



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Desenvolvimento de Modelos e Estratégias de Controle para um Sistema Viário

Prof. Orientador:
Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi

Autor:
Fábio Hatsushika Itano

Dezembro de 1997

*Aos meus pais por todo o apoio durante meus estudos
e aos meus amigos Maria Cristina, Cláudio e Jussara*

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi pela ajuda e orientação constante em todos os momentos da realização do trabalho de formatura.

A prof. Cristina T. Motohashi Matsuzaki pelo curso de ProModel, essencial para elaboração do projeto.

Ao prof. Diolino José dos Santos Filho, pelas diretrizes e sugestões para elaboração do modelo básico.

Aos meus amigos da Mecânica e Mecatrônica.

ÍNDICE

<u>RESUMO</u>	1
<u>1. INTRODUÇÃO</u>	2
1.1 MOTIVAÇÃO	2
1.2 JUSTIFICATIVA	3
1.3 OBJETIVO	6
<u>2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS</u>	7
2.1 SISTEMAS DE TRÁFEGO	7
2.2 SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS	8
2.3 REDES DE PETRI	10
2.3. SIMULAÇÃO	11
<u>3. METODOLOGIA E SUBSISTEMA OBJETO</u>	15
3.1 DEFINIÇÃO DO SISTEMA A SER MODELADO	17
<u>4. MODELAGEM DO SISTEMA</u>	19
4.1 MODELAGEM EM REDES DE PETRI	19
4.2 MODELAGEM VIA PROMODEL	21
<u>5. ANÁLISE DO SISTEMA POR SIMULAÇÃO</u>	24
<u>6. CONCLUSÃO</u>	32
<u>ANEXO 1</u>	34
<u>ANEXO 2 - LISTAGEM DO PROGRAMA</u>	49

Resumo

O sistema viário nas grandes cidades é um problema sócio-econômico que aparentemente ainda não tem solução técnica satisfatória.

Por outro lado, teorias como a rede de Petri têm demonstrado sua eficácia na modelagem e controle de uma classe de sistemas denominados como sistemas a eventos discretos.

Assim, o presente trabalho investiga uma forma de caracterizar os sistemas viários como sistemas a eventos discretos para assim estudar as estratégias de controle. Inicialmente procurou-se caracterizar os subsistemas representativos do sistema viário urbano de uma cidade, ou seja, foi realizado o levantamento dos principais elementos do sistema de tráfego e a partir de então foi selecionado uma das partes que envolvesse as variáveis mais importantes que influem na dinâmica do tráfego: no caso, um cruzamento de avenidas. Definido este subsistema e caracterizando-o como sistema a eventos discretos, foi realizada a sua modelagem baseada na técnica de Redes de Petri para especificação da estrutura e dinâmica do subsistema. A seguir foram realizados testes para verificação e análise do modelo. Estratégias de controle foram, então, propostas e avaliadas através da simulação do modelo. Nessa fase, o modelo em Rede de Petri foi convertido para se utilizar um software de simulação comercial (ProModel) com recursos de animação e otimização dos parâmetros, facilitando assim a interface com o projetista.

1. Introdução

1.1 Motivação

Através de uma análise rápida das últimas estatísticas populacionais, publicadas a cada dois anos, pode-se notar uma tendência de crescimento da população mundial [TRA76-]. Simultaneamente a isso, houve uma crescente mecanização da agricultura nos últimos anos e com isso, houve deslocamento da população rural em direção aos grandes centros urbanos [ADO93-].

Concomitantemente a esse crescimento mundial, a população brasileira também cresce a ritmo acelerado. Tal crescimento pode ser verificado, sobretudo nos grandes centros urbanos [IBG97-].

Tal situação aliada à existência de um sistema ineficiente e, portanto, ineficaz, de transportes públicos coletivos, faz com que as pessoas tenham como única opção a utilização de veículos particulares para se locomoverem nas cidades [CET97-]. Assim, com o aumento da população urbana, há também, o aumento da quantidade de veículos. Nesse sentido, o trânsito de veículos fica mais complexo e intenso, reduzindo a velocidade média de circulação dos veículos [CET97-].

Para resolver esse problema, ou seja, reduzir os congestionamentos, várias medidas são propostas [ANP95-]. Entre elas, destaca-se as que envolvem alterações no espaço físico das principais ruas e avenidas, como, por exemplo, aumentando-se o número de faixas transitáveis.

Outra medida também relacionada à alteração do espaço físico refere-se à construção de novas ruas e avenidas, com o objetivo de melhorar o fluxo de veículos com a disponibilidade de novas vias de tráfego.

Tais medidas aparentemente são simples. Entretanto, elas se deparam com dois grandes inconvenientes: o custo geralmente elevado e a inviabilidade física/técnica e econômica em alguns casos.

A construção de uma nova via, por mais simples que ela seja, envolve custos para a construção em si da via (gastos com terraplanagem, pavimentação, sinalização e outros) e também gastos com a aquisição do terreno onde será construída a via. Em muitos casos, existem construções no local e assim é necessário considerar a desapropriação, o que gera gastos muito superiores ao valor do terreno.

Outra questão da inviabilidade acontece, quando a localização da rua ou avenida, impõe por si só uma restrição física para solução do problema de tráfego de veículos. Por exemplo, no caso da Avenida Paulista na cidade de São Paulo, mesmo desconsiderando-se o custo de aquisição de uma parte dos terrenos de cada lado da avenida para construção de uma faixa viária extra, seria praticamente impossível conceber uma solução física, técnica e econômica para a retirada de apenas uma fatia de cada um dos seus inúmeros prédios para construção dessa faixa adicional.

Há ainda outros problemas da construção de uma nova via ou avenida. Em vários casos é preciso levar em consideração o aspecto sociocultural. Por exemplo, em geral as pessoas ficam no mínimo constrangidas diante da perspectiva de desapropriações de cemitérios, igrejas e outros símbolos socioculturais para a construção dessa faixa adicional.

Por outro lado, a sociedade solicita fortemente o estudo de alternativas que evitem a necessidade de desapropriar uma cemitério, derrubar uma igreja ou mesmo destruir um monumento para construção de uma nova via.

1.2 Justificativa

De acordo com a situação descrita anteriormente e a natureza multidisciplinar e complexa de um sistema de tráfego de veículos é evidente que o problema de controle do trânsito não é trivial. De fato pelos resultados e situações presentes nas cidades como São Paulo, apontados pelos técnicos do Companhia de Engenharia de Tráfego [CET97-] considera-se plenamente justificado o estudo de novas alternativas para se melhorar o tráfego dos veículos das grandes cidades, que não se restrinja às soluções citadas anteriormente.

Existe evidentemente grande interesse em encontrar soluções mais econômicas e que possam ser implementadas sem que haja necessariamente ocupação de novos espaços físicos, uma vez que, a ocupação de novas áreas envolve problemas sócio-econômicos e até culturais em alguns casos, como citado anteriormente.

O problema é, evidentemente, bastante complexo, e para sua análise não existe uma técnica de modelagem consagrada, ou seja, de efetividade comprovada para todas as situações e problemas que envolvem o tráfego de veículos. Há diversas pesquisas em andamento, mas nenhuma com efetividade comprovada [WSC95-].

Além disso, como na maioria das vezes os projetos sugeridos para otimizar o tráfego de veículos são complexos e envolvem altos investimentos [PIZ95-], acarretando em elevados gastos dos cofres públicos, é necessário que se tenha disponível uma técnica que permita testar e analisar em detalhes a solução proposta, antes que a mesma seja implementada.

1.3 Objetivo

Para explicitar o problema do tráfego intenso de veículos nos grandes centros urbanos, considerando por exemplo a cidade de São Paulo. Esse números, segundo estimativa da CET, Companhia de Engenharia de Tráfego da Prefeitura de São Paulo , responsável pelo tráfego na região metropolitana da cidade, alcança a grandeza de centenas de vias [CET97-].

Logo, em virtude da complexidade elevada e da limitação temporal no contexto do presente trabalho *, o projeto proposto tem por objetivo desenvolver o modelo de somente uma parte representativa do sistema viário de uma cidade brasileira para então estudar técnicas de análise e validação de diferentes estratégias de controle.

As principais hipóteses adotadas são as de que o sistema viário pode ser considerado um sistema a eventos discretos (SED) [MIY96-] e a sua otimização pode ser obtida por regras de despacho adequadas. Assim, pretende-se verificar que adaptações devem ser consideradas para utilizar as técnicas de controle e modelagem existentes na área de sistemas de manufatura para o caso do tráfego urbano.

* trabalho acadêmico da disciplina de Graduação em Engenharia Mecânica PMC-580 Projeto Mecânico I e PMC-581 Projeto Mecânico II, no período de 03/1997 à 12/1997

2. Conceitos Fundamentais

2.1 Sistemas de tráfego

O sistema de tráfego de veículos corresponde ao conjunto de vias, nas quais os veículos se movimentam, bem como as regras reguladoras desse movimento. [CAS95]

Ou seja, o sistema de tráfego é formado pelas ruas, avenidas, marginais, túneis, viadutos e pelas regras de trânsito.

O sistema de tráfego é de fundamental importância para o desenvolvimento e subsistência de um país. É através dele que se torna possível o transporte de mercadorias e pessoas, os quais são os principais agentes da economia. [WEL93]

A importância do sistema de tráfego pode ser sintetizada através da frase de Marc Wiel, “.... o motor da transformação da cidade não é somente o crescimento demográfico, dado que também está a mobilidade...”. [CAS95-]

2.2 Sistemas a Eventos Discretos

O sistema a eventos discretos é um sistema no qual as mudanças de estado ocorrem em instantes discretos e de modo instantâneo. Costuma-se situar os sistemas discretos em oposição aos sistemas contínuos.[CAR97-]

O conceito de SED (Sistemas a Eventos Discretos) envolve uma tecnologia que, num sistema produtivo industrial é tão importante quanto o conceito de SVC (sistemas de variáveis contínuas). Entretanto, apesar da grande experiência acumulada nas aplicações práticas, a sistematização e a base teórica de SED ainda são muito incipientes se comparadas às de SVC. [MIY96-]

São sistemas a eventos discretos, aqueles que são modelados de tal sorte que as variáveis de estado variam bruscamente, em instantes determinados e cujos valores das variáveis nos estados seguintes podem ser calculados diretamente a partir dos valores precedentes e sem ter que considerar o tempo de variação entre esses dois estados.[CAR97-].

No presente trabalho considera-se a seguinte abordagem: o semáforo possui estados bem definidos (aberto ou fechado) em função da ocorrência de eventos discretos, os veículos também podem ter 2 estados (em movimento ou parado) e as vias estão ocupadas ou livres.

Assim, o sistema de tráfego foi considerado um sistema a eventos discretos, uma vez que os semáforos podem ser considerados variáveis de estado, que mudam entre os estados vermelho, amarelo e verde em instantes determinados, em conformidade com o estado anterior. E, neste contexto, o fluxo de veículos e estado

das vias também foram considerados como elementos do sistema com estados discretos que são alterados pela ocorrência de algum evento.

2.3 Redes de Petri

A Rede de Petri [CAR97-] é uma técnica de representação de sistemas a eventos discretos. A rede de Petri é efetiva para representar os componentes ativos e passivos de um sistema [MIY96-].

O passo inicial é classificar os componentes do sistema em ativos e passivos. Os componentes passivos podem armazenar itens e/ou torná-los visíveis. Eles podem assumir diferentes estados e são referidos como distribuidores.

Já os componentes ativos são capazes de produzir, transportar ou alterar itens.

Os componentes passivos são representados por círculos e os ativos por retângulos (ou barras) conforme mostrado na tabela 2.1, a qual também apresenta a interpretação adotada para o caso do problema em estudo neste trabalho.

Tabela 2.1 Elementos da Rede de Petri

Rede de Petri	Interpretação para sistemas de tráfego
elemento passivo	estado do semáforo ou via
elemento ativo	mudança de estado do semáforo
Item	marca que indica o estado do sistema
arco orientado	Representa o caminho por onde percorrem as marcas (veículos ou estado de partes do sistema)

2.3.Simulação

Um vez estabelecido o modelo descrito através das técnicas de Rede de Petri, o passo seguinte é a representação em um software de simulação comercial. Para tanto foi selecionado o ProModel, um software de simulação fabricado pela Promodel Corporation.[PRO95-]

A escolha pelo ProModel ocorreu em virtude da grande utilização desse software para simulação de sistemas. O ProModel possui uma interface gráfica que permite representar o sistema de tráfego de veículos, além de emitir gráficos e relatórios contendo informações sobre as diversas variáveis envolvidas no processo

Simulação corresponde a uma técnica de experimentação sobre um modelo descreve a operação do sistema que se deseja estudar.[SEI95-]

Pretende-se através da utilização de técnicas de simulação comparar várias alternativas de composição e operação do sistema, obtendo-se assim, por avaliações destes dados que indiquem a melhor estratégia de controle dentre as alternativas propostas.

A grande vantagem apresentada pelas técnicas de simulação é que a mesma permite simular a operação de uma determinada estratégia de controle proposta, sem que haja necessidade de implementá-la e num tempo real significamente menor, ou seja, caso o sistema fosse implementado na prática a avaliação normalmente pode dispensar vários dias ou até meses em alguns casos.[SEI95-]

Assim pode-se comparar diversas alternativas de controle com relativa facilidade, uma vez que o simulador permite testar e avaliar um número elevado de alternativas, sem custos e num intervalo de tempo curto.

No entanto para que sejam obtidos resultados confiáveis, deve-se ter simulações que envolvam vários ciclos de operação do sistema. [SEI95-] Nesse sentido, torna-se necessário o uso de computadores, com o qual se pode obter grande quantidade de amostras. [SEI95-]

O modelo em geral se constitui de uma lógica de seqüenciação de ocorrências e de relações funcionais entre as variáveis envolvidas .

A lógica de seqüenciação de ocorrências no presente caso: corresponde à seqüência de operações adotadas para o modelo proposto. No caso em questão, trata-se do seqüenciamento de abertura e fechamento dos semáforos, o qual permite a passagem ou não dos veículos nas diversas vias do modelo.

