

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**

**SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE UMA ONDA VERDE
EM UMA VIA SEMAFORIZADA E SEUS EFEITOS
NO FLUXO CONTRÁRIO**

Aluno: Algirdas Butkevicius Jr.

PROJETO DE FORMATURA 2007



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE UMA ONDA VERDE EM UMA VIA SEMAFORIZADA E SEUS EFEITOS NO FLUXO CONTRÁRIO

Aluno: Algirdas Butkevicius Jr.
Orientador: Cícero Couto de Moraes
Coordenador: Carlos Márcio Vieira Tahan

Relatório Final

PROJETO DE FORMATURA 2007



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a meus pais, Algirdas e Alcinea, meus irmãos Nikolai e Petras e à minha noiva Linei pelo apoio em todos os momentos.

À todos os amigos pelo incentivo.

Ao meu orientador, Prof. Cícero Couto de Moraes e ao coordenador Prof. Carlos Márcio Vieria Tahan, pela ajuda, compreensão e paciência ao longo deste trabalho.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas

Sumário

1. Introdução.....	4
2. Objetivos.....	5
3. Metodologia para configuração da Onda Verde.....	6
3.1 <i>Ciclo Ótimo.....</i>	6
3.2 <i>Tempo de Verde.....</i>	6
3.3 <i>Tempo Morto.....</i>	6
3.4 <i>Capacidade da Intersecção.....</i>	7
3.5 <i>Tempo de atraso.....</i>	8
3.6 <i>Ciclo Ótimo.....</i>	8
4. Apresentando o ARENA.....	11
5. Modelagem dos semáforos.....	17
5.1 <i>Ciclos do semáforo.....</i>	17
5.2 <i>Cruzamentos.....</i>	19
5.3 <i>Trecho.....</i>	20
5.4 <i>Via.....</i>	21
6. Simulação.....	25
6.1 <i>Modelo 1.....</i>	25
6.2 <i>Modelo 2.....</i>	30
6.3 <i>Modelo 3.....</i>	35
6.4 <i>Resultados Obtidos.....</i>	40
7. Conclusões.....	49
8. Referências Bibliográficas.....	50



1. INTRODUÇÃO

O crescimento das cidades, e principalmente da frota de veículos circulantes, vem agravando o problema do trânsito, fazendo dos congestionamentos uma parte da rotina diária nas grandes cidades. Os congestionamentos trazem consigo uma série de problemas à sociedade na forma de desperdício de tempo e combustível, aumento da poluição atmosférica e sonora, desgaste prematuro dos veículos, o que acarreta em falhas e acidentes. O trânsito é apontado como uma das grandes causas de stress na população, o que mostra que os congestionamentos também trazem um grande prejuízo à saúde da população, não só com doenças relacionadas ao stress como também doenças respiratórias relacionadas com a poluição. Estima-se que, em uma grande cidade, 50% do tempo das viagens e 30% do consumo de combustível são gastos com veículos parados em cruzamentos aguardando o semáforo ficar verde.

Uma forma de minimizar esses problemas é a sincronização de semáforos, criando um efeito conhecido como “onda verde”, no qual um veículo viajando na velocidade determinada pela configuração da “onda” vai encontrar os semáforos dos cruzamentos sempre na fase verde, reduzindo o tempo desperdiçado na viagem e contribuindo para um melhor fluxo dos veículos naquela via.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas

2. OBJETIVOS

A finalidade deste projeto é modelar e simular uma via de 4 cruzamentos, e estudar o acionamento dos semáforos de modo que mudem para a fase de verde de forma seqüencial, formando uma “onda verde”, para que os carros que vierem no sentido da onda não tenham de parar nos cruzamentos, melhorando assim o trânsito naquele sentido. Uma outra parte do projeto consta na análise do efeito provocado pela onda verde no fluxo de veículos nos dois sentidos da via, comparando-os com os efeitos provocados em ambos os sentidos por outros padrões de sincronização dos semáforos.



3. METODOLOGIA PARA CONFIGURAÇÃO DA ONDA VERDE

3.1. Ciclo ótimo

Para configurar uma “onda verde” que cause o máximo efeito positivo no tráfego é necessário calcular o ciclo ótimo de verde nos semáforos da via em estudo. Para isso a CET fornece normas técnicas que definem como esse cálculo deve ser realizado.

O cálculo do tempo ótimo de verde depende do fluxo de saturação do cruzamento, que é determinado pela quantidade de veículos que passa pelo cruzamento durante o período de verde, geralmente expresso em veículos por hora verde.

De posse do fluxo na via, obtido pela análise estatística de dados coletados pela CET, pode-se então calcular o tempo do ciclo dos semáforos.

3.2. Tempo de verde

Considerando **G** o tempo de verde efetivo (tempo em que a luz verde do semáforo fica acesa) mais o tempo morto (tempo que os veículos levam para acelerar até a velocidade de cruzamento mais o tempo de desaceleração frente à luz amarela), temos:

$$g = G - t \quad (I)$$

$$\text{Capacidade} = \frac{gS}{C} \quad \text{em veículos por hora} \quad (II)$$

Onde:

g = tempo de verde efetivo

t = período de tempo morto

G = tempo total entre vermelhos

Capacidade = capacidade da via



C = tempo do ciclo em segundos

S = fluxo de saturação em veículos por hora verde

O tempo de verde mostrado pelo foco semafórico é:

$$\text{Verde de foco} = g + t - a = G - a \quad (\text{III})$$

Onde **a** = tempo de amarelo

3.3. Tempo morto

O tempo morto total do ciclo “L” pode ser determinado como:

$$L = (I - a) + t \quad (\text{IV})$$

Onde **I** é o tempo entre verdes.

3.4. Capacidade da intersecção

Supondo que o fluxo de veículos se mantém constante durante todo o período verde, então com o aumento do ciclo haverá um aumento da capacidade de fluxo da intersecção, uma vez que o tempo morto do ciclo diminui. Porém para ciclos muito longos é observado que essa diferença não é tão significativa. Por esse motivo é usual se estabelecer um limite máximo de 120 segundos por ciclo, apesar de que, em casos especiais pode-se estipular um ciclo mais longo.

O ciclo mínimo suficiente apenas para passar todo o tráfego é dado por:



$$Cm = \frac{L}{1-Y} \quad (V)$$

Onde:

Cm = ciclo mínimo

Y = soma das taxas de ocupação (Σy)

L = tempo morto total do ciclo

O problema ao se adotar o ciclo mínimo é que podem surgir atrasos cumulativos uma vez que todas as intersecções estarão operando no seu limite de capacidade.

3.5. Tempo de atraso

O atraso médio de um cruzamento controlado por um semáforo de tempo fixo é:

$$d = \frac{9}{10} \left[\frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} \right] \quad (VI)$$

Onde:

d = atraso médio por veículo no cruzamento

λ = g/C = proporção de verde efetivo em relação ao ciclo

x = $q/\lambda S$ = grau de saturação

q = fluxo do cruzamento

3.6. Ciclo ótimo

Derivando a expressão do atraso em relação ao tempo de ciclo e igualando a zero obtém-se a expressão para a qual o atraso é mínimo, ou seja, o tempo de ciclo ótimo.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas

$$Co = \frac{1,5L + 5}{1 - Y} \quad (\text{VII})$$

Onde:

Co = tempo de ciclo ótimo

L = tempo morto total do cruzamento

Y = soma das taxas de ocupação

Em condições de tráfego leve, o ciclo ótimo calculado pode ser muito pequeno, então é aconselhável que se mantenha um tempo de ciclo mínimo de 25 segundos. Aconselha-se a manter um limite máximo de 125 segundos, uma vez que não há uma diferença significativa além desse ponto.

Para ciclos entre $\frac{3}{4}$ e 1,5 do ciclo ótimo, o atraso adicional observado é de 10 a 20%.

Os tempos de verde efetivo devem ser proporcionais às respectivas filas de aproximação, portanto:

$$\frac{g1}{g2} = \frac{y1}{y2} \quad (\text{VIII})$$

De posse do valor do ciclo ótimo, o tempo de verde efetivo total é igual **Co** – **L**, resultando:

$$g1 = \frac{y1}{Y} (Co - L) \quad (\text{IX})$$

$$g2 = \frac{y2}{Y} (Co - L) \quad (\text{X})$$



Como agora já é conhecido o tempo de ciclo ótimo dos semáforos, tem-se início o processo de sincronização dos cruzamentos, levando-se em conta a distância entre os mesmos e a velocidade limite da via, é possível sincronizar os semáforos de forma a criar a “onda verde”.

É importante notar que a correta sincronização dos semáforos em um sentido da via leva ao aparecimento de uma “onda verde” que percorre a via em sentido contrário à primeira, geralmente cruzando a via em seu ponto médio.

