

Os percentuais negativos na **Tabela 13** expressam um decréscimo nos valores das variáveis estudadas, e estes decréscimos eram esperados, uma vez que, para melhorar o cenário real, as variáveis estudadas deveriam ter seus valores reduzidos para apresentar um quadro melhorado para o fluxo da interseção. A única variável que se esperava resultados positivos era a NO.

A indicação do melhor cenário conforme os dados registrados da **Tabela 13** é o **cenário 04**, ele apresentou os melhores resultados entre todos os cenários e poderia ser indicado como a melhor opção de alteração para a interseção, contudo, esta configuração exigiria um estudo sobre o fluxo das vias adjacentes, já que as mesmas absorveriam o fluxo desfeito do Sinal 03\_Colégio M<sup>a</sup> Auxiliadora.

Dessa forma, este trabalho acentua os resultados do **cenário 02**, pois considera uma situação balanceada, dentre os três primeiros cenários, apresentando uma mudança viável para interseção, sem interferências significativas nas vias próximas. Isso se configura pelo mesmo ter tido um aumento de 0,41% do *number out*, por ter reduzido em 30,34% e 4,79% o tempo médio e máximo de espera das entidades no sistema (*WTA*, *WTM*), respectivamente, pelo tempo total médio das entidades no sistema ter tido uma redução de 27,62% (*TTA*).

Os resultados do **cenário 02** para cada formação de fila teve os seguintes percentuais para as variáveis:

- Para a fila do Sinal 01 as variáveis *WTQA* e *WTQM* tiveram queda significativa de -4,82% e -5%, respectivamente, as outras variáveis tiveram reduções, porém, não tão significativas como as obtidas por outro cenário;
- Para a fila do Sinal 02 Via 01 os resultados obtidos foram o segundo melhor, havendo reduções de três variáveis: *WTQA*, *WTQM* e *NWQA*;
- Para a fila do Sinal 02 Via 02 os resultados foram similares aos da Via 01 do mesmo sinal;
- Com relação à fila do Sinal 02 Via 03, esta teve o melhor resultado, para todas as variáveis relacionadas e entre os três primeiros cenários, com queda em todos os percentuais, e;
- Para a última fila do Sinal 03 a variável que apresentou o melhor valor foi a *NWQM* queda de 14,29%. As demais variáveis tiveram a segunda melhor redução dos três cenários.

Todos os percentuais são comparativos com o cenário real.

## 6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho de monografia teve como propósito desenvolver um modelo computacional para uma interseção semaforizada na cidade de Petrolina – PE, sendo escolhida a interseção que apresentava o maior fluxo de veículos do centro da cidade, conforme informação da EPTTC.

Para estudar esta interseção utilizou-se a simulação computacional como ferramenta de análise para avaliar e propor as melhorias para o fluxo de veículos. Com o auxílio do *software* Arena 13.9, o modelo computacional pôde ser executado e simulado.

Em face disto, seguiu-se uma metodologia bastante recomendada, criou-se cenários, a partir deles alternativas de tempo de ciclo e adaptações nas vias foram sugeridas, a fim de minimizar as variáveis que se pretendia, para desta forma identificar um melhor cenário.

O cenário 4 foi identificado como o melhor, com a ressalva de ser melhor estudada as interferências que causariam as vias próximas a interseção. A recomendação, para fins de implementação, seria do “segundo” melhor, o cenário 2, pois as mudanças seriam totalmente possíveis, por não requererem muita interferência no que já existe hoje. Se fosse realizado o procedimento de implementação os custos seriam baixos, pois as alterações basicamente seriam a reprogramação do tempo de ciclo, uma adaptação na Av Joaquim Nabuco, com a colocação de gelo baiano para restringir o acesso da faixa da esquerda e a adição de um semáforo para controlar a via 03 da Av Guararapes.

Portanto, recomenda-se que os próximos trabalhos analisem os outros horários de picos, para observar o comportamento do fluxo no período de um dia. E assim fazer análises mais profundas e detalhadas sobre as interseções semaforizadas.

No que se referem às mudanças propostas pelos cenários, já seria possível um melhoramento no fluxo de veículos das vias, porém, ainda não se pode considerar como uma solução ótima a longo prazo, pode se dizer que é uma medida paliativa, pois o fluxo da cidade cresce a cada ano.