Para se obter um simulador confiável, deve-se seguir as etapas do fluxograma apresentado na figura 2.1:

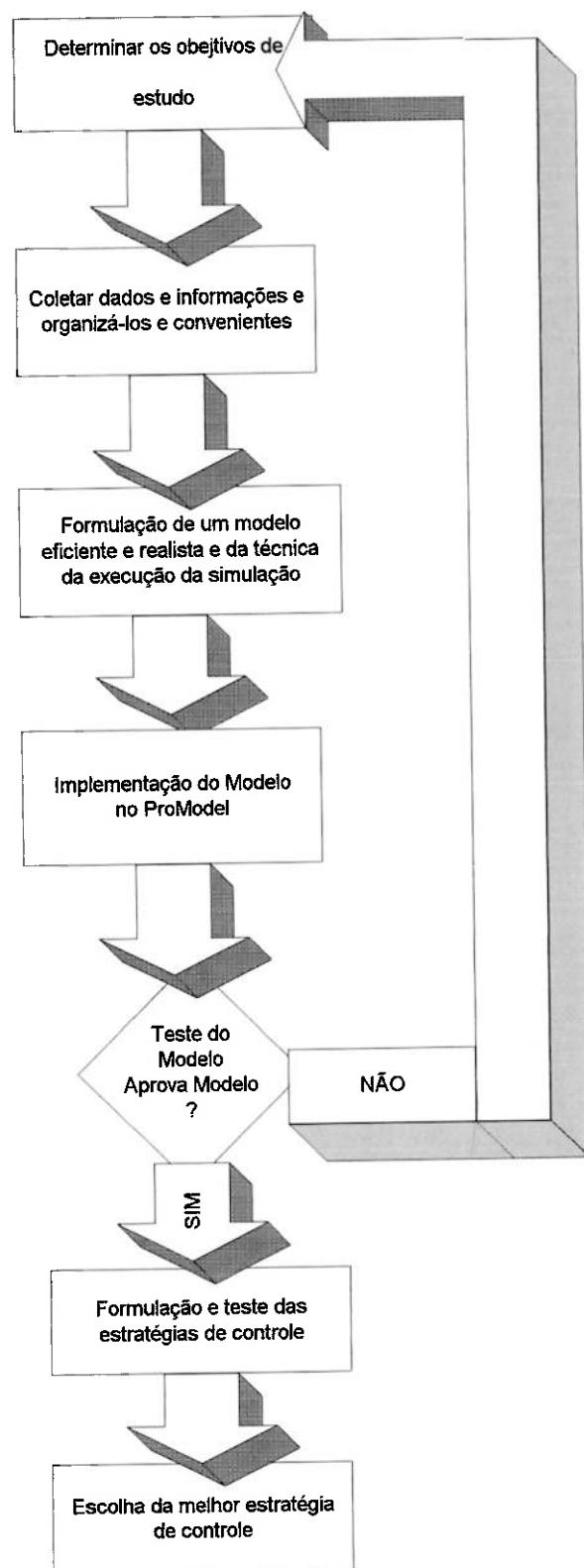


fig.2.1 Fluxograma: etapas para simulação do sistema

O fluxograma da figura 2.1 deve ser interpretado da seguinte maneira: inicialmente deve-se realizar um pré-estudo do sistema a ser estudado. Nessa etapa são levantados os dados que se pretende obter com a simulação do modelo, como por exemplo, pode-se desejar ao final da simulação, que o modelo mostre a quantidade média de veículos que ficam aguardando o semáforo abrir.

O passo seguinte é a coleta de dados e informações de um sistema de tráfego normal para colocá-los no modelo de modo que se manipule e opere com dados reais, conseguindo com isso, a formulação de um modelo eficiente e realista da técnica da execução da simulação.

Uma vez determinado o modelo, o próximo passo é a implementação numa ferramenta computacional, no caso o ProModel. Uma vez implementado, verificou-se se o modelo está correto, ou seja, por exemplo, se os carros não colidem um com outro, ou se os semáforos estavam coordenados entre si, de maneira que carros provenientes de ruas adjacentes não podem passar pelo mesmo cruzamento no mesmo momento.

Uma vez constatado que não havia problemas no comportamento básico do sistema, o passo seguinte é a formulação e teste das estratégias de controle. São consideradas neste trabalho as estratégias de controle, como alteração dos tempos de chaveamento dos semáforos.

Com o resultado obtido a partir das diferentes estratégias de controle, são comparados os diversos resultados e escolhida a melhor estratégia.

3. Metodologia e Subsistema Objeto

No projeto básico realizou-se o estudo e o levantamento das características do sistema ou sub-sistema a ser estudado. A tarefa envolveu a proposta de diversas opções (estruturas físico-funcionais de sistemas ou sub-sistemas de tráfego de veículos e a comparação das mesmas).

As opções consideradas foram:

- via sem semáforos;
- via com vários semáforos ;
- cruzamento de avenidas;

A primeira alternativa foi proposta pois ela representa uma parcela bastante significativa das ruas da cidade de São Paulo, segundo apontou a própria Companhia de Engenharia de São Paulo.

A segunda alternativa representa uma estrutura muito comum e é um fator agravante para o problema de tráfego da cidade de São Paulo.

A terceira alternativa é uma estrutura que é considerada como um dos principais agravantes do tráfego da cidade de São Paulo, de acordo com a Companhia de Engenharia de Tráfego CET.e, que por sua vez, incorpora os problemas da primeira alternativa (caso especial onde o cruzamento só deixa fluir uma das vias) e da Segunda alternativa (que se compõe de uma seqüência de cruzamentos).

Uma vez escolhido o sub-sistema que, nesse caso, é o cruzamento de avenida, pela sua relativa complexidade e representatividade dos problemas característicos de um sistema de tráfego, foram desenvolvidos os modelos conceituais utilizando a técnica da rede de Petri.

A meta foi estudar técnicas de modelagem e desenvolvimento de modelos simbólicos, os mais genéricos possíveis, que permitissem descrever as estratégias de controle através de uma analogia funcional, utilizando alguma ferramenta computacional.

A escolha da ferramenta para modelagem e simulação mais apropriada envolveu a definição de critérios de desempenho.

Desenvolvido o modelo, a fase seguinte do projeto consiste em analisar e verificar a qualidade das estratégias de controle elaboradas.

O modelo desenvolvido em Rede de Petri deve ser devidamente traduzido para ser implementado em um simulador comercial de sistemas (por questões de disponibilidade, o software de simulação comercial utilizado é o Promodel, versão 3.0 for Windows ®, disponível no Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP).[PRO95-]

3.1 Definição do Sistema a ser Modelado

Um elemento crítico para o controle de sistemas de tráfego corresponde aos cruzamentos. Assim foi selecionado o cruzamento típico, ilustrado na fig 3.1 para modelagem:

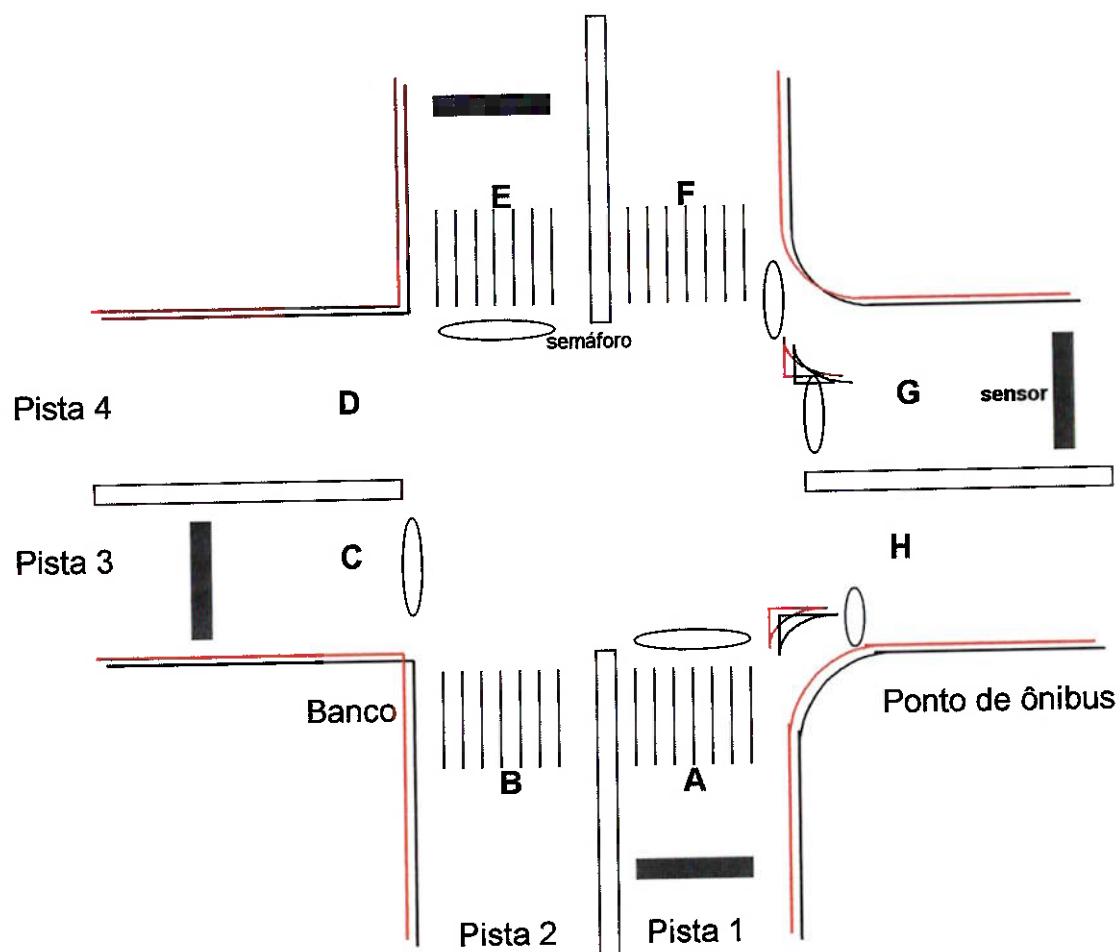


figura 3.1 Sistema a ser modelado

Admite-se para este caso que há apenas tráfego de veículos de passeio (são considerados veículos de passeio - os veículos automotores de até 5 passageiros) e ônibus (veículos automotores com capacidade máxima de 40 passageiros). Não se prevê o tráfego de caminhões (veículos automotores destinados ao transporte de carga), afim de se facilitar o modelamento do sistema proposto.

Os veículos podem circular nas vias A, B, C, D, E, F, G e H em um único sentido a ser delimitado a seguir. Os veículos podem transitar na pista 1 no sentido AF , na pista 2 no sentido EB, na pista 3, no sentido CH e na pista 4, no sentido GD.

Os veículos podem sair da via G e ir para a via D ou F. Ou sair da via E e irem para as vias B e H. Ou ainda, sair da via A e ir para as vias D, F ou H. Outra alternativa é sair da via G e ir para a via B, D ou F.

4. Modelagem do Sistema

4.1 Modelagem em Redes de Petri

Para modelagem do sistema em Redes de Petri, foram inicialmente determinados os componentes ativos e passivos do sistema.

Para construção da Rede de Petri, foi utilizado um software denominado PetriSim. [PET96-]

A figura 4.1 ilustra a rede de Petri que descreve o cruzamento.

O cruzamento mostrado na figura 3.1 está representado na figura 4.1, através de Rede de Petri. O quadrado azul destaca a representação das vias de tráfego de veículos. Para cada via, existe um círculo correspondente, por exemplo, para a via E, há o círculo identificado por P3.

Já as elipses vermelhas representam os semáforos. Tomando como exemplo o semáforo S4, o P1 representa a posição vermelho, o P2 a posição amarelo e a P3, a posição verde. A transição entre os estados vermelho e amarelo é representada pelo retângulo T1 e a transição entre os estados amarelo e verde é representado pela transição T4.

As linhas pretas que interligam os diversos elementos representam os arcos orientados que unem as condições aos eventos.

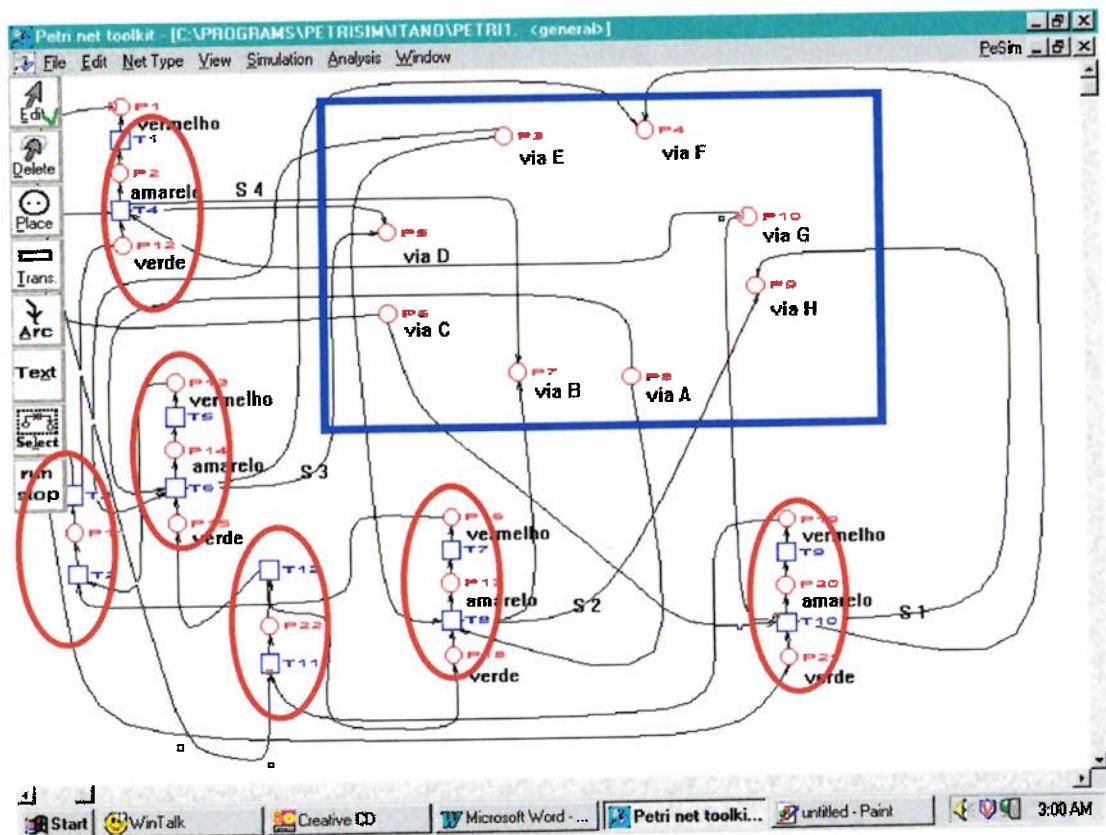


figura 4.1 Rede de Petri do Sistema de Trâfego

4.2 Modelagem via ProModel

Uma vez que o modelo em redes de Petri é implementado, deve-se testar as estratégias de controle diretamente através das regras e propriedades da Rede de Petri. Entretanto os softwares disponíveis de simulação da rede de Petri não possuem uma interface gráfica específica e amigável para análise de desempenho do sistema, sendo de difícil compreensão especialmente para as pessoas não conhecedoras da teoria das redes de Petri. Além disso, para a análise de um sistema de tráfego, a animação gráfica é bastante efetiva.