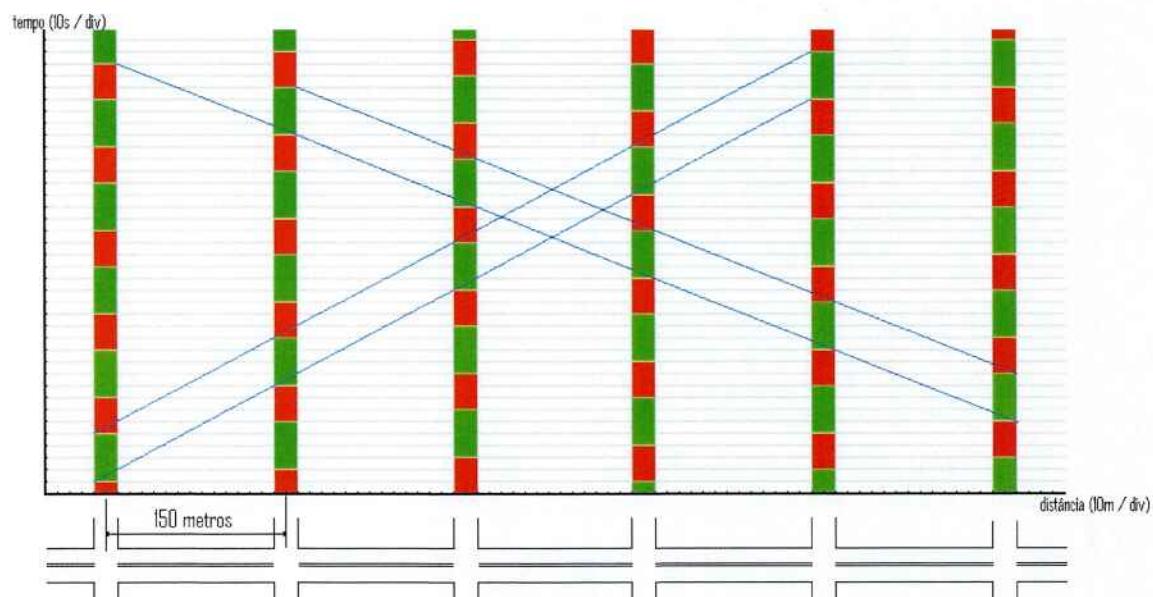


figura 1

A figura acima mostra as duas “ondas verdes” viajando pela via em sentidos contrários.

O software ARENA será utilizado para modelar a via e seus cruzamentos e simular os diversos padrões de sincronia e seus efeitos no fluxo de veículos ao longo da via. Essa simulação servirá para estudar os efeitos de várias configurações de sincronização dos semáforos.



4. APRESENTANDO O ARENA

O software ARENA fornecido pela Rockwell Automation será utilizado para simular o modelo da “onda verde” para uma análise dos efeitos da mesma na via.

A modelagem no ARENA é feita através a interligação de blocos funcionais onde as *entidades* trafegam de acordo com as propriedades definidas pelo usuário. As *entidades* representam os objetos do processo a ser modelado, neste caso os veículos que trafegam na via. Elas entram e saem do sistema, movendo-se através dos blocos conforme as características do modelo permitem.

As *entidades* podem ser conferidas características especiais denominadas *atributos*. Esses *atributos* podem ser pré-definidos ou estabelecidos pelo usuário de acordo com as necessidades do modelo.

As *entidades* podem ser alocadas a *recursos* e permanecem nesses locais enquanto são processadas ou aguardam a liberação da fila.

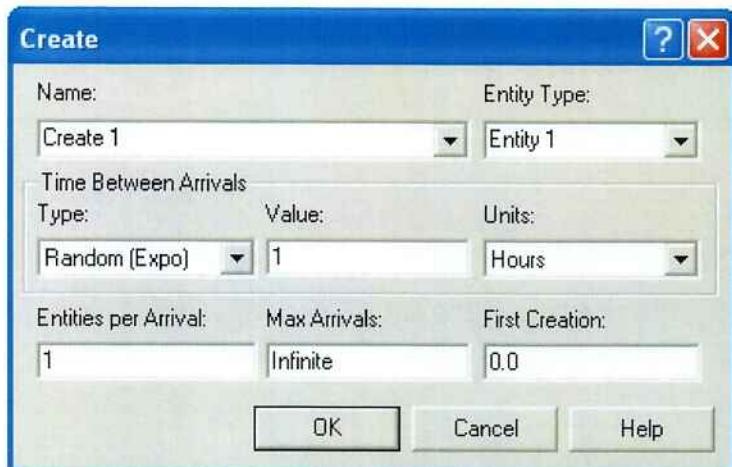
Além das *entidades* podem ser definidas também *variáveis*, que não trafegam pelo sistema mas podem ser alteradas no decorrer do processo.

As *entidades* movem-se de um bloco para outro através das *rotas* interligadas entre os blocos.

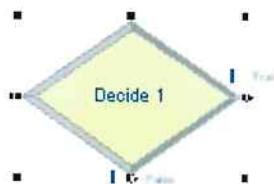
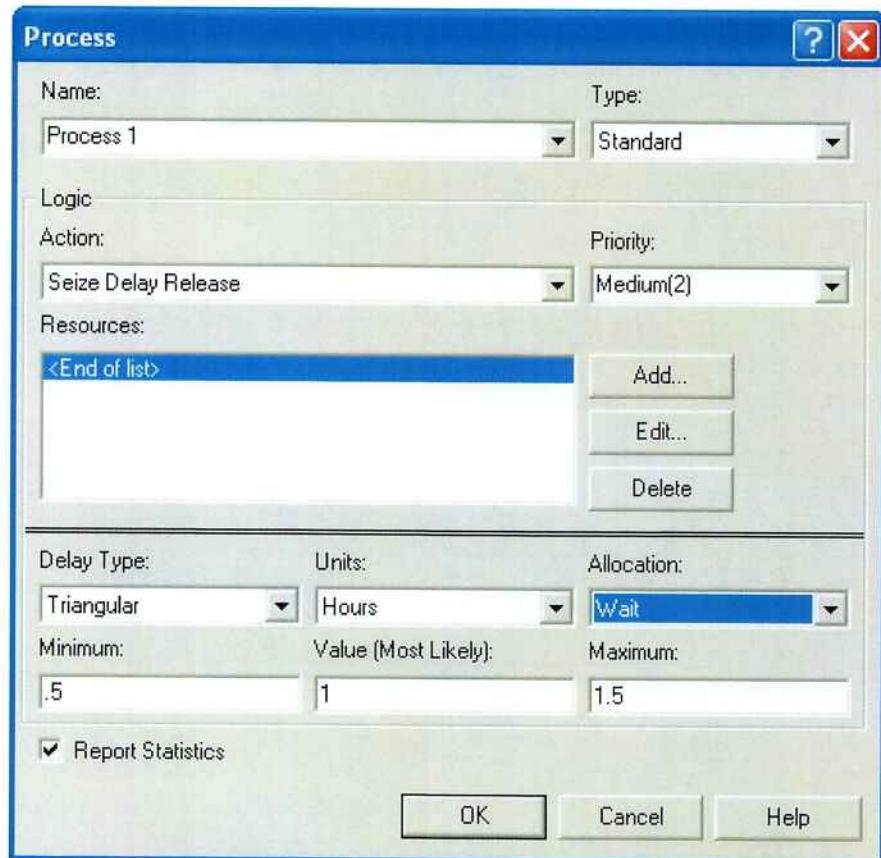
Os blocos básicos de modelagem do ARENA são descritos a seguir:



CREATE: Cria as entidades que irão trafegar pelo modelo, neste bloco são definidos o nome da entidade e o tempo entre a criação de entidades assim como o número de entidades criadas por vez e o número limite de entidades a serem criadas..



PROCESS: O principal bloco do modelo, que definirá o processo a ser executado com a entidade que passará por ele. Neste bloco são definidas as ações aplicadas às entidades, alocação de recursos do processo e tempo em que a entidade ficará retida neste processo.

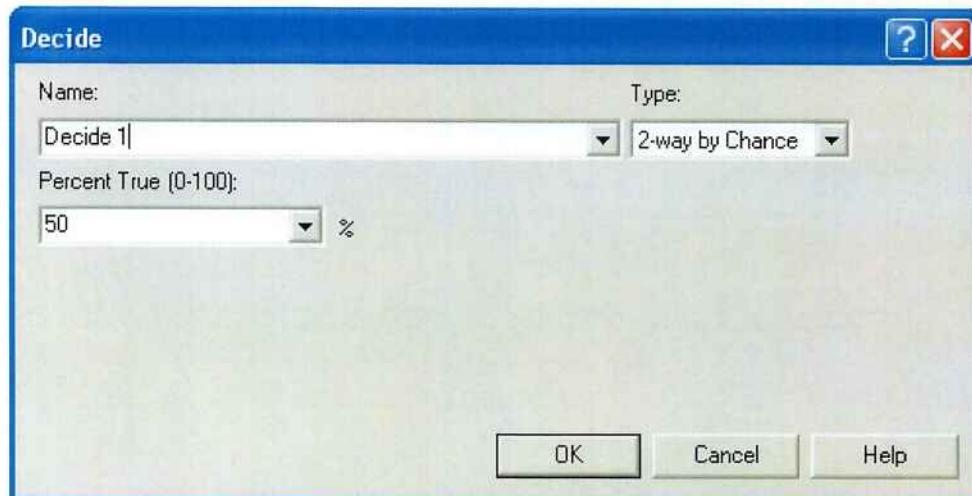


DECIDE: Bloco de tomada de decisão no processo, define para onde vão as entidades de acordo com condições definidas pelo usuário.