Toda esta situação implica na necessidade de um estudo mais aprofundado sobre o tráfego no centro da cidade, pois, corrigir o

dimensionamento do tempo de ciclo de uma interseção pode mudar apenas o problema de local ou interseção. O mais indicado seria um estudo de simulação do conjunto de todas as interseções semaforizadas do centro da cidade, aplicando a mesma metodologia que foi utilizada nesta interseção ou adaptando-a, para que as decisões fossem tomadas com base na avaliação e observação dos impactos decorrentes das mudanças sugeridas nos cenários criados. Utilizar a programação matemática para identificação do melhor tempo de ciclo para as interseções estudadas.

Assim, um estudo com maior embasamento de dados poderia sugerir alterações significativas a longo prazo, e além disso, poderia se estudar a viabilidade econômica dessas alterações, fazer uma análise de custo/benefício uma vez que um engenheiro de produção é apto a analisar questões desta natureza.

## REFERÊNCIAS

ABEPRO. **Áreas e Sub-áreas de Engenharia de Produção**, 2008. Disponível em: <<http://www.abepro.org.br/interna.asp?p=399&m=424&ss=1&c=362>>. Acesso em: 11 set. 2011.

ALTIOK, Tayfur; MELAMED, Benjamin. **Simulation Modeling and Analysis with Arena**. Burlington: Elsevier, 2007.

ANDRADE, Eduardo Leopoldino de. **Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para análise de decisões**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

ANDRADE, Maria Margarida de. **Introdução à metodologia do trabalho científico**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

ARAUJO, Marco Antonio de. **Administração de produção e operações: uma abordagem prática**. Rio de Janeiro: Brasport, 2009, p.335.

ARENALES, Marcos; et al. **Pesquisa operacional: para cursos de engenharia**. 1. ed. São Paulo: Campus, 2006.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Engenharia de Tráfego – Terminologia – NBR 7032**. Rio de Janeiro, 1983.

BANKS, Jerry. **Handbook of Simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice**. Atlanta: Wiley-interscience publication, 1998.

BARROS, Aidil Jesus da Silveira; LEHFELD, Neide Aparecida de Souza. **Fundamentos de metodologia científica: um guia para a iniciação científica**. 2. ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 2000.

BRASIL. **Código de trânsito brasileiro: Lei n. 9.503, de 23 de setembro de 1997, a legislação correlata**. 3. ed. Brasília: Câmara dos Deputados, Coordenação de Publicações, 2008. 207 p.

CERVO, Amado L.; BERVIAN, Pedro A.; SILVA, Roberto da. **Metodologia científica**. 6 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

CHWIF, Leonardo. **Redução de modelos de simulação de eventos discretos na sua concepção: uma abordagem casual**. 1999, 151 f. Tese – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

DETRAN-PE. **Estatísticas atuais**. Disponível em: [http://www.detran.pe.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=36&Itemid=72](http://www.detran.pe.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=36&Itemid=72). Acesso em: 18 jul. 2012.

**Diário da região:** Petrolina a cidade do “vale”. Disponível em: <<http://www.odiariodaregiao.com/petrolina-a-cidade-do-%E2%80%9Cvale%E2%80%9D/>>. Acesso em 22 maio. 2012.

EJZENBERG, Sergio. **Reprogramação de semáforos:** Método baseado em observação de campo. NT 174/94. Companhia de engenharia de tráfego. São Paulo, 1994. Disponível em: < <http://www.cetsp.com.br/media/20683/nt174.pdf>>. Acesso em 12 nov. 2012.

EPTTC, Empresa Petrolinense de Trânsito e Transporte Coletivo. **Manual de dados estatísticos.** 2012.

FHWA, Federal Highway Administration. **Manual on uniform traffic control devices (MUTCD)** – for streets and highways, 2008. Publicação número: FHWA – HOP – 08-204, Washington, D.C., EUA, 2008.

FERRÃO, Romário Gava. **Metodologia científica para iniciantes em pesquisa.** Linhares: Unilinhares/Incaper, 2003.

FIORONI, Marcelo Moretti. **Simulação em ciclo fechado de malhas ferroviárias e suas aplicações no Brasil:** avaliação e alternativas para o direcionamento de composições. 2008. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

FITZSIMMONS, James A; FITZSIMMONS, Mona J. **Administração de serviços:** operações, estratégias e tecnologia da informação. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

FREITAS FILHO, Paulo José de. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas:** com aplicação em arena. 2. ed. Florianópolis: Visual Books, 2008.