Assim, a simulação apenas na forma de Rede de Petri (usando o programa PetriSim, por exemplo), envolveria necessariamente o estudo de todos os envolvidos de toda a teoria de sistemas a eventos discretos e a compreensão do princípio de funcionamento de uma rede de Petri, para só desenvolver o estudo da estratégia.

Nesse sentido, foi selecionado um simulador comercial que suprisse os principais inconvenientes mencionados anteriormente. O simulador escolhido foi o ProModel. Embora não fosse um simulador voltado para sistemas de tráfego de veículos, apresentava as características desejadas. Ou seja, o ProModel possuía uma interface gráfica bastante amigável, permitindo que mesmo pessoas leigas entendessem o funcionamento do sistema. Para tanto, esse software disponibiliza ícones que permitem a representação dos carros e das ruas, o que facilita enormemente a compreensão. O único aspecto, em termos gráficos, que ele deixa a desejar, refere-se a falta de um ícone para representação de um semáforo.

O Promodel é um simulador que funciona em ambiente Windows ® voltado para simulação e análise estatística de sistemas de manufatura. [PRO95-] As grandes

vantagens do ProModel estão na grande flexibilidade e facilidade de utilização do mesmo para representação de sistemas de manufatura, o que permite a representação de sistemas de tráfego.

Através do Promodel é possível alterar diversas variáveis que influem no sistema e analisar os seus efeitos no sistema. Assim, é possível alterar o fluxo de veículos, o tempo de chaveamento dos semáforos, a capacidade de veículos que uma via comporta, bem como os demais parâmetros do sistema.

A análise do desempenho da simulação pode ser feita visualmente verificando a animação gráfica do sistema, ou ainda, mediante a análise dos resultados dos relatórios estatísticos , os quais apresentam dados numéricos das variáveis como ocupação de uma via e tempo dos semáforo. Também por ser feita uma análise gráfica, uma vez que o ProModel permite a representação das variáveis em gráficos, facilitando com isso a análise do desempenho do sistema.

De acordo com o anexo 1, para elaboração do modelo no ProModel seguiu-se os seguintes passos:

- definição dos *Locations*, ou seja, das localidades de onde sairão os carros, bem como para onde os mesmos irão. São também consideradas *Locations*, as vias sobre as quais os carros se locomoverão.
- definição da *Entities* , ou seja, os objetos que serão processados no sistema, no caso, os carros;
- definição do *Resource*, ou seja, aqui cabe ressaltar a adaptação feita pelo fato do software utilizado ser um software para sistema de manufatura. Como os carros são considerados objetos a serem processadas no sistema, é necessário definir-se os *Resources* que representam os encarregados de transportar os objetos de uma

localidade à outra. Assim, o *Resource* é o elemento que concretiza a passagem pelo cruzamento de um veículo.

- definição do *PathNetwork* que corresponde ao caminho físico para o *Resource*: caminho que o veículo deverá percorrer durante a execução do programa.
- definição do *Processing* que corresponde a lógica de programação do programa.

5. Análise do Sistema por Simulação

Existem diferentes formas para avaliação de sistemas de tráfego. E, nesse trabalho considera-se a melhor estratégia aquela em que uma vez colocada em execução, fará com que número médio de carros que ficam aguardando os quatro semáforos abrirem seja a menor possível e em quantidade próximas (equitativas) entre as diversas vias. Além disso, esta estratégia não deve permitir que os carros colidam devido à má coordenação dos semáforos entre si (por exemplo, quando o semáforo S6 fica verde simultaneamente com o semáforo S1 e/ou com o S5. É também considerado uma má coordenação, quando os semáforos S3, S4, S1 e S5 ficam verdes simultaneamente) .

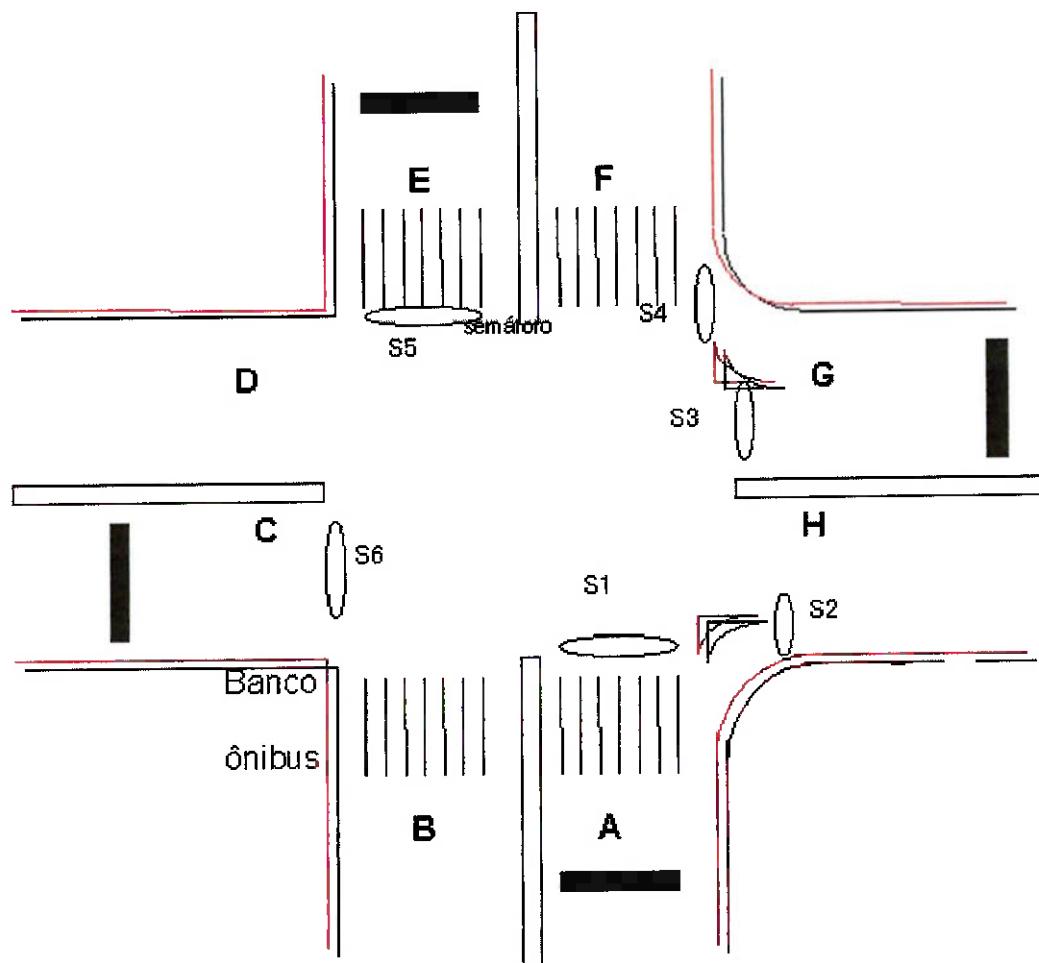


Figura 5.1 Disposição dos semáforos

A única variável que pode ser alterada no modelo implementado corresponde às constantes de tempo de chaveamento dos semáforos.

Assim, foram elaboradas as seguintes estratégias em função do tempo de chaveamento dos semáforos.

Estratégias consideradas

1. tempos iguais para os semáforos
2. tempo do semáforo de maior fluxo igual a **três meios** o tempo do semáforo de menor fluxo
3. tempo do semáforo de maior fluxo igual ao **dobro** do tempo do semáforo de menor fluxo

menor fluxo

4. tempo do semáforo de maior fluxo igual ao **triplo** do tempo do semáforo de

menor fluxo

5. tempo do semáforo de maior fluxo igual ao **quádruplo** do tempo do semáforo

de menor fluxo

A quantificação dos valores de tempo foi definida grosseiramente para uma avaliação inicial das possíveis tendências do sistema.

Para cada uma das estratégias foi levado em consideração que todos os carros se locomovem com uma velocidade constante nas vias A, B, E e F .

Para determinação dos tempos da chaveamento de cada semáforo, foi levado em consideração a seguinte informação; foi constatado, mediante observação dos semáforos existentes na cidade de São Paulo, que nenhum semáforo de cruzamento fica com tempo em verde superior a 4 vezes o tempo em verde do outro semáforo. Assim, as estratégias de controle foram montadas, admitindo inicialmente tempos iguais até o limite máximo, onde um semáforo fica em verde o tempo correspondente a 4 vezes o outro.

Cada uma dessas estratégias foi testada separadamente. Para cada uma, o ProModel forneceu como resultado, a ocupação média das vias. A ocupação média das vias corresponde a quantidade média de veículos que ficam aguardando a abertura de um semáforo quando este está vermelho.

Os resultados com a ocupação percentual média de cada via de acesso estão mostrados na tabela 5.1:

Estratégia	Via A (9)	via B (10)	via E (14)	via F (16)
1	59.64	52.32	52.79	51.44
2	53.5	51.31	53.37	51.38
3	49.04	51.01	51.24	52.16
4	46.58	52.28	49.34	50.12
5	49.60	51.40	49.81	49.91

Tabela 5.1

= % de ocupação da via

O valor de cada célula pode variar entre 0, quando em média nenhum carro fica aguardando quando o semáforo está vermelho e 100, quando a quantidade média de veículos que fica aguardando enquanto o semáforo está vermelho é igual a quantidade máxima de veículos que a via suporta.

Assim por exemplo, quando for adotada a estratégia 1, a ocupação média da via 9 será de 59.64 , da via 10 52.32 e assim por diante.

Para uma melhor visualização dos resultados, eles foram apresentados na forma gráfica:

Estratégia 1

A figura 5.2 mostra os resultados ilustrados na figura 5.1

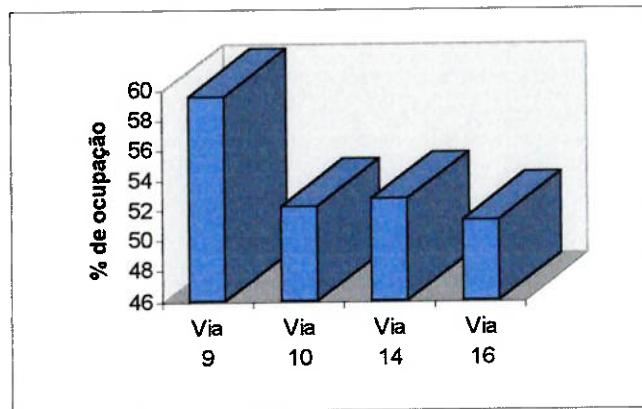


figura 5.2 Estratégia 1

Nota-se que para essa estratégia, a variação percentual de ocupação da via 9 em relação as demais é maior, fato pode ser visualizado no gráfico, uma vez que a via 9 tem taxa de ocupação em torno de 9 % maior que outras vias.

Estratégia 2

A figura 5.3 mostra os resultados ilustrados na figura 5.1

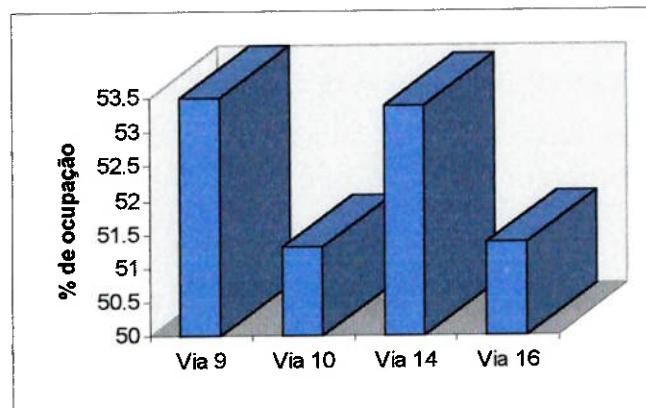


figura 5.3 estratégia 2

Essa estratégia demonstra uma melhora significativa em relação a estratégia anterior. A diferença média entre o semáforo com a maior ocupação média (semáforo da via 9 – 53,5 %) e aquela com a menor ocupação (semáforo da via 10 – 51,5 %) caiu de 9 % para 3 %.

Estratégia 3

A figura 5.4 mostra os resultados ilustrados na figura 5.1

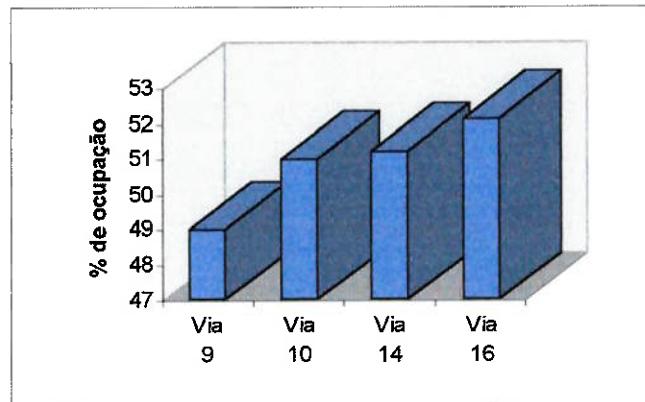


figura 5.4 estratégia 3

Nessa estratégia, a diferença entre a maior ocupação percentual (via 16) e a menor ocupação percentual (via 9) é por volta de 3 %.

Estratégia 4

A figura 5.5 mostra os resultados ilustrados na figura 5.1

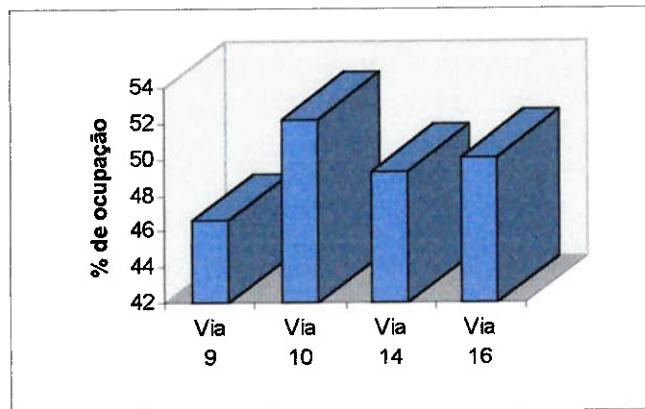


Figura 5.5 estratégia 4

Nessa estratégia, a diferença entre a maior ocupação (via 10) e a menor ocupação (via 9) é por volta de 8 %. A ocupação máxima é aproximadamente 53,5 %.