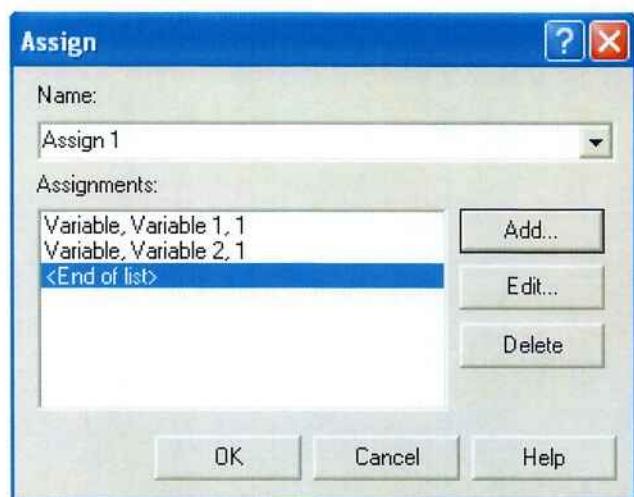


ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas

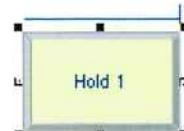
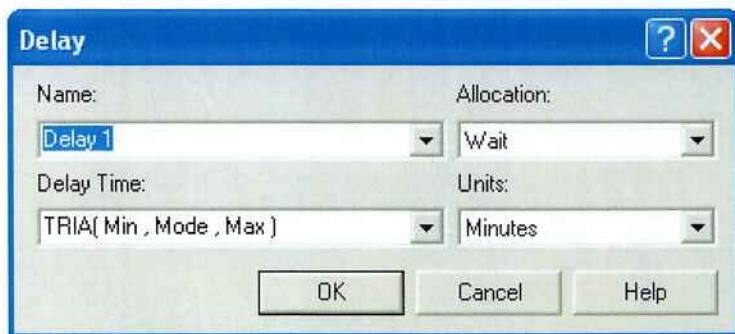


- **ASSIGN:** Usado para definir valores de variáveis, atributos de entidades e outras variáveis do sistema. Várias definições podem ser feitas com um único bloco ASSIGN.

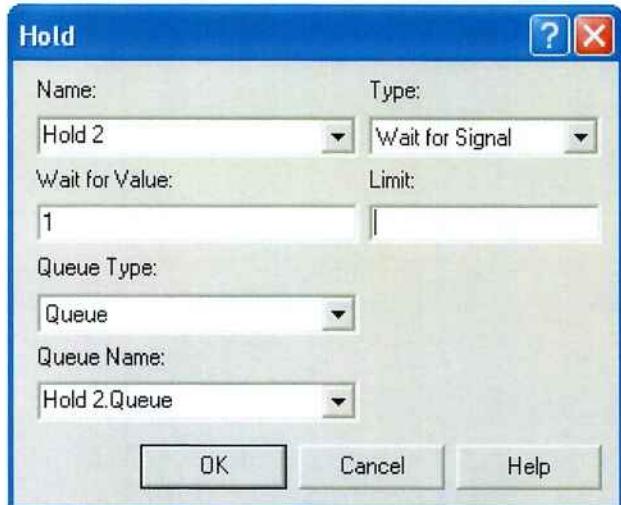




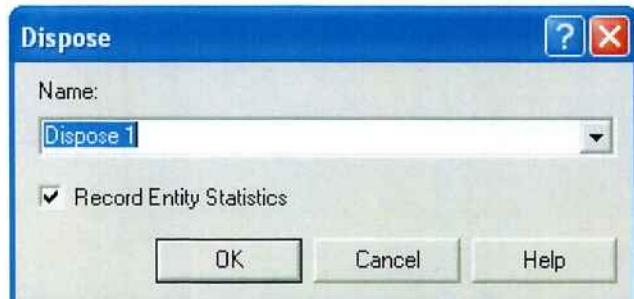
DELAY: As entidades que chegam ao bloco DELAY permanecem em espera, simulando a passagem do tempo no processo, até que o tempo definido tenha transcorrido, seguindo novamente seu curso normal.



HOLD: Bloco cuja função é reter as entidades em uma fila até que uma condição específica seja alcançada, passando então a liberar as entidades da fila, por ordem de chegada, enquanto a condição de processo definida estiver ativa. Voltando a reter as entidades tão logo esta condição cesse.



DISPOSE: Uma vez que entram entidades no processo, elas devem ter como sair e esta é a função do bloco DISPOSE. Remover permanentemente as entidades do processo. Há a opção de registrar estatísticas referentes a entidades que deixam o processo.



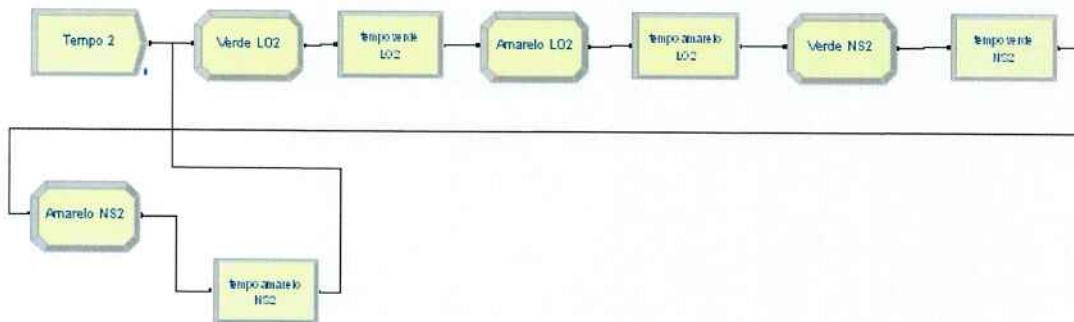
Os blocos do ARENA podem ser agrupados em submodelos, permitindo a criação de funções mais específicas no caso de modelos mais complexos.



5. MODELAGEM DOS SEMÁFOROS

A via por onde irá passar a “onda verde” será modelada em blocos contendo vários submodelos, descritos abaixo.

5.1. Ciclos do semáforo



Este bloco é responsável por determinar os tempos de ciclo dos semáforos.

Composto de um bloco CREATE, que vai criar uma entidade única que irá trafegar por um sistema fechado de blocos em um loop infinito, passando continuamente pelos blocos de processo. O loop fechado é formado por blocos DELAY onde às entidades será aplicado um tempo de atraso através da operação *Wait*, o atraso na entidade é fixo para cada bloco e é associado ao tempo correspondente a cada fase do semáforo. Entre os blocos de DELAY existirão blocos de ASSIGN que definirão as variáveis que representam quais luzes do semáforo estarão acesas. Assim, quando a entidade é criada, ela entra no loop já passando pelo primeiro bloco ASSIGN, denominado *Verde LO n* (onde n é o número do cruzamento, pois no ARENA não são permitidos blocos de nomes iguais), onde são definidos os valores de 1 (verdadeiro) para as variáveis *Verde LOn* e 0 (falso) para as variáveis *Amarelo LOn*, *Verde NSn* e *Amarelo NSn*, indicando que a partir deste momento o cruzamento n está na fase de verde para o sentido Leste-Oeste e vermelho para o sentido Norte-Sul. Saindo do



bloco *Verde LOn*, a entidade passa pelo bloco *DELAY* denominado *tempo verde LOn*, que irá segurar a entidade até que o tempo definido pela variável *tempo verde LO* tenha passado, quando a entidade é liberada. Este passo faz a contagem do tempo da fase de verde para o cruzamento no sentido Leste-Oeste. Passado o tempo de espera a entidade é liberada e passa então pelo bloco *ASSIGN* denominado *Amarelo LOn* onde serão atribuídos os valores 1 para a variável *Amarelo LOn* e 0 para as variáveis *Verde LOn*, *Amarelo NSn* e *Verde NSn*, indicando assim que o cruzamento encontra-se na fase de amarelo no sentido Leste-Oeste e vermelho no sentido Norte-Sul. O bloco seguinte é um bloco de *DELAY* denominado *tempo amarelo LOn* que irá reter a entidade durante o tempo especificado pela variável *tempo amarelo LO* que indica a duração da fase de amarelo para o sentido Leste-Oeste. Passado o tempo de espera, a entidade é liberada para o bloco seguinte, um *ASSIGN* denominado *Verde NSn* onde será atribuído o valor 1 à variável *Verde NSn* e valor 0 às variáveis *Verde LOn*, *Amarelo LOn* e *Amarelo NSn*, pois o cruzamento agora se encontra na fase de verde para o sentido Norte-sul e vermelho para o sentido Leste-Oeste. O próximo bloco por onde a entidade passará é o *DELAY* *tempo verde NSn* que define o tempo da fase de verde para o sentido Norte-Sul, após decorrido o tempo definido pela variável *tempo verde NS*, a entidade é liberada para o próximo bloco, um *ASSIGN* denominado *Amarelo NSn* que irá atribuir o valor 1 para a variável *Amarelo NS* e 0 para as demais, indicando assim a fase de amarelo para o sentido Norte-Sul e vermelho para o sentido Leste-Oeste. O próximo e último bloco do loop é um *DELAY* denominado *tempo amarelo NSn* que irá reter a entidade pelo tempo determinado pela variável *tempo amarelo NS*, responsável pelo tempo da fase de amarelo no sentido Norte-Sul. Passado o tempo da fase de amarelo Norte-Sul, a entidade retornará para o primeiro bloco do loop, o *ASSIGN* *Verde LOn* e então reiniciará o processo.

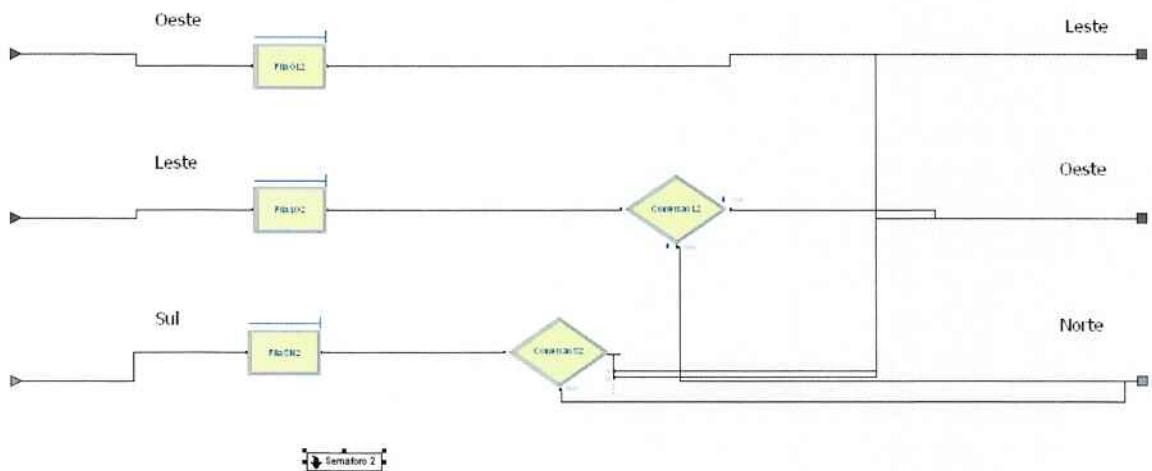
No bloco *CREATE*, é possível alterar o tempo de criação da primeira (e única, neste caso) entidade. É através deste atributo que serão sincronizados os semáforos da via.