FORNACIARI, Isabela Aparecida. **Investigações no campo da programação semafórica.** 2010. 134 f. Dissertação (Mestre em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

G1. **Trânsito fica cada vez mais complicado nas grandes cidades.** Disponível em: <<http://g1.globo.com/Noticias/Brasil/0,,MUL1126675-5598,00-TRANSITO+FICA+CADA+VEZ+COMPLICADO+NAS+GRANDES+CIDADES.html>>. Acesso em: 15 set. 2011.

GAVIRA, Muriel de Oliveira. **Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento.** 2003. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOLDNER, Lenise Grado. **Engenharia de Tráfego: 1º modulo.** Departamento de Engenharia Civil. 2008.

HARREL, Charles R.; GHOSH, Biman K.; BOWDEN, Royce. **Simulation Using Promodel.** New York: McGraw-Hill Higher Education, 2000.

KELTON, W. David; SADOWSKI Rondall P.; SWETS, Nancy B. **Simulation with Arena.** 5. ed. New York: McGraw–Hill, 2009.

LACHTERMACHER, Gerson. **Pesquisa Operacional na tomada de decisões: modelagem em excel.** 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

LEITE, José Geraldo Maderna. **Engenharia de Tráfego: Métodos de Pesquisa, características de Tráfego, Interseções e Sinais Luminosos.** 1980. 362 f. São Paulo: Companhia de Engenharia de Tráfego-CET,1980.

MAIA JUNIOR, Humberto. De helicóptero é mais barato. **Revista Exame:** Edição 1015. Ano 46 N.: 8. 2 de maio de 2012.

MARCONI, Mariana de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica.** 6. ed. São Paulo: Atlas, 2005.

MOREIRA, Daniel Augusto. **Administração da produção e operações.** 2. ed. São Paulo: Cengage learning, 2011.

MUNIZ, Leandro Reis. **Aplicação da simulação computacional para análise do tráfego do cruzamento central da cidade histórica de Marina – MG.** 2008. 97 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

OLIVEIRA, Clênio Senra de. **Metodologia para utilização de simulação em projetos de manufatura enxuta.** 2008, 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

PRADO, Darci Santos do. **Usando o arena em simulação.** 3. ed. Belo Horizonte: INDG, 2003.

REIS, Linda G. **Produção de monografia: da teoria à prática.** 2. ed. Brasília: Senac-DF, 2008.

RIBEIRO, F. R. **Modelo de simulação para análise operacional de pátios de aeroportos.** 2003, 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

ROZESTRATEN, Reinier Johannes Antonius. **Psicologia do Trânsito: conceitos e processos básicos.** São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária e Editora da Universidade de S. Paulo, 1988.

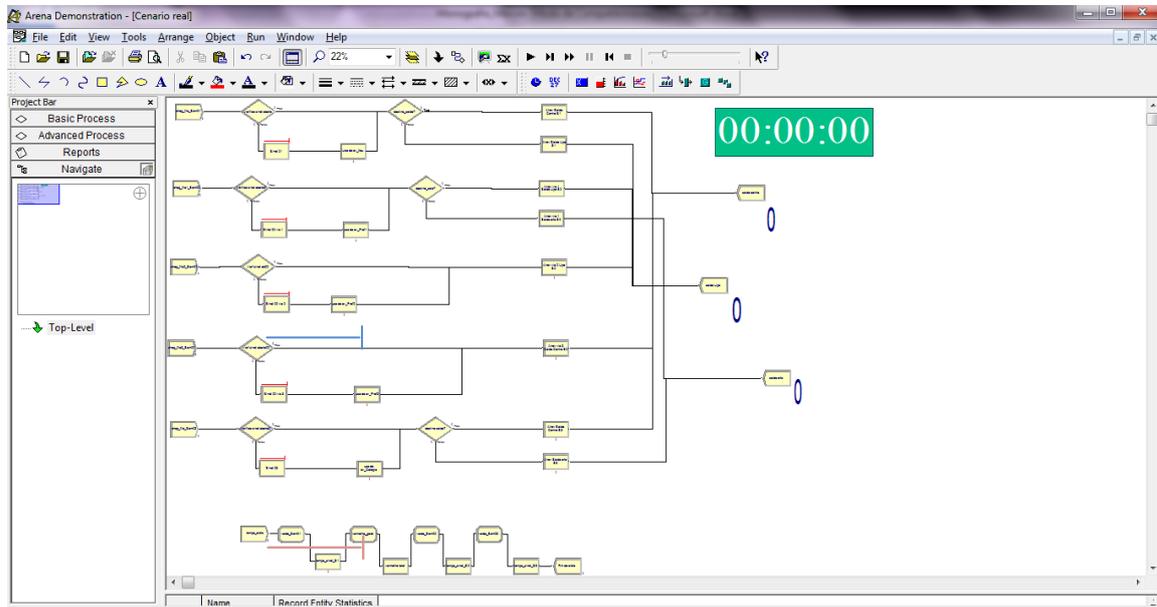
SETTI, Jose Reynaldo Anselmo. **Tecnologia de transporte**. 2002, 214 f. Tese. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