Estratégia 5

A figura 5.6 mostra os resultados ilustrados na figura 5.1

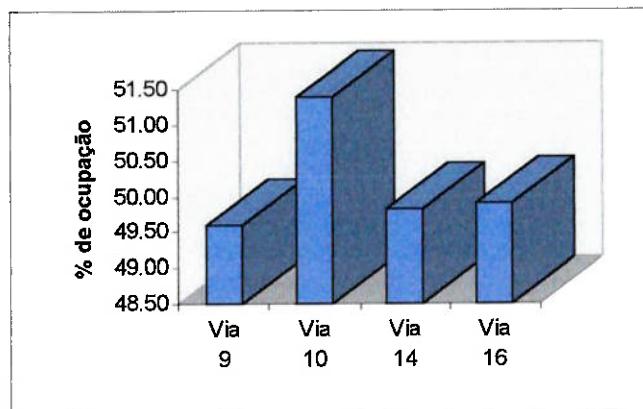


figura 5.6 estratégia 5

Nessa estratégia a diferença máxima de ocupação de cada via é aproximadamente 2%.

Comparando-se os gráficos, pode-se notar que a melhor estratégia corresponde aquela em que houver a menor diferença relativa entre a porcentagem de ocupação de

cada uma das vias, ou seja, aquela em que as quantidades médias de veículos que aguardam em cada semáforo forem mais próximas entre si.

Assim, neste exemplo verifica-se que a estratégia 5 apresenta os melhores resultados.

6. Conclusão

O desenvolvimento de sistemas para simulação e controle de sistemas de tráfego possui ainda pouca bibliografia e obras publicadas no Brasil.

A hipótese inicial de assumir o sistema de tráfego como um sistema a eventos discretos mostrou-se adequada, o que pode ser comprovado na simulação do sistema estudado, mostrando ser coerente com a realidade.

Assim, uma vez constatado a eficácia da representação do sistema em um modelo a eventos discretos, a representação do mesmo via redes de Petri foi estudada. Foi desenvolvido o modelo através da técnica da rede de Petri e, para o teste da mesma foi utilizado o software chamado PetriSim.. Esse software apesar de se mostrar eficaz para a verificação da acuidade da rede, possuía alguns inconvenientes. Em primeiro lugar, devido à sua operação interativa, verificou-se ser praticamente impossível a realização de simulações extensas que correspondessem a vários ciclos de execução do modelo, além de não possuir uma interface gráfica de fácil visualização, pois evidentemente sua especificação não visa casos práticos como o presente trabalho.

Dessa forma, esse software serviu apenas para testar se a rede de Petri implementada não possuía nenhum erro ou intertravamento, ou seja, se a rede funcionava, refletindo corretamente o comportamento do sistema objeto.

Para desenvolver uma análise qualitativa, foi realizada a implementação no ProModel. Esse simulador, no entanto, não era voltado para a simulação de sistemas de tráfego. Isso fez com que a biblioteca de figuras disponíveis fosse bem limitada, não

possuindo por exemplo semáforos. Assim, foram realizadas adaptações como a substituição dos semáforos por um display que indicava “1” se o semáforo estivesse aberto ou “0” em caso contrário

Uma das dificuldades encontradas foi em relação à programação do ProModel, em virtude da lógica de programação deste software. Algumas peculiaridades da mesma dificultaram a execução da lógica adequada. A lógica de programação não segue a lógica de programação como em linguagens C e Pascal em relação ao tratamento de variáveis. Essa questão pode ser melhor entendida no anexo.

Um aspecto importante a ser mencionado refere-se à simplificação adotada para o modelo em questão. Ao contrário do caso real, onde haveriam caminhões e pedestres interagindo como os veículos, no modelo proposto tais elementos não existem. A decisão de excluir tais elementos ocorreu em virtude da limitação temporal do projeto em questão, o que levou a simplificação máxima do projeto a fim de que os objetivos propostos inicialmente fossem atingidos

Anexo 1

SÃ o modelo no ProModel

Ao iniciar o ProModel , a tela inicial será a mostrada na figura A1.1. Deve inicialmente selecionar a opção do menu: *Build*

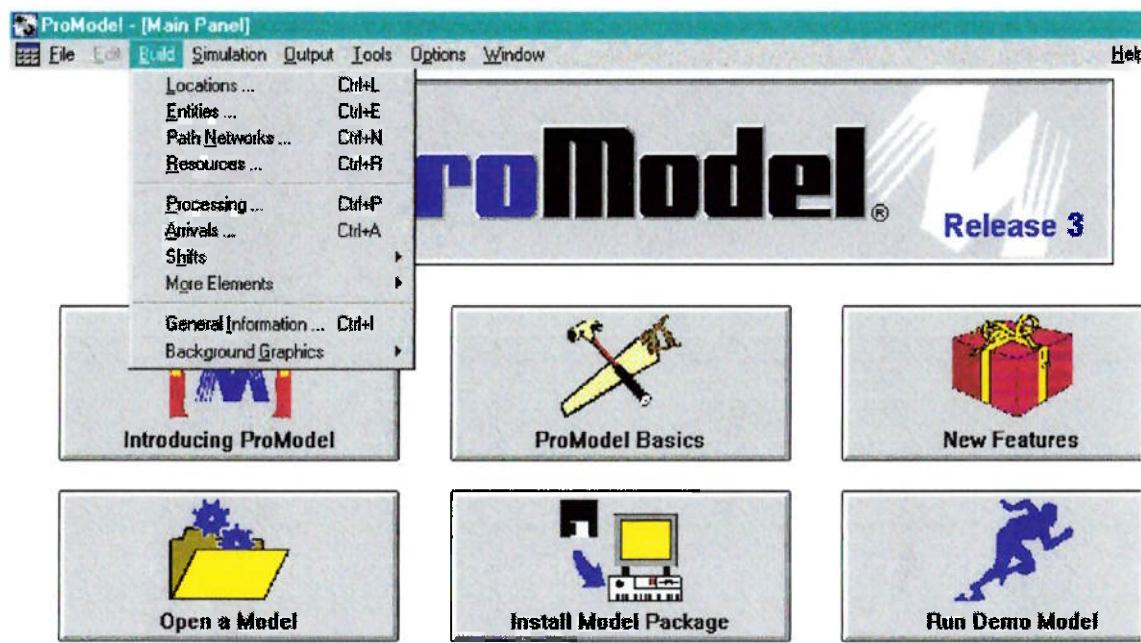


Figura A1.1 Tela inicial do ProModel

Definição dos Locations

Para se definir as localidades deve-se selecionar a opção *Location*. Ao selecionar *Location* aparecerá a seguinte tela:

Icon	Name	Cap.	Units	DTs...	Stats...	Rules...	Notes
	Loc1	1	1	None	Time Series	Oldest	
	Loc2	1	1	None	Time Series	Oldest	
	Loc3	INF	1	None	Time Series	Oldest	
	Loc4	1	1	None	Time Series	Oldest	
	Loc5	INF	1	None	Time Series	Oldest	
	Loc6	1	1	None	Time Series	Oldest	
	Loc7	1	1	None	Time Series	Oldest	
	Loc8	1	1	None	Time Series	Oldest	
	Loc9	inf	1	None	Time Series	Oldest, FIFO	
	Loc10	INFINITE	1	None	Time Series	Oldest, FIFO	
	Loc11	INF	1	None	Time Series	Oldest	
	Loc12	inf	1	None	Time Series	Oldest	
	Loc13	INFINITE	1	None	Time Series	Oldest, FIFO	
	Loc14	INFINITE	1	None	Time Series	Oldest, FIFO	
	Loc15	inf	1	None	Time Series	Oldest	
	Loc16	INFINITE	1	None	Time Series	Oldest, FIFO	
	Loc17	inf	1	None	Time Series	Oldest	
	AGV	1	1	None	Time Series	Oldest	
	Loc18	INFINITE	1	None	Time Series	Oldest, FIFO	
	Loc19	1	1	None	Time Series	Oldest	
	AGV2	1	1	None	Time Series	Oldest	
	Loc20	INFINITE	1	None	Time Series	Oldest, FIFO	

Figura A1.2 Tela do ProModel do Location

Uma vez selecionado o item *Location*, aparecerá uma tabela conforme a mostrada logo acima.

O passo inicial é escolher o ícone que representará a localidade a partir do menu mostrado abaixo. Para a seleção deve-se clicar com o botão direito do mouse sobre o ícone desejado e arrastá-lo até a posição desejada na área de trabalho.

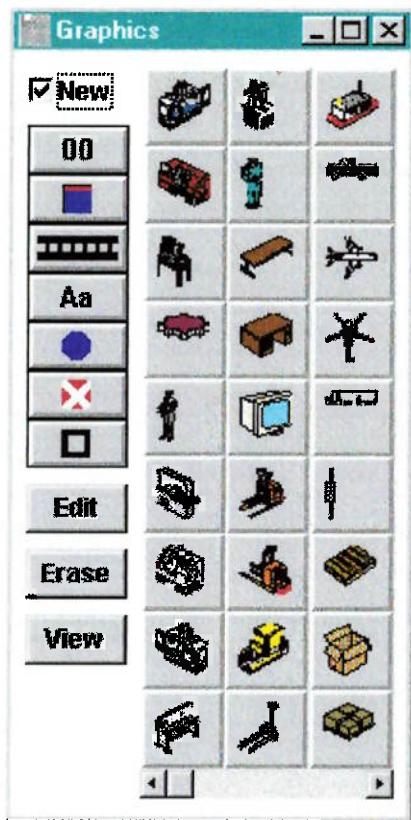


Figura A1.3 Tabela para escolha do location

Para o caso modelo, cada via corresponde a um *location*, no caso, as vias representadas em amarelo. Além disso, foi estabelecido um *location* para cada ponto de chegada de veículos, não visível por estar abaixo da faixa em amarelo.

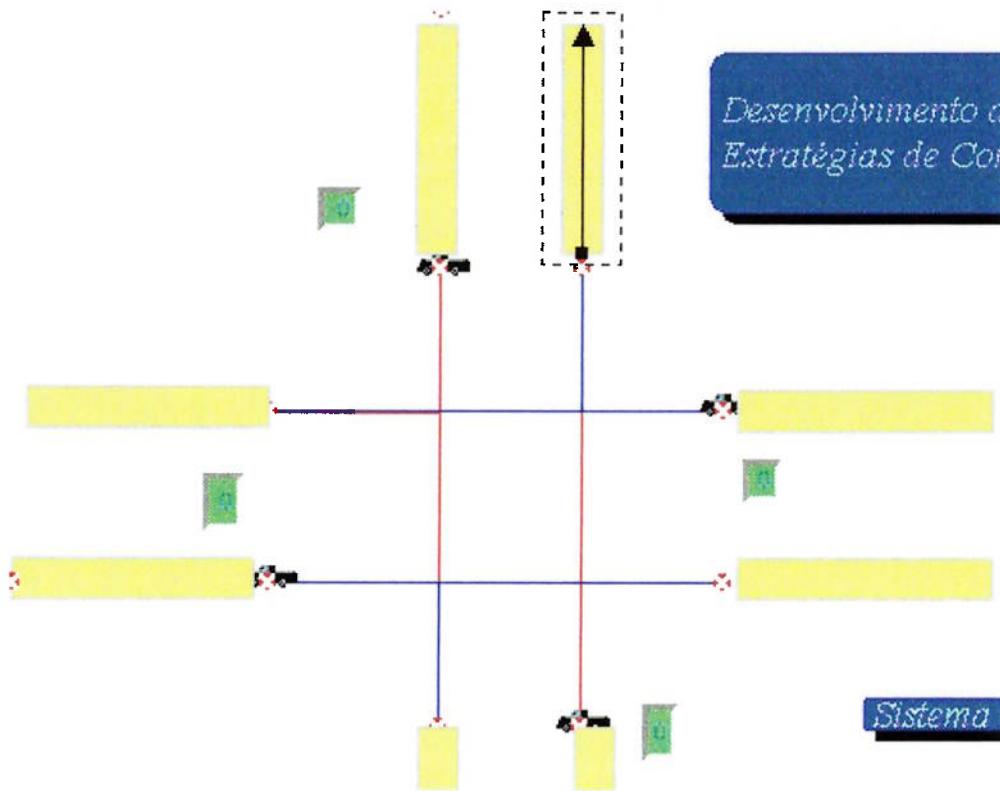


Figura A1.4 Área de Trabalho do ProModel. Representação dos locations

Definição das Entities

Conforme mencionado anteriormente, as *entities* correspondem às peças que serão processadas, no caso correspondem aos carros.

Para definição das *entities*, deve-se selecionar a opção *Entities* mostradas no menu da figura A1.1

Uma vez selecionada, a tela que aparecerá será a seguinte:

Entities				
Icon	Name	Speed (fpm)	Stats...	Notes...
	Pickup	0	Time Series	
	PickupA	0	Time Series	

Figura A1.5 Menu para definição da *Entities*

Deve-se inicialmente escolher o ícone correspondente a entidade desejada de acordo com a figura A1.6. Para o modelo implementado foram definidas duas entidades que podem ser verificadas na figura A1.5. A pickup 1 corresponde aos veículos que executarão o movimento na direção vertical. Já a vermelha fará o movimento na direção horizontal.

Pode-se perceber que é possível determinar pela tabela acima a velocidade com que as pickup se movem.

A escolha do ícone desejado para a entidade deve ser selecionada a partir da tabela A1.6.