Note-se que não há variável indicando a fase de vermelho, que se caracteriza pela ausência das fases verde e amarela. Esta medida foi necessária pois a versão do ARENA



utilizada (versão estudantil) possui uma limitação quanto ao número de variáveis que podem existir no modelo.

5.2. Cruzamentos



O bloco de submodelo dos cruzamentos irá utilizar o submodelo *Ciclos do semáforo* para definir quais luzes estão acesas, blocos de HOLD que serão responsáveis por criar as filas de veículos parados no cruzamento e blocos de DECIDE que determinarão se os veículos irão convergir da via principal para a via secundária ou se os veículos da via secundária irão convergir para a via.

Quando uma entidade de veículo entra no bloco do submodelo *Cruzamento*, ela pode fazê-lo por 3 maneiras: pela entrada Oeste, caso seja um veículo que esteja trafegando na via no sentido Leste-Oeste; pela entrada Leste, no caso de veículos trafegando no sentido Oeste-Leste e pela entrada Norte ou Sul, dependendo do cruzamento, por onde chegam os veículos oriundos das vias transversais.

Temos então dois modelos de cruzamento, um em que os veículos chegam no sentido Norte-Sul e outro em que os veículos chegam no sentido Sul-Norte. Isso definirá as

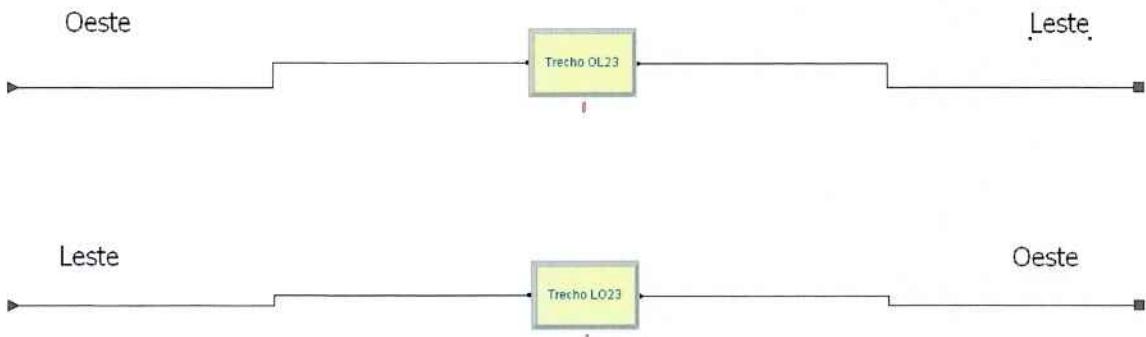


opções de conversão dos veículos no cruzamento, sendo que nos cruzamentos com veículos chegando no sentido Norte-Sul, estes poderão fazer a conversão à direita, à esquerda ou seguir em frente, já os veículos chegando no sentido Oeste-Leste têm a opção de fazer a conversão à direita ou seguir adiante, enquanto veículos trafegando na direção Leste-Oeste devem seguir em frente, apenas. Nos cruzamentos com veículos chegando no sentido Sul-Norte, estes têm a opção de fazer a conversão à esquerda, à direita ou seguir adiante, os veículos trafegando no sentido Leste-Oeste poderão fazer a conversão à direita ou seguir adiante e os veículos no sentido Oeste-Leste são obrigados a seguir em frente.

Quando uma entidade de veículo entra no submodelo pela entrada Norte ou Sul, ela vai ao bloco HOLD denominado *Fila NSn* (ou *SNn*) onde irá aguardar a fase de verde no sentido Norte-Sul, onde então poderá passar ao bloco DECIDE denominado *Conversão Nn* (ou *Sn*), que irá definir para onde a entidade deverá seguir. Foi estipulado que os veículos vindos das ruas transversais irão fazer a conversão à direita em 20% dos casos, à esquerda em 30% e o restante continuará a transitar pela via transversal, saindo do sistema.

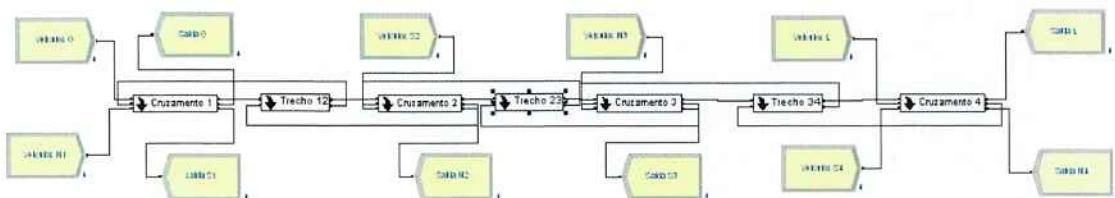
As entidades que representam os veículos que trafegam na via principal param nos blocos HOLD chamados *Fila OLn* e *Fila LOn*, onde aguardam a liberação do semáforo na fase de verde, para então seguirem para o bloco DECIDE *Conversão On* (ou *Ln*) ou então seguir direto para a saída, dependendo do tipo de cruzamento. Caso a entidade vá para o bloco de decisão, ela tem 25% de chance de fazer a conversão à direita, do contrário ela seguirá na via principal.

5.3. Trecho



O bloco do submodelo *Trecho* irá representar a via entre os cruzamentos, aplicando um tempo de atraso à entidade, representando o tempo de percurso entre um cruzamento e o próximo. Utilizou-se para tal o bloco de função PROCESS com a operação Delay com um tempo equivalente ao necessário para se percorrer o trecho na velocidade estipulada para a onda verde e seguindo uma distribuição triangular com uma pequena variação, para refletir as diferenças de velocidades entre os veículos. Podem-se variar o tamanho dos quarteirões da via no modelo alterando este valor para ambos os blocos.

5.4. Via



O modelo da via irá utilizar-se dos blocos de submodelos já formados e interligará todos em seqüência para que as entidades que representarão os veículos trafeguem pela via através dos semáforos. Os blocos de Cruzamentos são alimentados por blocos CREATE,



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas

que fornecerão ao modelo as entidades que representarão os veículos que atravessarão a via.

O submodelo *Cruzamento 1* é alimentado pelos blocos CREATE denominados *Veículos O* e *Veículos N1* e pelo submodelo *Trecho 12*. O bloco *Veículos O* irá criar as entidades *veículos O*, que atravessarão a via no sentido Oeste-Leste, que é o mesmo sentido da onda verde. O bloco *Veículos N1* irá criar as entidades *veículos N1* que cruzarão a via no primeiro cruzamento no sentido Norte-Sul e os veículos vindos do *Trecho 12* irão entrar no cruzamento no sentido Leste-Oeste, que é o sentido contrário à onda verde. Os veículos *N1* que não fizerem conversão nem à direita nem à esquerda deixam o submodelo e são eliminados do sistema através do DISPOSE *Saída S1*. Os veículos vindos do *Trecho 12* passam pelo cruzamento e são eliminados pelo DISPOSE *Saída O*. Os veículos vindos do sentido Oeste e que não fazem conversão à direita, sendo eliminados pelo *Saída S1*, seguem para o *Trecho 12*.

No *Trecho 12*, os veículos sofrerão um atraso correspondente ao tempo necessário para trafegar do cruzamento 1 ao cruzamento 2. Os veículos vindos do *Cruzamento 1* deixam o bloco indo para o *Cruzamento 2* e os veículos vindos do *Cruzamento 2* deixam o bloco indo para o *Cruzamento 1*.

O submodelo *Cruzamento 2* é alimentado pelo bloco CREATE denominado *Veículos S2* e pelos submodelos *Trecho 12* e *Trecho 23*. O bloco *Veículos S2* irá criar as entidades *veículos S2* que cruzarão a via no segundo cruzamento no sentido Sul-Norte, os veículos vindos do *Trecho 12* irão passar pelo cruzamento no sentido Oeste-Leste e os veículos vindos do *Trecho 23* entrarão no cruzamento pelo sentido Leste-Oeste. Os *veículos S2* que não fizerem conversão nem à direita nem à esquerda deixam o submodelo e são eliminados do sistema através do DISPOSE *Saída N2*. Os veículos vindos do *Trecho 12* passam pelo cruzamento e seguem para o *Trecho 23*. Os veículos vindos do *Trecho 23* e que não fazem conversão à direita, sendo eliminados pelo *Saída N2*, seguem para o *Trecho 23*.



No *Trecho 23*, os veículos sofrerão um atraso correspondente ao tempo necessário para trafegar do cruzamento 2 ao cruzamento 3. Os veículos vindos do *Cruzamento 2* deixam o bloco indo para o *Cruzamento 3* e os veículos vindos do *Cruzamento 3* deixam o bloco indo para o *Cruzamento 2*.