SILVA, Ermes Medeiros da; et al. **Pesquisa Operacional: programação linear, simulação**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

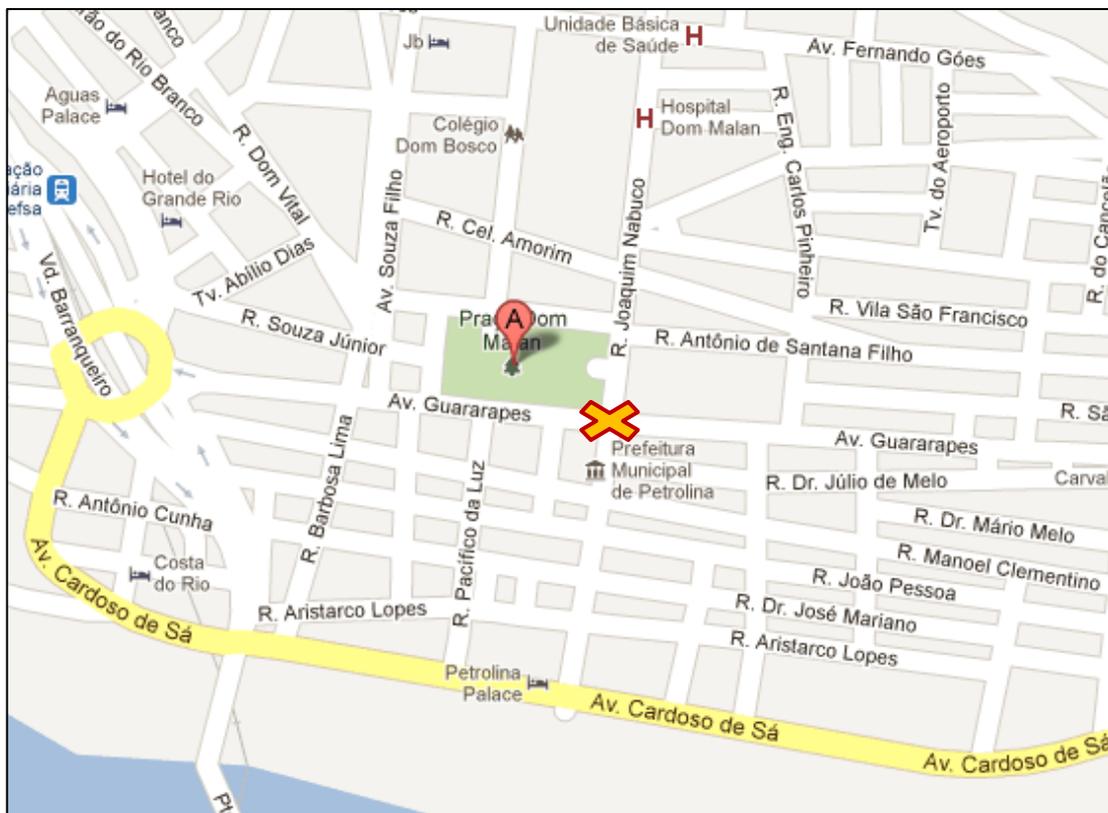
TRINDADE FILHO, Héliqio Henrique. **Análise comparativa do potencial de sistemas centralizados para controle de tráfego no Brasil**. 2002, 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

TORGA, Bruno Lopes Mendes. **Modelagem, simulação e otimização em sistemas puxados de manufatura**. 2007, 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá.

# ANEXO



**Figura 20:** Modelo computacional da interseção semaforizada simulado na Arena 13.9  
**Fonte:** Elaborada pela autora



**Figura 21:** Imagem do Google maps da interseção semaforizada representada por um x  
**Fonte:** Google maps acessado 08.10.2012 as 20h14



**Figura 22:** Software contador dos tempos  
**Fonte:** Elaborada pela autora