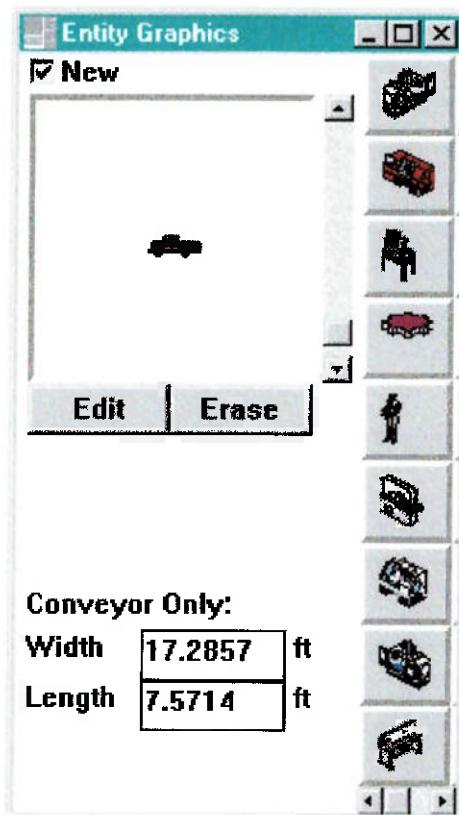


Figura A1.6 Tabela para escolha da entidade desejada

Definição dos Resources

Para a definição dos *Resources* deve ser selecionada a opção correspondente mostrada na tabela A1.7

Uma vez selecionada essa opção, aparecerá a seguinte tela:

Resources										
Icon	Name	Units	DTs...	Stats...	Specs...	Search...	Logic...	Pts...	N	
	Pickup2	999	None	By Unit	estagio_1.1, N1	None	0	1		
	Pickup3	999	None	By Unit	estagio_1.2, N1	None	0	1		
	Pickup4	999	None	By Unit	estagio_2.1, N1	None	0	1		
	Pickup5	999	None	By Unit	estagio_2.2, N1	None	0	1		

Figura A1.7 Tela para definição dos Resources

Para a definição dos *Resources*, devem ser inicialmente selecionado o ícone correspondente ao *Resource* desejado. Esta seleção pode ser feita a partir da tabela (figura A1.8). Na tabela da figura A1.7 devem ser estabelecidas também a quantidade de cada entidade. E no campo *Specs...* deve-se definir o *PathNetwork*, ou seja, o “caminho” sobre o qual a entidade irá percorrer.

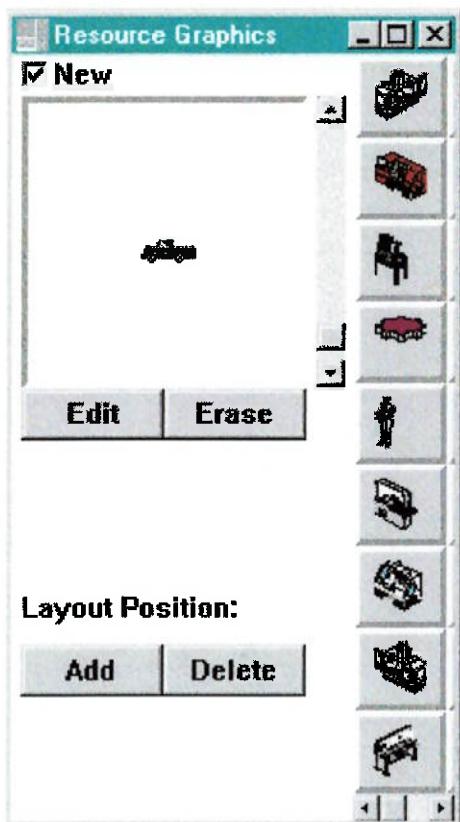


Figura A1.8 Tela para a escolha do Resource

Definição do PathNetwork

Para a definição do *PathNetwork*, deve ser selecionada a opção correspondente no menu mostrado na figura A1.1

Ao selecionar essa opção, aparecerá a seguinte tela:

Graphic	Name	Type	T/S	Paths...	Interfaces...	Mapping...
	estagio_1.1	Passing	Speed & Distance	2	3	0
	estagio_1.2	Passing	Speed & Distance	2	3	0
	estagio_2.1	Passing	Speed & Distance	2	3	0
	estagio_2.2	Passing	Speed & Distance	2	3	0
	marca	Passing	Speed & Distance	1	2	0

Figura A1.9 Tela para definição do *PathNetwork*

Para a definição da *PathNetwork*, deve-se posicionar o mouse na área de trabalho no ponto de início da entitie ou do resource e arrastá-lo até o ponto final. O ponto de início e o ponto final são chamados de *Nodes*. Os *Nodes* são registrados na tabela da figura A1.10.

Deve-se, então, nomear a rede criada.

From	To	Distance
N1	N2	Un 20.00
N1	N3	Un 32.00

Figura A1.10 Tela do *PathNetwork* Representação dos Nodes.

Definição do Processing

Para a definição do *Processing*, deve-se selecionar a opção correspondente no menu mostrado na figura A1.1.

Ao selecioná-lo aparecerá a seguinte tela:

Entity...	Location...	Operation...
Pickup	Loc11	
Pickup	Loc9	IF (semaforo=0) OTHE
Pickup	Loc13	
Pickup	Loc26	
Pickup	Loc12	

Figura A1.11 Tela 1 do Processing

Nessa tela devem ser representadas as localidades de partida dos *entities*. Assim, deve-se representar a entidade, a localidade de partida, bem como a condição para que a partida da entidade na localidade mencionada seja habilitada.

Uma vez estabelecida a tela de partida, o passo seguinte é estabelecer a localidade de chegada. Esta pode ser definida na tabela mostrada na figura A1.12.

Routing for Pickup @ Loc11 [1]			
Output...	Destination...	Rule...	Move Logic...
Pickup	Loc9	FIRST 1	

Figura A1.12 Tela 2 do Processing

Para cada localidade de partida de peças, é necessário estabelecer a localidade de chegada das peças.

Alterações dos parâmetros do sistema

Os parâmetros do sistema, como tempo de simulação, precisão do clock do ProModel podem ser facilmente alterados, através da opção *Simulation Options*. A tela resultante será:

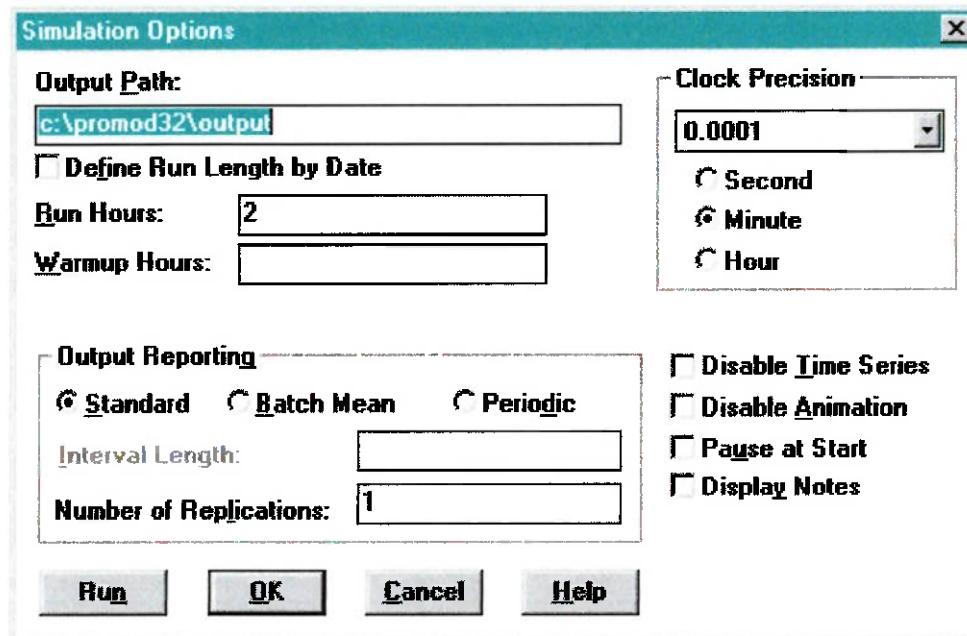


Figura A1.13 Tela do ProModel para alterações de parâmetros do sistema.

Alteração da estratégia de controle

Para alteração da estratégia de controle deve-se proceder da seguinte maneira.

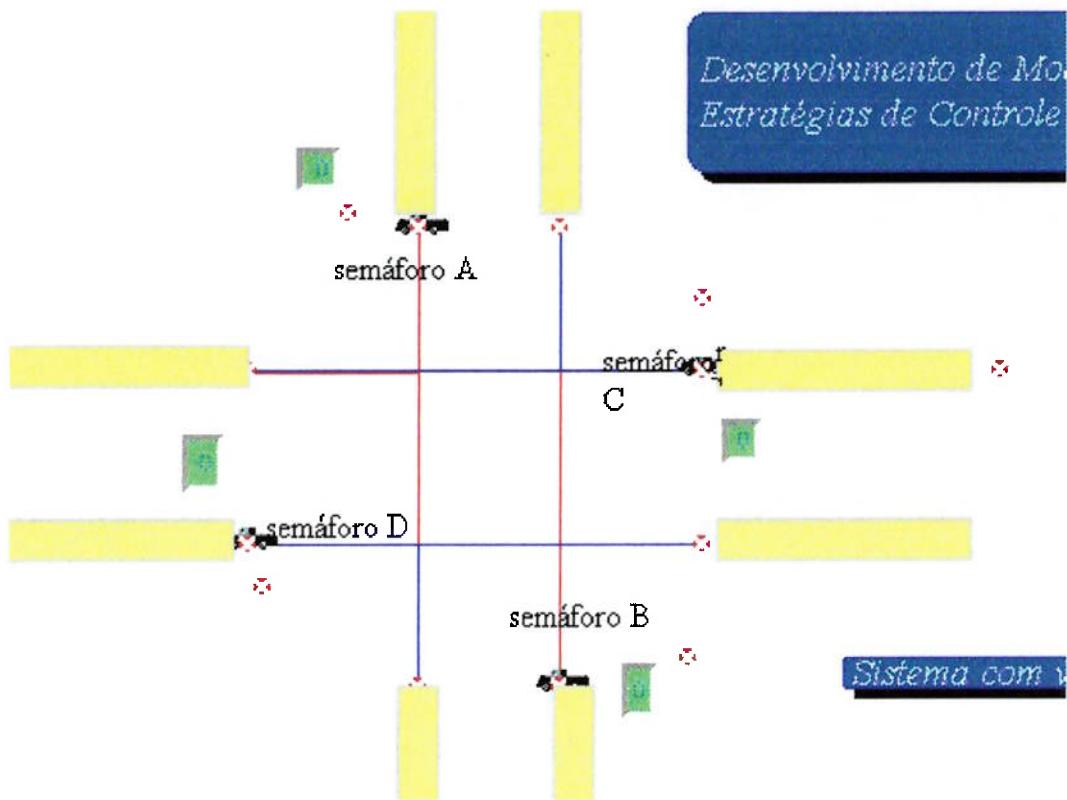


Figura A1.14 Representação dos semáforos no sistema

Conforme fora assumido na construção do modelo, o fluxo de veículos que passam pelos semáforos A e B corresponde ao dobro do fluxo de veículos que passam pelos semáforos C e D.

Cada estratégia de controle corresponde a alteração do tempo de chaveamento de cada semáforo. Para estabelecer o tempo em que se deseja que os semáforos A e B devem ficar abertos deve-se proceder da seguinte forma. Seleciona *Processing*. A tela abaixo

aparecerá.

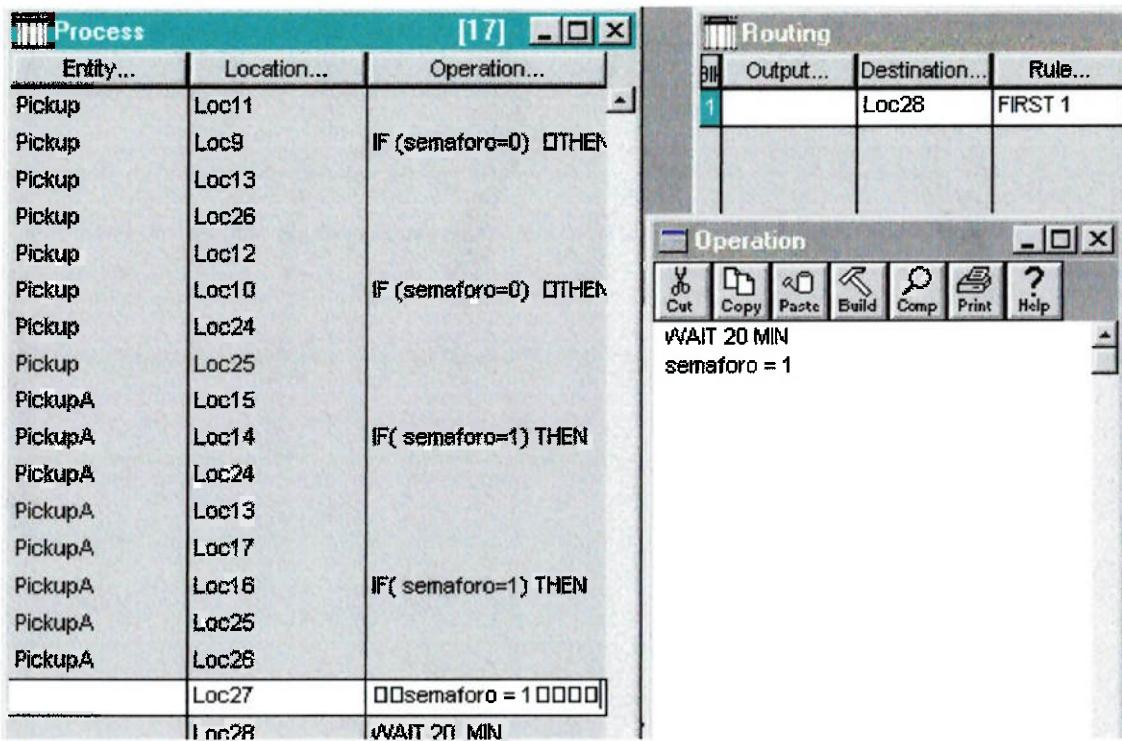


Figura A1.15 Tela para alteração do tempo de chaveamento dos semáforos A e B

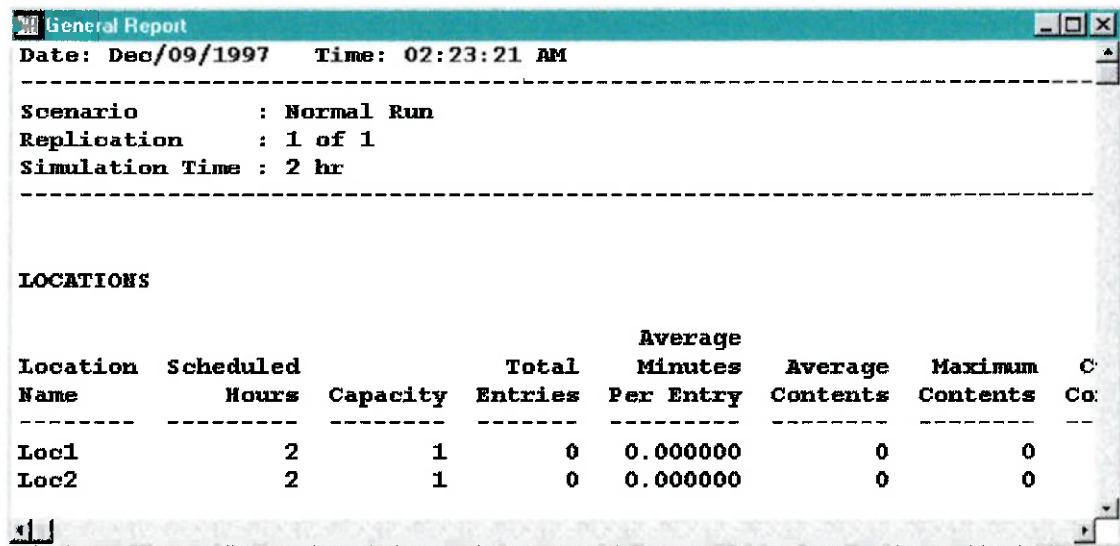
Selecione o *Loc 27*. Clique em *Operation* , aparecerá uma tela do *Operation*. O tempo escrito após o *Wait* corresponde ao tempo em que os semáforos A e B ficarão abertos.