O submodelo *Cruzamento 3* é alimentado pelo bloco CREATE denominado *Veículos N3* e pelos submodelos *Trecho 23* e *Trecho 34*. O bloco *Veículos N3* irá criar as entidades *veículos N3* que cruzarão a via no segundo cruzamento no sentido Norte-Sul, os veículos vindos do *Trecho 23* irão passar pelo cruzamento no sentido Oeste-Leste e os veículos vindos do *Trecho 34* entrarão no cruzamento pelo sentido Leste-Oeste. Os *veículos N3* que não fizerem conversão nem à direita nem à esquerda deixam o submodelo e são eliminados do sistema através do DISPOSE *Saída S3*. Os veículos vindos do *Trecho 34* passam pelo cruzamento e seguem para o *Trecho 32*. Os veículos vindos do *Trecho 32* e que não fazem conversão à direita, sendo eliminados pelo *Saída S3*, seguem para o *Trecho 34*.

No *Trecho 34*, os veículos sofrerão um atraso correspondente ao tempo necessário para trafegar do cruzamento 3 ao cruzamento 4. Os veículos vindos do *Cruzamento 3* deixam o bloco indo para o *Cruzamento 4* e os veículos vindos do *Cruzamento 4* deixam o bloco indo para o *Cruzamento 3*.

O submodelo *Cruzamento 4* é alimentado pelos blocos CREATE denominados *Veículos L* e *Veículos S4* e pelo submodelo *Trecho 34*. O bloco *Veículos L* irá criar as entidades *veículos L*, que atravessarão a via no sentido Leste-Oeste, que é o sentido Contrário à onda verde. O bloco *Veículos S4* irá criar as entidades *veículos S4* que cruzarão a via no primeiro cruzamento no sentido Sul-Norte e os veículos vindos do *Trecho 34* irão entrar no cruzamento no sentido Oeste-Leste, que é o mesmo sentido da onda verde. Os veículos *S4* que não fizerem conversão nem à direita nem à esquerda deixam o submodelo e são eliminados do sistema através do DISPOSE *Saída N4*. Os veículos vindos do *Trecho 34* passam pelo cruzamento e são eliminados pelo DISPOSE *Saída L*. Os veículos vindos



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas

do sentido Leste e que não fazem conversão à direita, sendo eliminados pelo *Saída N4*,
seguem para o *Trecho 34*.



6. SIMULAÇÃO

Serão feitas simulações nas seguintes configurações do modelo:

6.1. Modelo 1

Nesta configuração os trechos entre os cruzamentos possuem tamanhos diferentes entre si, atributo configurado através do tempo da função Delay nos blocos de Trecho, e o tempo de verde para o sentido Leste-Oeste está fixado em 35 segundos que é um tempo menor do que o necessário para se cruzar o trecho entre um cruzamento e outro e o tempo de verde para o sentido Norte-Sul está fixado em 20 segundos.

Neste modelo foram realizadas simulações em 5 configurações diferentes:

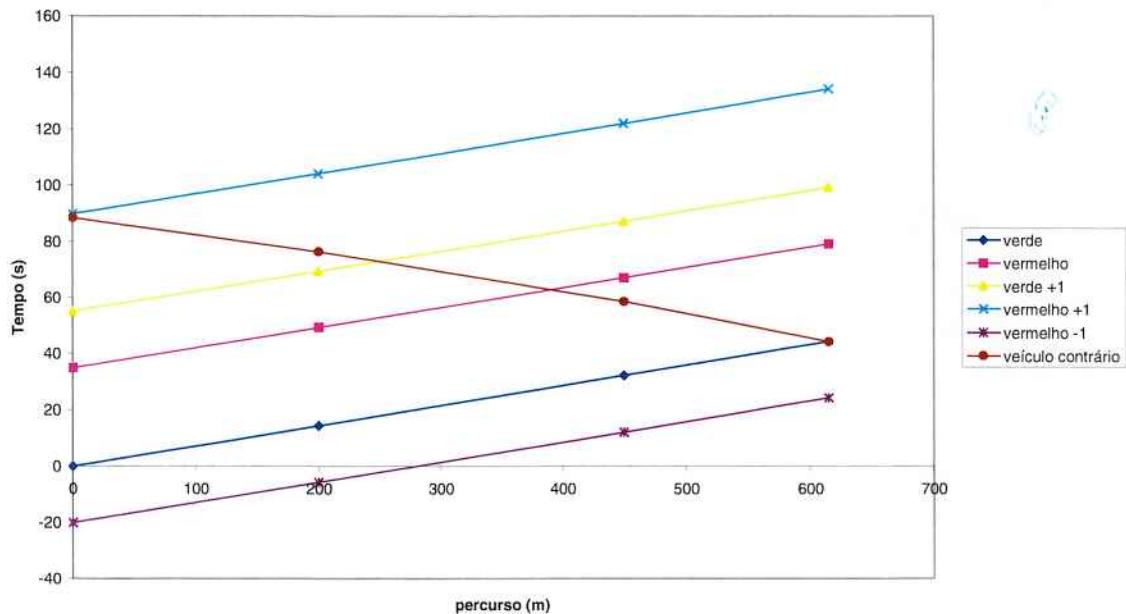
- Onda verde – Nesta configuração os semáforos estão sincronizados para que o semáforo à jusante de um cruzamento no sentido Oeste-Leste dê início à sua fase de verde no sentido Oeste-Leste depois de passado um intervalo de tempo equivalente ao tempo necessário para que um veículo vindo do cruzamento à montante chegue ao cruzamento após percorrer o trecho entre os semáforos. Podemos observar no gráfico abaixo a seqüência de ativação das fases de verde nesta configuração. Os pontos no gráfico representam os cruzamentos (o cruzamento 1 encontra-se no eixo y) e cada reta representa uma fase do semáforo. Nota-se então que, se um veículo trafegar nesta via na velocidade estipulada pelo coeficiente angular das retas do gráfico (nesta simulação 50 km/h) ele encontrará todos os semáforos na fase verde, não tendo de parar durante o percurso. Nota-se que um veículo na mesma velocidade, porém em sentido contrário também não encontrará semáforos em fase vermelha.



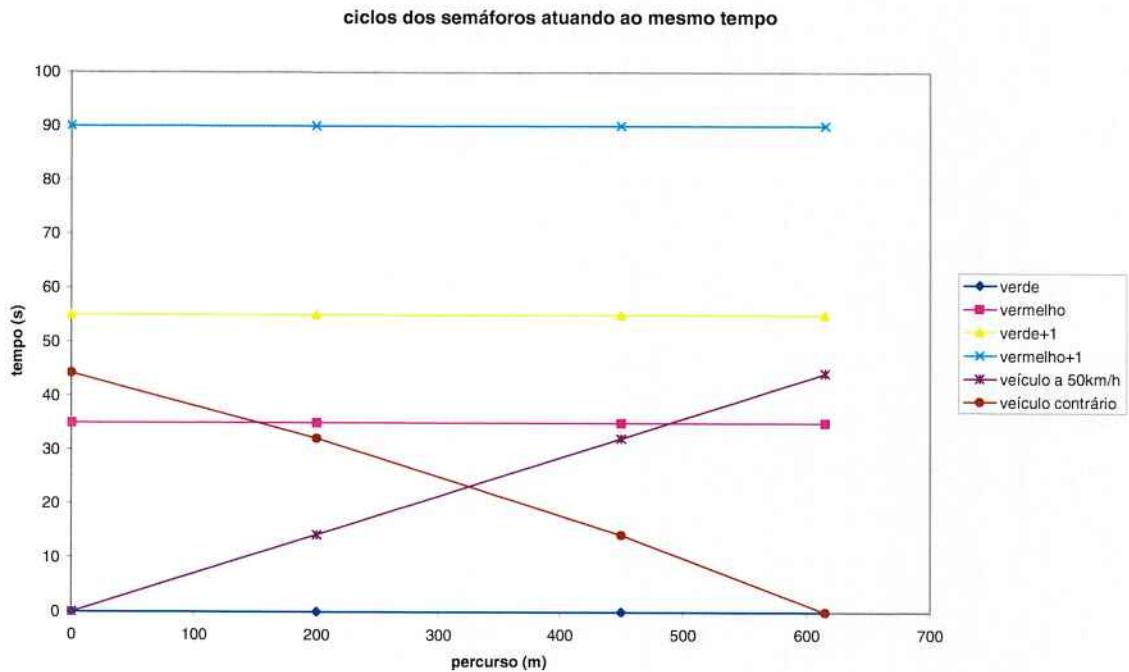
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas

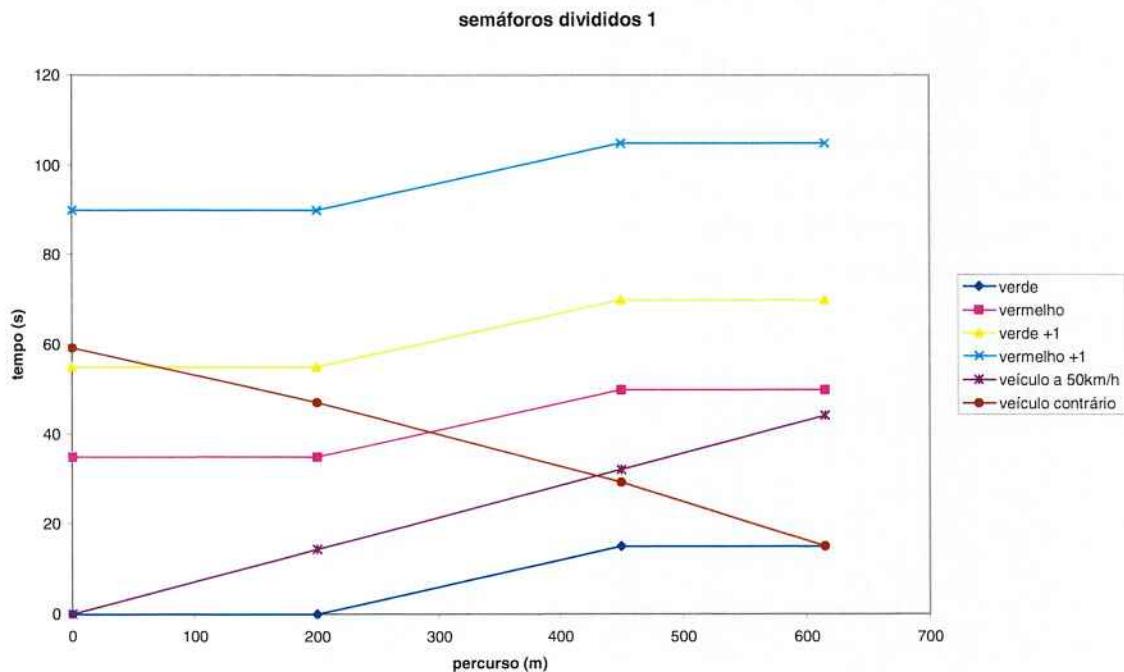
seqüência de ativação das fases de verde na onda verde