Para alterar o tempo em que os semáforos C e D devem ficar abertos, deve-se proceder de maneira análoga. Deve-se selecionar o *Loc 28* da mesma tabela indicada na figura A1.15. Clique em *Operation* , aparecerá uma tela do *Operation*. O tempo escrito após o *Wait* corresponde ao tempo em que os semáforos C e D ficarão abertos.

Visualização dos Resultados

Ao final da simulação, o ProModel irá perguntar se deseja ver os resultados.

Selecione “Sim” e então, um relatório do resultado da simulação será mostrado.



General Report
Date: Dec/09/1997 **Time:** 02:23:21 AM

Scenario : Normal Run
Replication : 1 of 1
Simulation Time : 2 hr

LOCATIONS

Location Name	Scheduled Hours	Capacity	Average				Maximum Contents	C
			Total Entries	Per Entry	Average Contents	Contents		
Loc1	2	1	0	0.000000	0	0	0	
Loc2	2	1	0	0.000000	0	0	0	

Figura A1.16 Tela dos resultados finais do ProModel - Relatório

A apresentação das variáveis pode ser feitas de forma gráfica. Para tanto, basta selecionar o ícone correspondente ao gráfico da barra de ferramentas e selecionar a opção desejada de acordo com a figura A1.17.

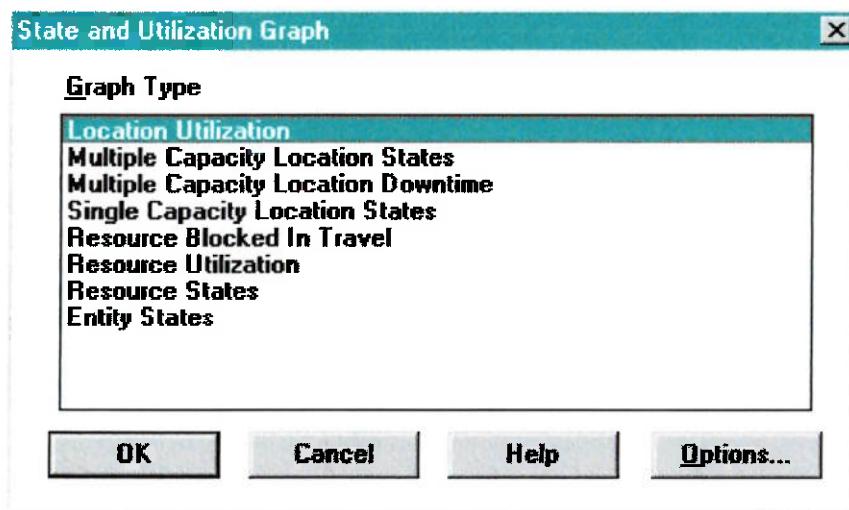


Figura A1.17 Variáveis a serem plotadas nos gráficos

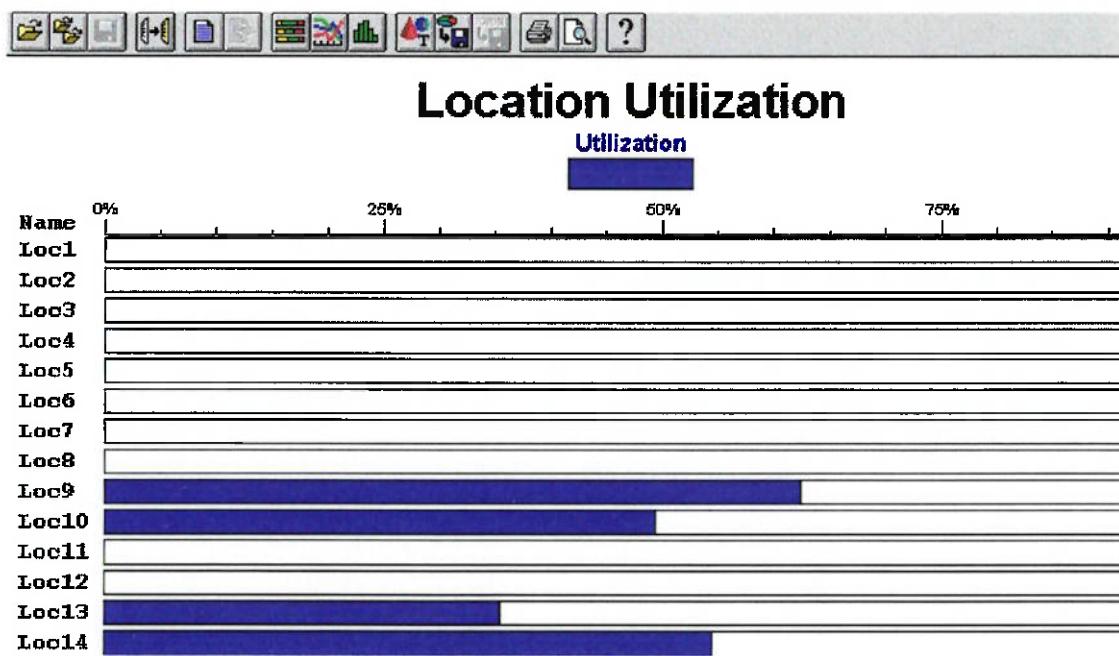


Figura A1.18 Gráfico da porcentagem de ocupação de um localidade após uma simulação

Anexo 2 - Listagem do Programa

```
*****
*          Formatted Listing of Model:          *
*          C:\MY DOCUMENTS\TRABALHO DE FORMATURA ITANO\LISTAGEM.TXT      *
*****
*****
```

Time Units: Minutes
 Distance Units: Feet

```
*****
*          Locations          *
*****
*****
```

Name	Cap	Units	Stats	Rules
Loc1	1	1	Time Series	Oldest, ,
Loc2	1	1	Time Series	Oldest, ,
Loc3	INF	1	Time Series	Oldest, ,
Loc4	1	1	Time Series	Oldest, ,
Loc5	INF	1	Time Series	Oldest, ,
Loc6	1	1	Time Series	Oldest, ,
Loc7	1	1	Time Series	Oldest, ,
Loc8	1	1	Time Series	Oldest, ,
Loc9	inf	1	Time Series	Oldest, FIFO,
Loc10	INFINITE	1	Time Series	Oldest, FIFO,
Loc11	INF	1	Time Series	Oldest, ,
Loc12	inf	1	Time Series	Oldest, ,
Loc13	INFINITE	1	Time Series	Oldest, FIFO,
Loc14	INFINITE	1	Time Series	Oldest, FIFO,
Loc15	inf	1	Time Series	Oldest, ,
Loc16	INFINITE	1	Time Series	Oldest, FIFO,
Loc17	inf	1	Time Series	Oldest, ,
AGV	1	1	Time Series	Oldest, ,
Loc18	INFINITE	1	Time Series	Oldest, FIFO,
Loc19	1	1	Time Series	Oldest, ,
AGV2	1	1	Time Series	Oldest, ,
Loc20	INFINITE	1	Time Series	Oldest, FIFO,
Loc21	1	1	Time Series	Oldest, ,
Loc22	1	1	Time Series	Oldest, ,
Loc23	1	1	Time Series	Oldest, ,
Loc24	INFINITE	1	Time Series	Oldest, FIFO,
Loc25	INFINITE	1	Time Series	Oldest, FIFO,
Loc26	INFINITE	1	Time Series	Oldest, FIFO,
Loc27	1	1	Time Series	Oldest, ,
Loc28	1	1	Time Series	Oldest, ,
Loc29	inf	1	Time Series	Oldest, ,
Loc30	inf	1	Time Series	Oldest, ,
Loc31	inf	1	Time Series	Oldest, ,
Loc32	inf	1	Time Series	Oldest, ,

***** Entities *****

Name Speed (fpm) Stats

Pickup 0 Time Series
Gear 0 Time Series
PickupA 0 Time Series

***** * Path Networks * *****

Name	Type	T/S	From	To	Bl	Dist/Time	Speed Factor
estagio_1.1	Passing	Speed & Distance	N1 N1	N2 N3	Uni 32.00	20.00 1	1
estagio_1.2	Passing	Speed & Distance	N1 N1	N2 N3	Uni 32.00	22.00 1	1
estagio_2.1	Passing	Speed & Distance	N1 N1	N2 N3	Uni 32.00	20.00 1	1
estagio_2.2	Passing	Speed & Distance	N1 N1	N2 N3	Uni 32.00	22.00 1	1
marca	Passing	Speed & Distance	N1	N2	Bi	11.04	1

***** * **Interfaces** * *****

Net	Node	Location
estagio_1.1	N1	Loc10
	N2	Loc25
	N3	Loc24
estagio_1.2	N1	Loc9
	N2	Loc13
	N3	Loc26
estagio_2.1	N1	Loc14
	N2	Loc24
	N3	Loc13
estagio_2.2	N1	Loc16
	N2	Loc26
	N3	Loc25
marca	N1	Loc27
	N2	Loc28

***** * Resources * *****

Name	Res Units	Ent Stats	Search	Search	Path	Motion
Pickup2	999	By Unit	Closest	Oldest	estagio_1.1	Empty: 150 fpm

				Home: N1	Full: 150 fpm
Pickup3	999	By Unit	Closest	Oldest Home: N1	estagio_1.2 Empty: 150 fpm Full: 150 fpm
Pickup4	999	By Unit	Closest	Oldest Home: N1	estagio_2.1 Empty: 150 fpm Full: 150 fpm
Pickup5	999	By Unit	Closest	Oldest Home: N1	estagio_2.2 Empty: 150 fpm Full: 150 fpm
woman_side 1		By Unit	Closest	Oldest Home: N2	marca Empty: 150 fpm Full: 150 fpm

***** Processing *****

Process Routing

Entity	Location	Operation	Blk	Output	Destination	Rule	Move Logic
Pickup	Loc11		1	Pickup	Loc9	FIRST	1
Pickup	Loc9	IF (semaforo=0)		THEN			
		{					
		semaforo_1=1					
		semaforo_3=1					
		semaforo_2=0					
		semaforo_4=0					
		ROUTE 1					
		}					
		else					
		{					
		WAIT UNTIL semaforo=0					
		ROUTE 1					
		}					

1 Pickup Loc13 TURN 1 MOVE WITH Pickup3

Pickup Loc26 TURN MOVE WITH Pickup3

2 Pickup Loc26 RANDOM 1 WAIT UNTIL semaforo=0

Pickup Loc13 1 Pickup EXIT FIRST 1 FREE Pickup3

Pickup Loc26 1 Pickup EXIT FIRST 1 FREE Pickup3

Pickup Loc12 1 Pickup Loc10 FIRST 1
Pickup Loc10 IF (semaforo=0) THEN


```

ROUTE 1
}           1 PickupA Loc25      TURN 1 MOVE WITH Pickup5
                         PickupA Loc26      TURN      MOVE WITH Pickup5
                         2 PickupA Loc25      RANDOM 1 WAIT UNTIL semaforo=1
PickupA Loc25           1 PickupA EXIT      FIRST 1 FREE Pickup5
PickupA Loc26           1 PickupA EXIT      FIRST 1 FREE Pickup5
Gear    Loc27  WAIT 20 MIN
          semaforo = 1
                         1 Gear    Loc28      FIRST 1 MOVE WITH woman_side
Gear    Loc28  WAIT 20 MIN
          semaforo = 0
                         1 Gear    Loc27      FIRST 1 MOVE WITH woman_side

```

* Arrivals *

Entity	Location	Qty each	First Time	Occurrences	Frequency	Logic
--------	----------	----------	------------	-------------	-----------	-------

Pickup	Loc11	1	0	INF	2	
Pickup	Loc12	1	0	inf	2	
PickupA	Loc15	1	0	inf	1	
PickupA	Loc17	1	0	inf	1	
Gear	Loc27	1	0	1	0	

* Variables (global) *

ID	Type	Initial value	Stats
----	------	---------------	-------

semaforo_1	Integer	01	Time Series
semaforo_2	Integer	01	Time Series
semaforo_3	Integer	01	Time Series
semaforo_4	Integer	01	Time Series
semaforo_p1	Integer	0	Time Series
semaforo_p2	Integer	0	Time Series
tempo_semaforo1	Real	0	Time Series
tempo_semaforo11	Real	0	Time Series
tempo_semaforo2	Real	0	Time Series
tempo_semaforo22	Real	0	Time Series
tempo_semaforo3	Real	0	Time Series
tempo_semaforo33	Real	0	Time Series
tempo_semaforo4	Real	0	Time Series
tempo_semaforo44	Real	0	Time Series
semaforo	Integer	1	Time Series

Bibliografia

- [ADO93-] ADONI, C. A., **Coletânia de Artigos**. SEADE , Secretaria do Planejamento do Estado de São Paulo, São Paulo, 1993.
- [ANP95-] Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Rio de Janeiro, 1995.
- [CAR97-] CARDOSO, J. , VALETTE, R. **Redes de Petri**. Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.
- [CAS95-] CASTRO, M. A. G., SANTOS, M. P. S., MACHADO, D.P, **Uma Contribuição Metodológica para a Avaliação dos Impactos da Implantação de Sistemas de Transporte na Produção do Espaço Urbano**, Rio de Janeiro, 1995.
- [CET97-] CET -Manual Companhia de Engenharia de Tráfego. São Paulo, 1997.
- [IBG97-] **Contagem**, Contagem Anual, IBGE, 1997.
- [MIY96-] MIYAGI,P.E., **Controle programável - Fundamentos do Controle de Sistemas a Eventos Discretos**, ed. Edgard Blücher, São Paulo, 1993.
- [PET96-] PetriSim - Simulador de Rede de Petri
- [PIZ95-] PIZZO, MARIA DO ROSÁRIO RODRIGUEZ, **Transporte em um Novo Projeto de Desenvolvimento**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, artigo publicado, 1995.
- [PRO95-] **ProModel User's Guide - Manufaturing Innovation Through Simulation**, Promodel Corporantion, EUA, 1995.
- [SEI95-] SEILA, A., **Introduction to Simulation**, artigo, University of Georgia, Georgia, EUA, 1995.

[TRA76-] **Transportation and Traffic Engineering Handbook**, Institute of Transportation Engineers, Prentice Hall, EUA, 1976.

[WEL93-] WELLFORT, F. C., **Os Clássicos da Política**, Editora Ática, São Paulo, 1993.

[WSC95-] **Conference Proceedings, The Winter Simulation Conference**, Arlington, EUA, 1985.

Apêndice

Relatório Parcial

1. Introdução

1.1 Motivação

Através de uma análise rápida das últimas estatísticas populacionais, publicadas a cada dois anos pelo IBGE, pode-se notar uma tendência de crescimento da população brasileira.

Simultaneamente a isso, houve uma crescente mecanização da agricultura nos últimos anos. Com isso, houve deslocamento da população rural em direção aos grandes centros urbanos.

Nesse sentido, o número de habitantes das grandes cidades brasileiras vêm crescendo ultimamente.

Tal situação aliada à existência de um sistema ineficiente e, portanto, ineficaz, de transportes públicos coletivos, faz com que as pessoas sejam obrigadas (quando a situação sócio-econômica individual lhes permitem) a utilizarem meios de locomoção próprios para se locomoverem nas cidades.

Assim, com o aumento da população nas cidades, há concomitantemente, o aumento da quantidade de veículos. Nesse sentido, o trânsito de veículos fica mais intenso, diminuindo a velocidade média de circulação dos veículos.

Para resolver esse problema, ou seja, diminuir os congestionamentos, várias medidas são propostas. Entre elas, destacam-se as que envolvem alterações no espaço físico das principais ruas e avenidas, como, por exemplo, aumentando-se o número de faixas transitáveis.

Outra medida também relacionada à alteração do espaço físico refere-se à construção de novas ruas e avenidas, com o objetivo de dividir o fluxo de veículos com as vias de tráfego principais.

Tais medidas produzem resultados imediatos. Entretanto, elas se deparam com dois grandes inconvenientes: o custo elevado e a inviabilidade em alguns casos.

A construção de uma nova via, por mais simples que ela seja, envolve custos para construção em si da via (gastos com terraplanagem, asfaltamento, sinalização e outros) e também gastos com a aquisição do terreno de onde será construída a via. Em muitos casos, existem construções no local, então é necessário considerar a desapropriação, o que gera gastos muito superiores ao valor do terreno.

Outra questão, da inviabilidade acontece, quando a localização da rua ou avenida, impõe por si só uma restrição física para solução do problema de tráfego de veículos. Por exemplo, no caso da Avenida Paulista na cidade de São Paulo, desconsiderando-se o custo de aquisição de uma porção de terreno de cada lado da avenida para construção de uma faixa extra, não seria possível conceber uma solução técnica para a retirada de uma fatia de cada um dos seus inúmeros prédios para construção dessa faixa adicional.

Há ainda outros inconvenientes da construção de uma nova via ou avenida. Em vários casos é preciso levar em consideração o aspecto sócio-cultural.

Por exemplo, talvez muitas pessoas ficariam constrangidas de passar por uma avenida que tivesse sido construída onde antes havia um cemitério. Logo não é conveniente desapropriar um cemitério, derrubar uma igreja ou mesmo destruir um monumento para a construção de uma nova via.

1.2 Justificativa

De acordo com a situação descrita anteriormente e a natureza multidisciplinar e complexa de um sistema de tráfego de veículos é evidente que o problema de controle do trânsito não é trivial. De fato pelos resultados e situações presentes na cidade de São Paulo nota-se a necessidade de se estudar novas alternativas para se melhorar o tráfego dos veículos das grandes cidades, que não se restrinja as soluções citadas anteriormente.

Existe evidentemente grande interesse em encontrar soluções mais econômicas e que possam ser implementadas sem que haja necessariamente ocupação de um maior espaço físico, uma vez que, a ocupação de novas áreas envolve problemas sócio-econômicos e até culturais em alguns casos.

Assim, pode-se perceber que o problema é bastante complexo, mostrando a necessidade de se ter um modelo.

Além disso, como na maioria das vezes os projetos sugeridos para otimizar o tráfego de veículos são complexos e envolvem altos investimentos, acarretando em elevados gastos dos cofres públicos, é necessário que se tenha em mãos um modelo que permita testar a solução ocorrida, antes que a mesma seja implementada.

1.3 Objetivo

A cidade de São Paulo possui um número muito grande de ruas e avenidas. Esse números, segundo estimativa da CET, Companhia de Engenharia de Tráfego, responsável pelo tráfego na região metropolitana da cidade de São Paulo, alcança a grandeza de centenas de ruas.

Logo, em virtude da complexidade elevada e da limitação temporal, o projeto proposto tem por objetivo desenvolver um modelo de uma parte do sistema viário de uma cidade brasileira para estudar técnicas de análise e validação de diferentes estratégias de controle.

As principais hipóteses adotadas são as de que o sistema viário pode ser considerado um sistema a eventos discretos (SED) e a sua otimização pode ser obtida por regras de despacho adequadas. Assim, pretende-se verificar se é possível utilizar as técnicas de controle e modelagem existentes para a manufatura para o caso do tráfego urbano.

2. Metodologia

O passo inicial corresponde a um levantamento bibliográfico junto a um conjunto de trabalhos relacionados à modelagem, simulação e controle de sistemas.

A etapa seguinte consiste no estudo da viabilidade do projeto. Neste caso, optou-se por uma coleta de dados através de entrevistas com profissionais da CET (Companhia de Engenharia de Tráfego) com o objetivo de se conceber uma visão global do sistema de tráfego urbano da cidade de São Paulo. Com isso pretende-se confirmar como o sistema pode ser representado por um SED, e assim, estudar os meios de se desenvolver modelos e implementar um sistema de controle.

A etapa seguinte é o desenvolvimento do projeto básico, ou seja, promover o estudo e o levantamento das características do sistema ou sub-sistema a ser estudado. A tarefa envolve a proposta de diversas opções de sistemas ou sub-sistemas de tráfego de veículos e, dentre as quais, escolher o objeto mais adequado, mais representativo a ser modelado.

Uma vez escolhido o sub-sistema, deve-se desenvolver os modelos.

Uma das metas é estudar técnicas de modelagem e desenvolvimento de modelos simbólicos, o mais genéricos possíveis que permitam descrever as estratégias de controle através de uma analogia funcional, utilizando alguma ferramenta computacional.

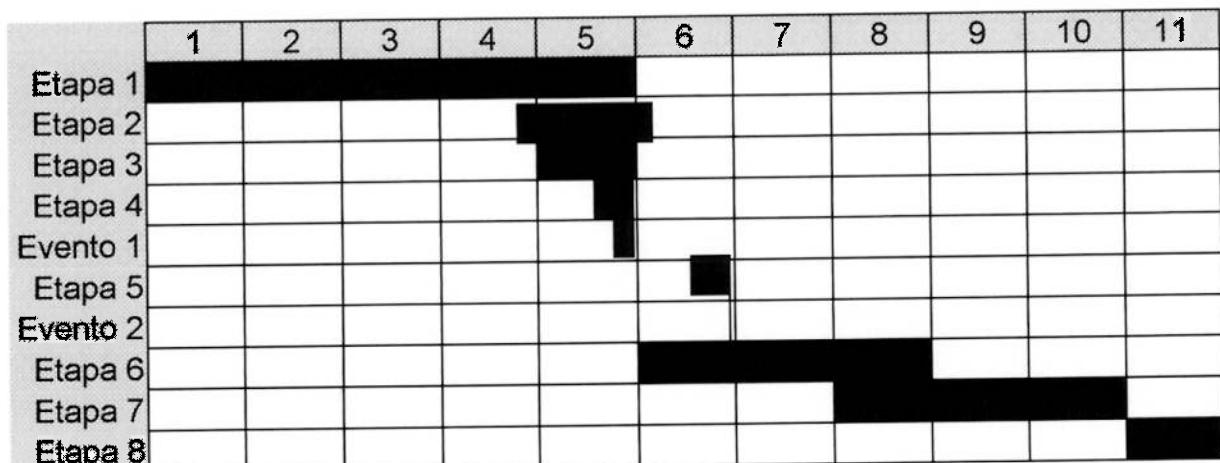
A escolha da ferramenta para modelagem e simulação mais apropriada envolve a definição de critérios de desempenho que deverão ser estudadas com mais detalhes.

A etapa seguinte envolve a construção do modelo detalhado. A técnica do PFS/MFG será utilizada no desenvolvimento do modelo conceitual do sistema a ser

estudado e através de processo de refinamento sucessivos, o modelo funcional detalhado em MFG deverá ser obtido.

Desenvolvido o modelo, a última fase do projeto consiste em analisar e verificar a qualidade das estratégias de controle elaboradas. O modelo PFS/MFG será interpretado para simuladores comerciais de sistemas (devido às restrições acadêmicas e de custos envolvidos no presente trabalho, o software de simulação comercial a ser utilizado será o Promodel, versão 3.0 for Windows ®, disponível no Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP) e a análise por simulação será realizada de acordo com os critérios de desempenho mencionados no final desse relatório.

3. Cronograma proposto



Etapa 1	Levantamento bibliográfico
Etapa 2	Estudo da viabilidade do projeto
Etapa 3	Projeto básico
Etapa 4	Preparação da apresentação
Evento 1	Apresentação
Etapa 5	Preparação do relatório semestral
Etapa 6	Entrega do relatório semestral
Etapa 7	Construção e validação do modelo
Etapa 8	Análise e estudo das estratégias de controle
Etapa 9	Preparação do relatório final

Descrição detalhada dos itens mencionados acima

- **Etapa 1. Levantamento bibliográfico**

Para o projeto em questão é necessário que sejam observados os seguintes temas: análise, modelagem, simulação e controle. Nesse sentido foi feita uma pesquisa da bibliografia relacionada com a análise, modelagem , simulação e controle de um sistema de tráfego.

Livros consultados:

Bibliografia básica geral sobre controle programável

- Miyagi,P.E. **Controle programável: fundamentos do controle de sistemas a eventos discretos**, Edgard Blucher, São Paulo, 1996.

Modelagem:

- Ammons,J.C.; Govindaraj,T.; Mitchell,C.M. Decision models for aiding FMS scheduling and control. *IEEE Trans. On Systems Man and Cybernetics*, v.18, n.5, p.744-756, 1988.
- Biemans,F.P.; Vissers,C.A. Reference model for manufacturing planning and control systems. *Journal of Manufacturing Systems*, v.8, n.1, p.35-46, 1989.
- Harel,D. Statecharts: on the formal semantics of statecharts. *Proceedings of the 2nd IEEE Symposium on Logic in Computer Science*, IEEE, Ithaca, 1987.
- Ross,D.; Schoman, K. Structured analysis for requirements definition, *IEEE Trans. On Software Engineering*, v.3, n.1, p.6-15, 1977.

Simulação:

- Benjaafar,S. Intelligent simulation for flexible manufacturing systems: an integrated approach. *Computer & Industrial Engineering*, v.22, n.3, p.297-311, 1992.
- Law,A.M. Introduction to simulation: a powerfull tool for analysing complex manufacturing systems. *Industrial Engineering*, p.46-63, May, 1986.
- Manivannan,S.; Banks,J. Towards a realtime knowledge-based simulation system for diagnosing machine tool failure. *90'Winter Simulation Conference Proceedings*, IEEE, p.603-608, 1990.
- Schoroer,B.J.; Tseng,F.T. An intelligent assistant for manufacturing system simulation. *International Journal of Production Research*, v.27, n.10, p.1665-1683, 1989.
- Schriber,T.S. ***An introduction of simulation***, John Wiley & Sons, 1990.

Controle:

- Hollo,F.R. Proposed language standards for programmable controllers. *Control Engineering*, p.260-264, September, 1985.
 - Nagurka,M.L.; Englert,P.J. Toward an intelligent machine tool for flexible manufacturing. *Robotics & Computer Integrated Manufacturing*, v.6, n.3, p.229-236, 1989.
 - Szelke,E.; Meszaros,I. Knowledge based adaptative control of FMS contributing to CIM. *Computer in Industry*, n.14, p.89-98, 1990.
-
- **Etapa 2. Estudo da viabilidade do projeto**

O estudo de viabilidade pode ser dividido em várias etapas. São elas: o estabelecimento da necessidade, formulação do projeto e síntese das soluções.

- **Etapa 3. Projeto Básico**

Promover o estudo e o levantamento das características da parte do sistema viário a ser estudado. Para tanto, serão propostas diversas soluções.

Posteriormente será feita a seleção da melhor solução, dentre as várias soluções propostas, levantadas anteriormente.

- **Etapa 4. Preparação da apresentação**

Preparar a apresentação parcial do TF.

- **Evento 1. Apresentação**

Apresentação da atividade realizada durante o primeiro semestre.

- **Etapa 5. Preparação do relatório semestral**

Preparação deste relatório

O projeto será representado através de um modelo simbólico, cujo objetivo é representar a estratégia de controle através de uma analogia funcional, utilizando uma ferramenta (muito provavelmente será o Promodel, mencionado anteriormente).

Essa fase tem por objetivo, construir o modelo detalhado (estabelecendo os fluxos primários, secundário e outros parâmetros relevantes). Terá como ponto de partida o PFS e o objetivo final é chegar ao MFG.

- **Etapa 7. Análise e estudo das estratégias de controle**

Analizar e verificar a qualidade das estratégias de controle elaboradas.

- **Etapa 8. Preparação do relatório final**

Preparar o relatório final.