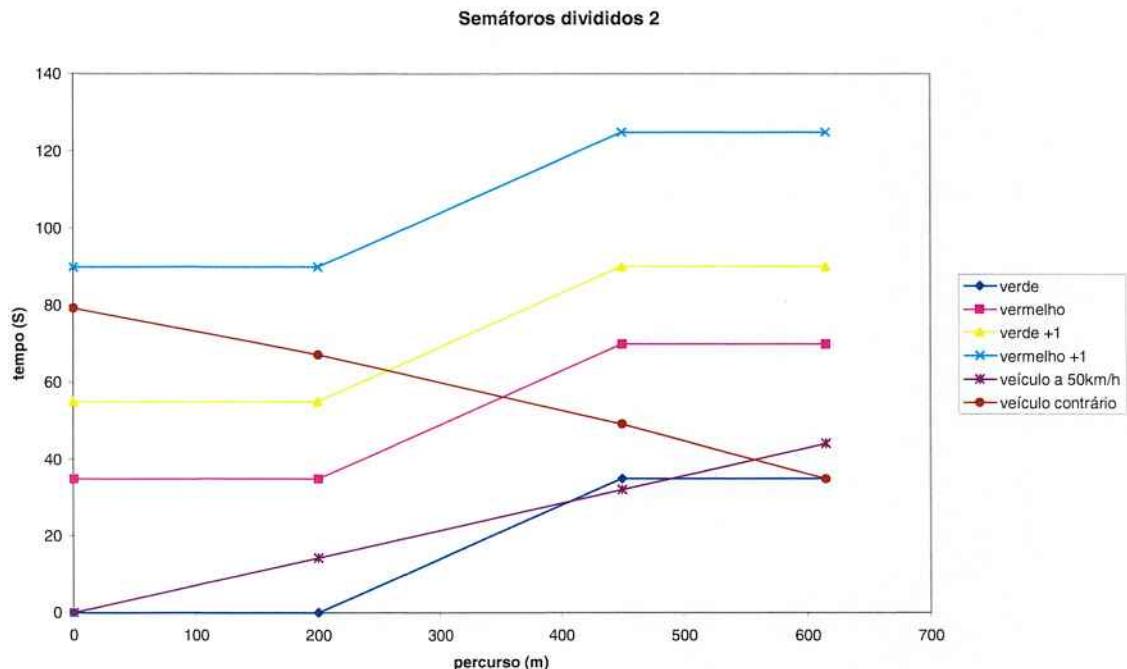
- Semáforos simultâneos – Nesta configuração todos os semáforos da via entram na fase de verde ao mesmo tempo. Não há atraso entre atuações entre semáforos e nota-se que um veículo trafegando a um velocidade de 50 Km/h encontrará os cruzamentos 1, 2 e 3 ainda em fase de verde, tendo de parar somente no cruzamento 4. Isso se deve ao fato de que o tempo de fase de verde é superior ao necessário para que o veículo atravesse o trecho entre um cruzamento e outro. Ao mesmo tempo, um veículo vindo na mesma velocidade em sentido contrário tem o comportamento similar, parando somente no semáforo 3.



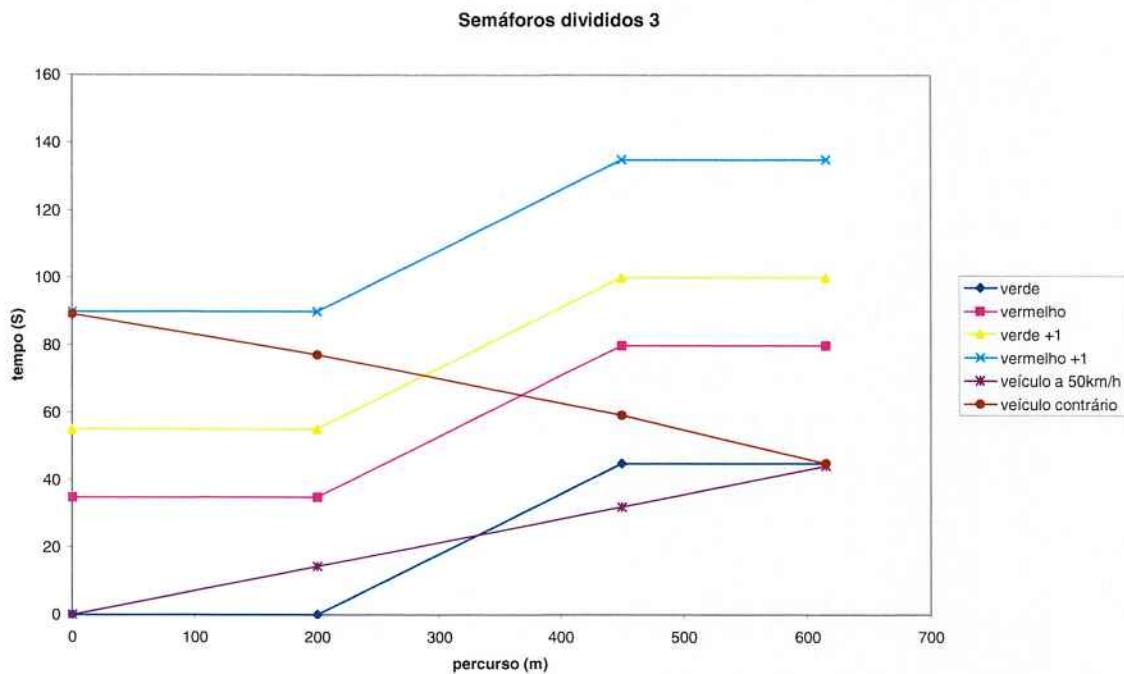
- Semáforos divididos 1 – Nesta configuração, os semáforos 1 e 2 atuam ao mesmo tempo enquanto os semáforos 3 e 4 atuam juntos após um atraso de 15 segundos, que é um intervalo de tempo menor do que o tempo de fase de verde. Nota-se que, devido ao atraso de atuação entre os semáforos iniciais e finais, somado ao elevado tempo de verde, um veículo percorrendo a via a 50Km/h encontrará todos os semáforos em fase verde, mas um veículo vindo no sentido contrário encontrará o semáforo 2 em fase vermelha, sendo forçado a aguardar na fila.



- Semáforos divididos 2 - Nesta configuração, os semáforos 1 e 2 atuam ao mesmo tempo enquanto os semáforos 3 e 4 atuam juntos após um atraso de 35 segundos, que é um intervalo de tempo igual ao tempo de fase de verde. Nota-se que, devido ao atraso de atuação entre os semáforos iniciais e finais, somado ao elevado tempo de verde, um veículo percorrendo a via a 50Km/h encontrará apenas o semáforo 3 em fase vermelha, tendo de parar por um breve momento até que a fase de verde se inicie, porém, um veículo vindo em sentido contrário não encontrará nenhum semáforo em fase vermelha, nota-se no gráfico abaixo que, quando o veículo em sentido contrário atinge o semáforo 2, este já saiu da fase vermelha e está no segundo ciclo em sua fase de verde.



- Semáforos divididos 3 - Nesta configuração, os semáforos 1 e 2 atuam ao mesmo tempo enquanto os semáforos 3 e 4 atuam juntos após um atraso de 45 segundos, que é um intervalo de tempo maior do que o tempo de fase de verde. Nota-se que, devido ao atraso de atuação entre os semáforos iniciais e finais, somado ao elevado tempo de verde, um veículo percorrendo a via a 50Km/h encontrará o semáforo 3 em fase vermelha, tendo de parar por um momento até que a fase de verde se inicie, já um veículo vindo no sentido contrário encontrará apenas o semáforo 1 (o último em seu percurso) iniciando a fase vermelha.