4. Atividades realizadas

Conforme cronograma proposto, foram cumpridas as etapas de número 1 à 6 (ou seja, levantamento bibliográfico, estudo da viabilidade do projeto, projeto básico, preparação da apresentação e a preparação desse relatório semestral) .

Em relação ao estudo bibliográfico, foi feito um levantamento junto às bibliotecas da EPUSP e do CET. A maioria dos textos trata do assunto de simulação e controle de sistemas de manufatura, sendo que houve dificuldade em identificar material bibliográfico específico para o caso de modelagem, simulação e análise de sistemas de tráfego de veículos. O que existe são exemplos a respeito de metodologias de controle, baseados em estratégias de rede de Petri, em teorias de filas e outros.

Para o estudo da viabilidade do projeto, foram realizadas entrevistas com o profissionais da CET. O objetivo era verificar se realmente havia necessidade de se desenvolver algum projeto nesse área, ou seja, em relação a otimização do tráfego. As entrevistas com o pessoal do CET contribuíram também para a formulação do projeto (especificação técnica) e assim construir a síntese das soluções.

Foi feito também um levantamento a respeito da contagem de veículos que passam pelas principais vias de acesso.

5. Estudo da viabilidade do projeto

Conforme foi mencionado anteriormente, para o estudo de viabilidade do projeto, foram feitos os seguintes estudos: estabelecimento da necessidade, formulação do projeto especificação técnica e síntese das soluções.

- ***Estabelecimento da necessidade***

Uma vez que a população de São Paulo torna-se cada vez maior e o sistema de transporte urbano coletivo se mostra ineficiente para atender essa demanda crescente, pode-se perceber que está ocorrendo um aumento do número de veículos na região metropolitana de São Paulo.

O aumento do número de veículos de passeio faz com que o tráfego de veículos fique cada vez mais lento, aumentando-se assim os congestionamentos.

Há uma necessidade urgente de se encontrar uma solução que seja capaz de melhorar o tráfego urbano na região de São Paulo. No entanto essa solução tem de ser compatível com a falta de recursos do governo, devendo, portanto, consumir poucos recursos. Nesse sentido devem ser evitadas, como soluções, obras dispendiosas como viadutos, túneis e construção de novas vias.

- ***Formulação do projeto***

Antes de iniciar o estudo das soluções é necessário que seja feita uma identificação total do problema a ser tratado. Assim temos :

- desempenho

Em relação ao desempenho , o sistema a ser projetado deve ser tal que permita simular um trecho do sistema viário proposto .

É necessário que o trecho escolhido represente o maior número de variáveis possíveis existentes no sistema de tráfego urbano.

- segurança

Além disso, temos que o sistema deve ser bastante confiável. Ou seja, como o objetivo é propor um sistema que permita desenvolver modelos e estratégias de controle de um sistema viário, é importante que o modelo construído se aproxime bastante da situação real, permitindo que as estratégias de controle que sejam sugeridas possam ser testadas. Caso o modelo não se aproximasse da realidade, ele não serviria para nada, uma vez que, não seria possível avaliar a eficiência da estratégia de controle proposta.

- custos

Conforme mencionado anteriormente, os gastos devem ser levados em consideração para execução do projeto.

Deve-se evitar soluções muito dispendiosas, tais como construções de pontes e túneis.

Enfim, o projeto proposto deve ser compatível com o orçamento reduzido do município de São Paulo para questões relacionadas ao tráfego urbano.

- durabilidade

Essa característica recai mais sobre o modelo do que em relação à estratégia adotada.

O modelo construído deve ser durável, ou seja, deve permitir que sejam introduzidas mudanças, permitindo que sejam colocadas eventuais alterações que possam vir a ocorrer no sistema viário da cidade de São Paulo no futuro. Isso quer dizer, por exemplo, o modelo deve ser facilmente alterável quando, por exemplo, for necessário incluir mais um semáforo.

- construtiva

Em virtude da própria complexidade do sistema viário da cidade de São Paulo, o modelo a ser proposto deve se limitar a descrever uma parte do sistema viário. Entretanto, conforme mencionado anteriormente, essa parte deve ser bastante representativa. Deve-se entender por representativa, um trecho do sistema viário que contenha o máximo número de variáveis existentes também em outros trechos.

• Síntese das soluções

Através de entrevistas com profissionais especializados do CET (Companhia de Engenharia de Tráfego) e com o professor orientador prof. Dr. Paulo E. Miyagi, foram

levantados possíveis modelos representativos, mostrados na tabela da página seguinte.

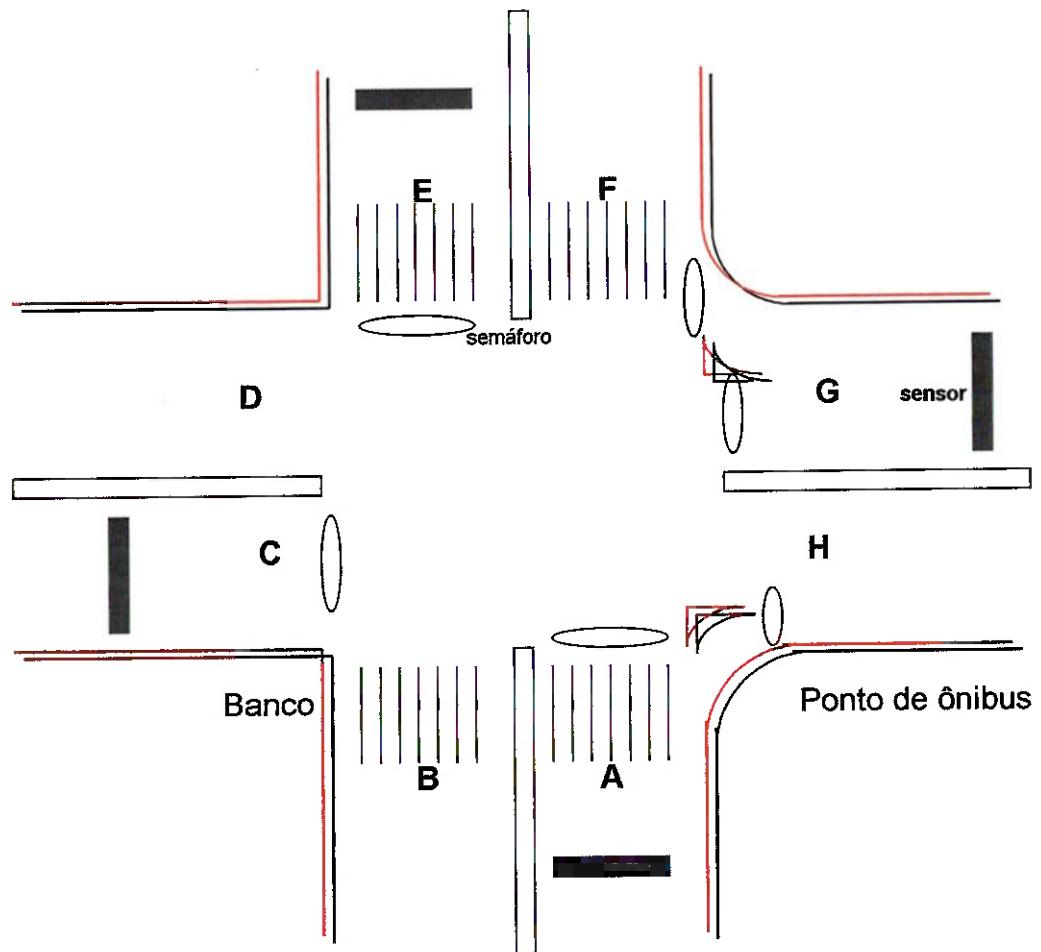
Propostas	Cruzamento entre duas avenidas	Via expressa sem nenhum semáforo	Rua com vários semáforos
Ítems	desempenho	<p>Permite simular como os semáforos, interagem e quais os seus efeitos para o tráfego de veículos</p>	<p>Permite avaliar qual o efeito de uma eventual obstrução de uma via de acesso nas redondezas dessa via, ou mesmo qual a consequência de um acidente para o trânsito nessa via. Essa via expressa poderia simular uma das Marginais.</p>
	Segurança	<p>é bastante confiável, permitindo aproximá-lo por uma situação real.</p>	<p>é bastante confiável, permitindo aproximá-lo por uma situação real.</p>
	Custos	<p>O custo para montagem do igual</p>	<p>é bastante confiável, permitindo aproximá-lo por uma situação real.</p>
	durabilidade	<p>Os três modelos permitem mudanças no sistema viário</p>	<p>que sejam feitas alterações em função de eventuais mudanças de São Paulo.</p>
	construtiva	<p>Ambas as partes</p>	<p>representam um trecho do tráfego de São Paulo</p>

6. Projeto Básico

Propostas	Cruzamento entre duas avenidas	Via expressa sem nenhum semáforo	Rua com vários semáforos
Ítems			
desempenho	10	6	8
Segurança	9	7	7
Custos			
durabilidade			
construtiva			

A melhor solução para modelagem conforme pode-se observar pela matriz de decisão acima refere-se ao cruzamento e duas avenidas. Tal decisão deve-se principalmente ao fato desse cruzamento possuir maior representatividade, uma vez que o esí do cruzamento envolve vários aspectos que influem no desempenho do tráfego urbano, tais como integração pedestre-veículo (atré de faixas de travessia de pedestre , relacionamento entre duas vias que se cruzam em várias direções. Assim, pode-se perceber como a idéia é escolher um trecho para que seja feita a modelagem, a melhor escolha é mesmo de um cruzamento, visto que uma expressa não possui tamanha representatividade como o cruzamento , e a rua com vários semáforos não permite uma análise r ampla, uma vez que trata-se de ruas e não de avenidas, o que acarreta em um fluxo consideravelmente menor de veículos.

A seguir, uma descrição mais detalhada da solução escolhida.



O modelo dispõe das seguintes características: prevê-se o tráfego de veículos de passeio (são considerados veículos de passeio - os veículos automotores de até 5 passageiros) e ônibus (veículos automotores com capacidade máxima de 40 passageiros). Não se prevê o tráfego de caminhões (veículos automotores destinados ao transporte de carga).

Os veículos podem circular nas vias A, B, C, D, E, F, G e H em um único sentido a ser delimitado a seguir. Os veículos podem transitar na pista 1 no sentido AF, na pista 2 no sentido EB, na pista 3, no sentido CH e na pista 4, no sentido GD.

Além disso, há também o tráfego de pedestres. As pessoas podem atravessar a rua nos locais indicados pelas faixas (vide seqüência de traços verticais paralelos nas vias A, B, E e F). Para que os pedestres possam atravessar a rua é necessário que os semáforos que permitem o acesso dos veículos as vias A,B, E e F estejam na posição vermelho.

Além disso, há a travessia de deficientes físicos nas via E e F. Nesse sentido, os semáforos que dão acesso a essas vias devem permanecer mais tempo no vermelho, que os demais.

Outro ponto a ser mencionado, refere-se ao banco localizado na esquina formada pelas vias B e C. A questão é que a maioria dos funcionários utilizam o ônibus como condução. Entretanto o ponto de ônibus localiza-se na esquina das via A com a H. Logo seria interessante, manter os semáforos que permitem aos pedestres atravessarem nas faixas das vias A e B , um maior tempo no vermelho durante os horários de entrada (8:00 às 9:00) e de saída (17:00 às 18:00) dos funcionários do banco.

Os veículos podem sair da via G e ir para a via D ou F. Ou sair da via E e irem para as vias B e H. Ou ainda, sair da via A e ir para as vias D, F ou H. Outra alternativa é sair da via G e ir para a via B, D ou F.

7. Atividades Futuras

Desenvolvimento das estratégias de controle.

Assim, o projeto detalhado anteriormente será representado através de um modelo simbólico. Deve-se entender por modelo simbólico, uma representação da solução proposta utilizando para tanto uma ferramenta, no caso o Promodel.

O Promodel é uma ferramenta de simulação via computador. Com ele é possível representar o fluxo de veículos e pedestres de uma maneira muito semelhante com a realidade. A grande vantagem desse simulador é que ele permite que algumas variáveis sejam alteradas, por exemplo, o número de veículos que estão circulando e verificar como é que isso interfere no conjunto como um todo.

Mas apesar de todo o detalhamento da etapa anterior, talvez nem todas as características sejam possíveis de serem implementadas. Nesse sentido, provavelmente algumas características como a existência do banco na esquina e a travessia de deficientes físicos não sejam levadas em consideração.

A idéia é construir um modelo detalhado (estabelecendo os fluxos primários, secundário e outros parâmetros relevantes). O objetivo é partir do PFS e chegar ao MFG.

Apartir daí, a etapa seguinte é propor e avaliar as estratégias de controle elaboradas.

8. Referências bibliográficas

- Miyagi,P.E. **Controle programável: fundamentos do controle de sistemas a eventos discretos**, Edgard Blucher, São Paulo, 1996.
- Biemans,F.P.; Vissers,C.A. Reference model for manufacturing planning and control systems. *Journal of Manufacturing Systems*, v.8, n.1, p.35-46, 1989.
- Law,A.M. Introduction to simulation: a powerfull tool for analysing complex manufacturing systems. *Industrial Engineering*, p.46-63, May, 1986.
- Manivannan,S.; Banks,J. Towards a realtime knowledge-based simulation system for diagnosing machine tool failure. *90'Winter Simulation Conference Proceedings*, IEEE, p.603-608, 1990.
- Simulation in Manufacturing - Proceedings on the 2nd International Conference, Chicago USA, 1986.

9. Critérios de avaliação

Para a avaliação do modelo proposto será usado o Promodel.

Será implementada a estratégia de controle e será colocado o software em execução.

A melhor estratégia será aquela em que uma vez executada, haverá um número menor de carros aguardando nos semáforos e que não permitirá de maneira alguma que os carros colidam devido à má coordenação dos semáforos entre si (por má coordenação dos semáforos, quando o semáforo S6 fica verde simultaneamente com o semáforo S1 e/ou com o S5. É também considerado uma má coordenação, quando os semáforos S3, S4, S1 e S5 ficam verdes simultaneamente).

Uma boa estratégia deve permitir que uma vez que o pedestre inicie sua travessia da rua, ele possa chegar ao outro lado da rua antes que o semáforo fique verde. Assim, quando, por exemplo, o pedestre estiver atravessando as vias E e F, todos os semáforos que permitem o acesso as vias E e F devem permanecer em vermelho no tempo necessário para eles atravessarem. Analogamente, quando o pedestre estiver atravessando as vias A e B, os semáforos que permitem a passagem de veículos nessas vias devem permanecer no estado vermelho.