6.2. Modelo 2

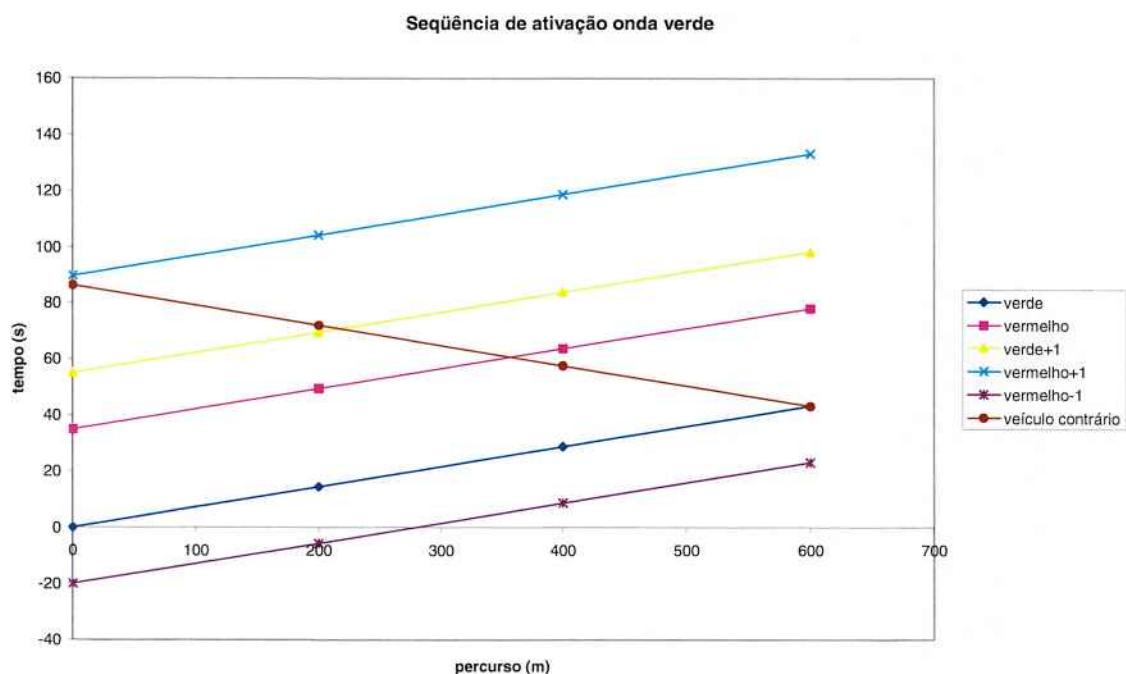
Neste modelo foram modificados os tamanhos dos trechos, tornando-os iguais e fazendo com que o modelo se torne simétrico, sendo visto do mesmo modo pelos veículos no sentido Oeste-Leste e pelos veículos no sentido Leste-Oeste. Os tempos de verde permanecem os mesmos do modelo anterior, 35 segundos para o sentido Leste-Oeste e 20 segundos para o sentido Norte-Sul.

Neste modelo foram realizadas simulações em 5 configurações diferentes:

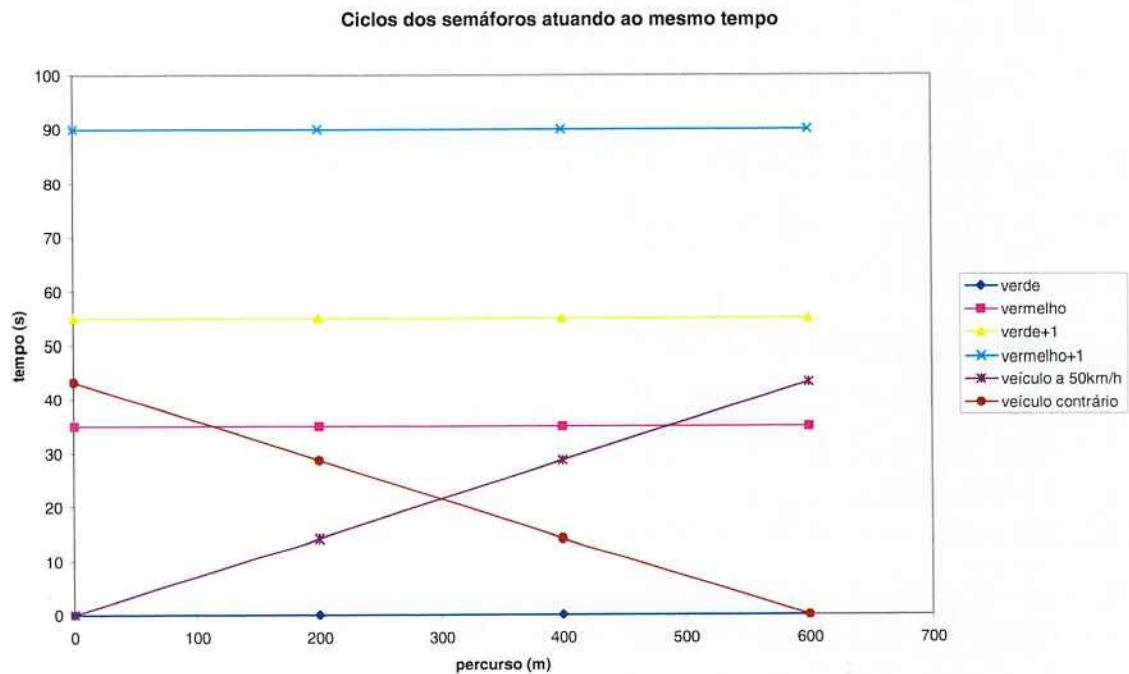
- Onda verde – Nesta configuração os semáforos estão sincronizados para que o semáforo à jusante de um cruzamento no sentido Oeste-Leste dê início à sua fase de verde no sentido Oeste-Leste depois de passado um intervalo de tempo equivalente ao tempo necessário para que um veículo vindo do cruzamento à montante chegue ao cruzamento após percorrer o trecho entre os semáforos. Podemos observar no gráfico abaixo a seqüência de ativação das fases de verde nesta configuração. Os pontos no gráfico



representam os cruzamentos (o cruzamento 1 encontra-se no eixo y) e cada reta representa uma fase do semáforo. Nota-se então que, se um veículo trafegar nesta via na velocidade estipulada pelo coeficiente angular das retas do gráfico (nesta simulação 50 km/h) ele encontrará todos os semáforos na fase verde, não tendo de parar durante o percurso. Nota-se que um veículo na mesma velocidade, porém em sentido contrário também não encontrará semáforos em fase vermelha.



- Semáforos simultâneos – Nesta configuração todos os semáforos da via entram na fase de verde ao mesmo tempo. Não há atraso entre atuações entre semáforos e nota-se que um veículo trafegando a um velocidade de 50 Km/h encontrará os cruzamentos 1, 2 e 3 ainda em fase de verde, tendo de parar somente no cruzamento 4. Isso se deve ao fato de que o tempo de fase de verde é superior ao necessário para que o veículo atravesse o trecho entre um cruzamento e outro. Ao mesmo tempo, um veículo vindo na mesma velocidade em sentido contrário tem o comportamento similar, parando somente no semáforo 3.

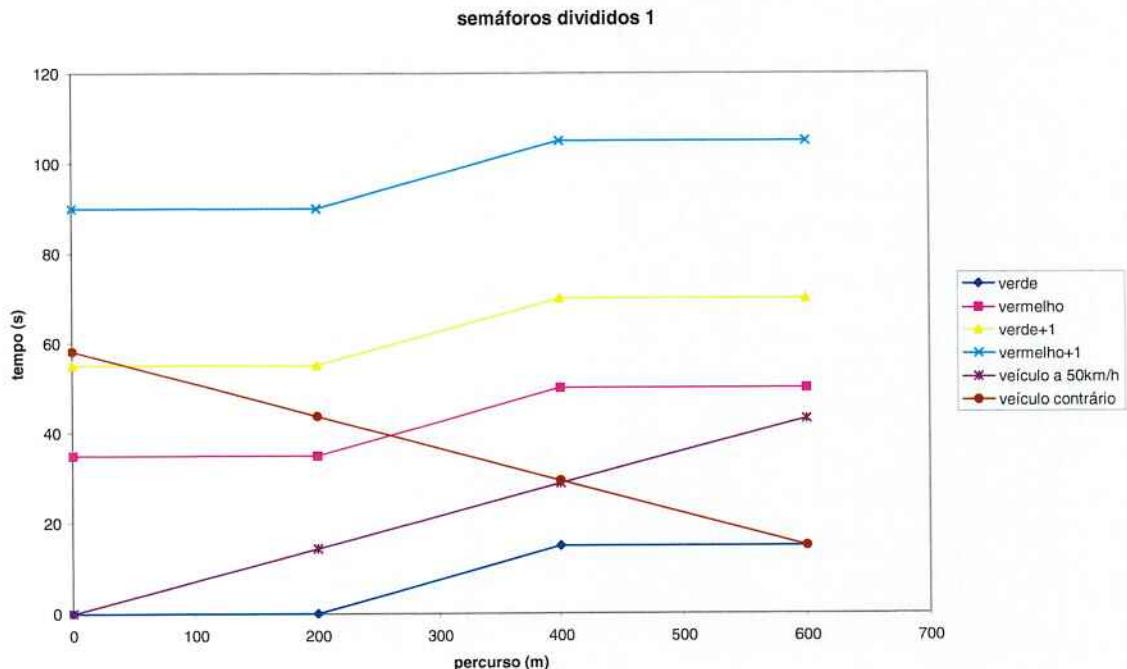


- Semáforos dividos 1 – Nesta configuração, os semáforos 1 e 2 atuam ao mesmo tempo enquanto os semáforos 3 e 4 atuam juntos após um atraso de 15 segundos, que é um intervalo de tempo menor do que o tempo de fase de verde. Nota-se que, devido ao atraso de atuação entre os semáforos iniciais e finais, somado ao elevado tempo de verde, um veículo percorrendo a via a 50Km/h encontrará todos os semáforos em fase verde, mas um veículo vindo no sentido contrário encontrará o semáforo 2 em fase vermelha, sendo forçado a aguardar na fila.

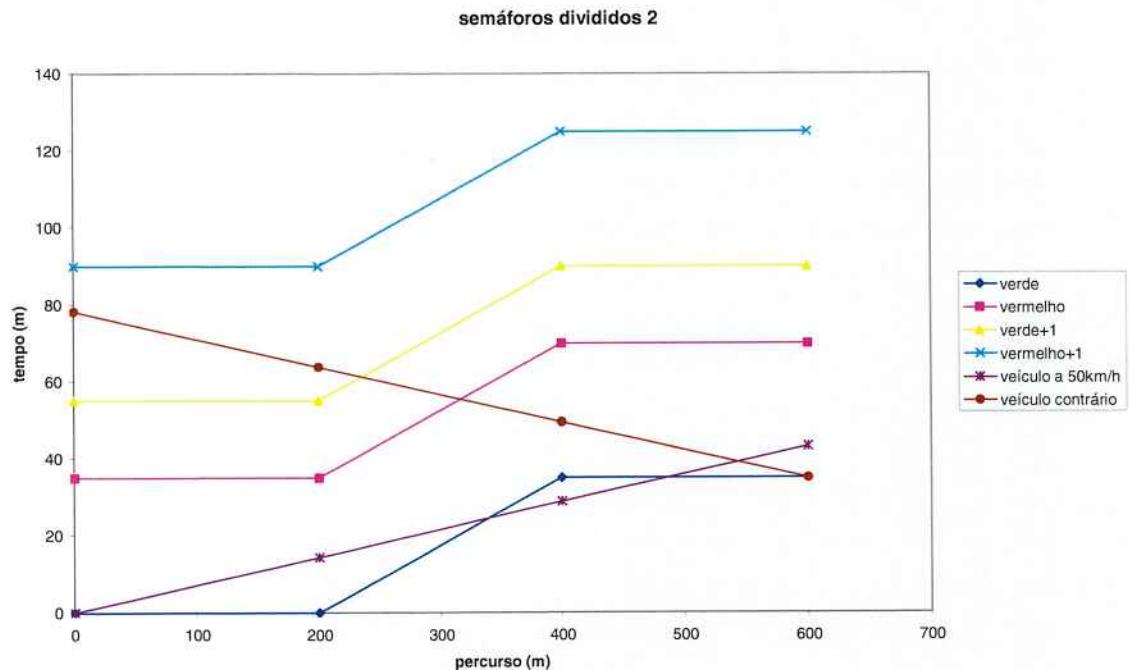


ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

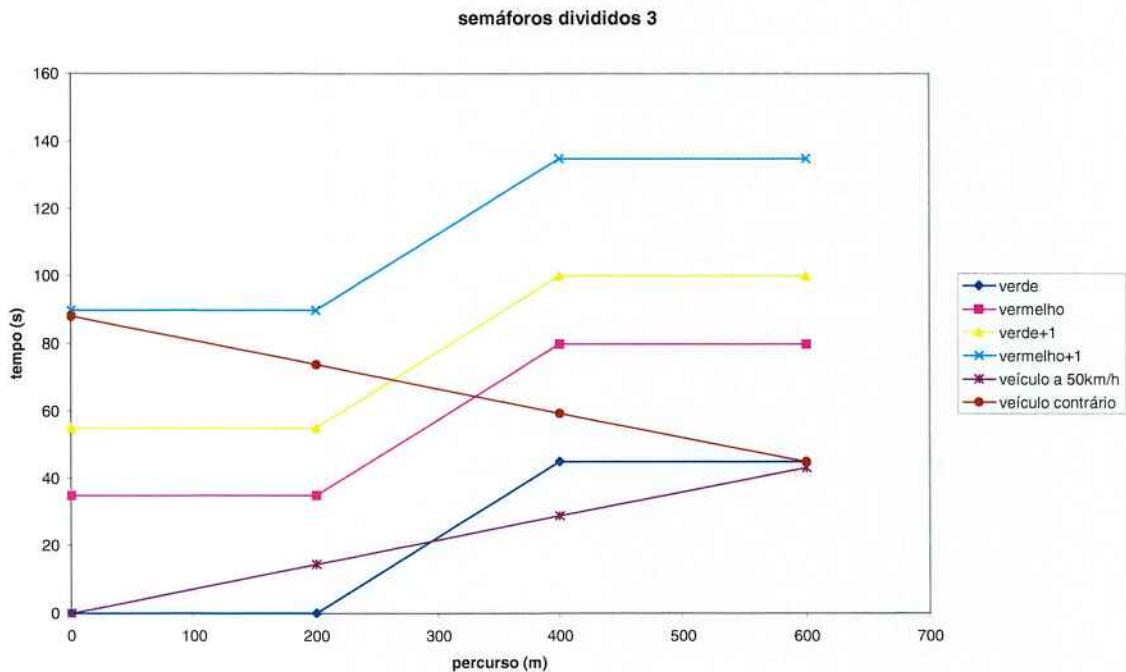
Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas



- Semáforos divididos 2 - Nesta configuração, os semáforos 1 e 2 atuam ao mesmo tempo enquanto os semáforos 3 e 4 atuam juntos após um atraso de 35 segundos, que é um intervalo de tempo igual ao tempo de fase de verde. Nota-se que, devido ao atraso de atuação entre os semáforos iniciais e finais, somado ao elevado tempo de verde, um veículo percorrendo a via a 50Km/h encontrará o semáforo 3 em fase vermelha, tendo de parar por um momento até que a fase de verde se inicie, porém, um veículo vindo em sentido contrário não encontrará nenhum semáforo em fase vermelha, nota-se no gráfico abaixo que, quando o veículo em sentido contrário atinge o semáforo 2, este já saiu da fase vermelha e está no segundo ciclo em sua fase de verde.



- Semáforos divididos 3 - Nesta configuração, os semáforos 1 e 2 atuam ao mesmo tempo enquanto os semáforos 3 e 4 atuam juntos após um atraso de 45 segundos, que é um intervalo de tempo maior do que o tempo de fase de verde. Nota-se que, devido ao atraso de atuação entre os semáforos iniciais e finais, somado ao elevado tempo de verde, um veículo percorrendo a via a 50Km/h encontrará o semáforo 3 em fase vermelha, tendo de parar por um momento até que a fase de verde se inicie, já um veículo vindo no sentido contrário não encontrará nenhum semáforo em fase vermelha.



6.3. Modelo 3

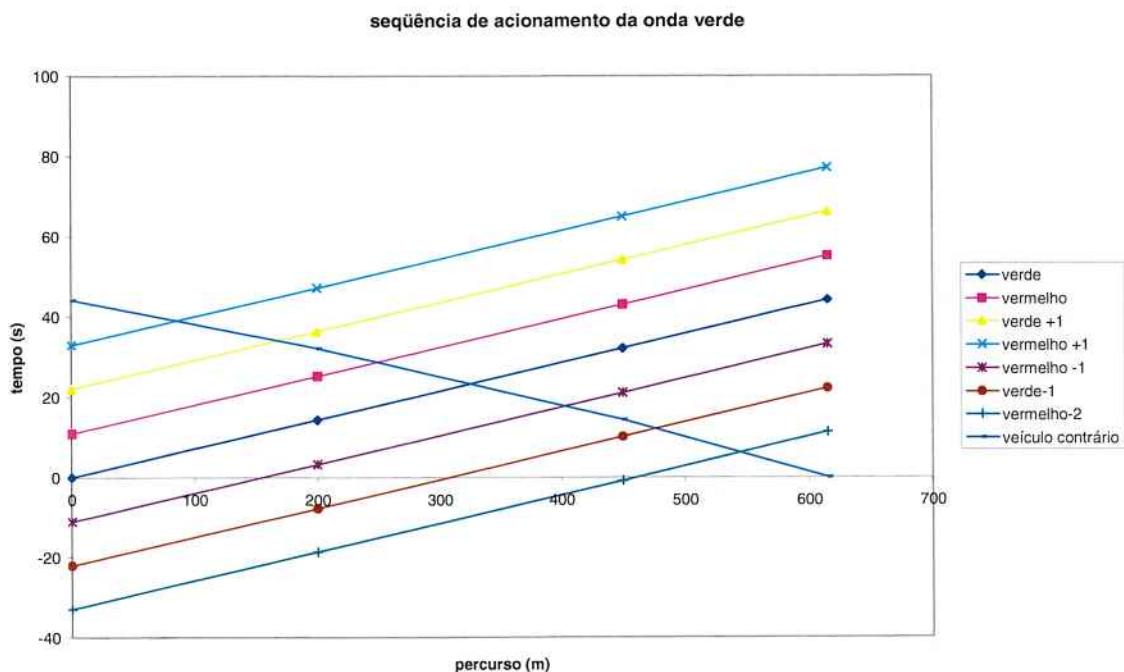
Nesta configuração os trechos entre os cruzamentos possuem tamanhos diferentes entre si, atributo configurado através do tempo da função Delay nos blocos de Trecho, e o tempo de verde para o sentido Leste-Oeste está fixado em 11 segundos que é um tempo maior do que o necessário para se cruzar o trecho entre um cruzamento e outro e o tempo de verde para o sentido Norte-Sul também está fixado em 11 segundos.

Neste modelo foram realizadas simulações em 5 configurações diferentes:

- Onda verde – Nesta configuração os semáforos estão sincronizados para que o semáforo à jusante de um cruzamento no sentido Oeste-Leste dê início à sua fase de verde no sentido Oeste-Leste depois de passado um intervalo de tempo equivalente ao tempo necessário para que um veículo vindo do cruzamento à montante chegue ao cruzamento após percorrer o trecho entre os semáforos. Podemos observar no gráfico abaixo a seqüência de ativação das fases de verde nesta configuração. Os pontos no gráfico representam os cruzamentos (o cruzamento 1 encontra-se no eixo y) e cada reta representa



uma fase do semáforo. Nota-se então que, se um veículo trafegar nesta via na velocidade estipulada pelo coeficiente angular das retas do gráfico (nesta simulação 50 km/h) ele encontrará todos os semáforos na fase verde, não tendo de parar durante o percurso. Nota-se que um veículo na mesma velocidade, porém em sentido contrário irá encontrar o semáforo 2 em fase vermelha.

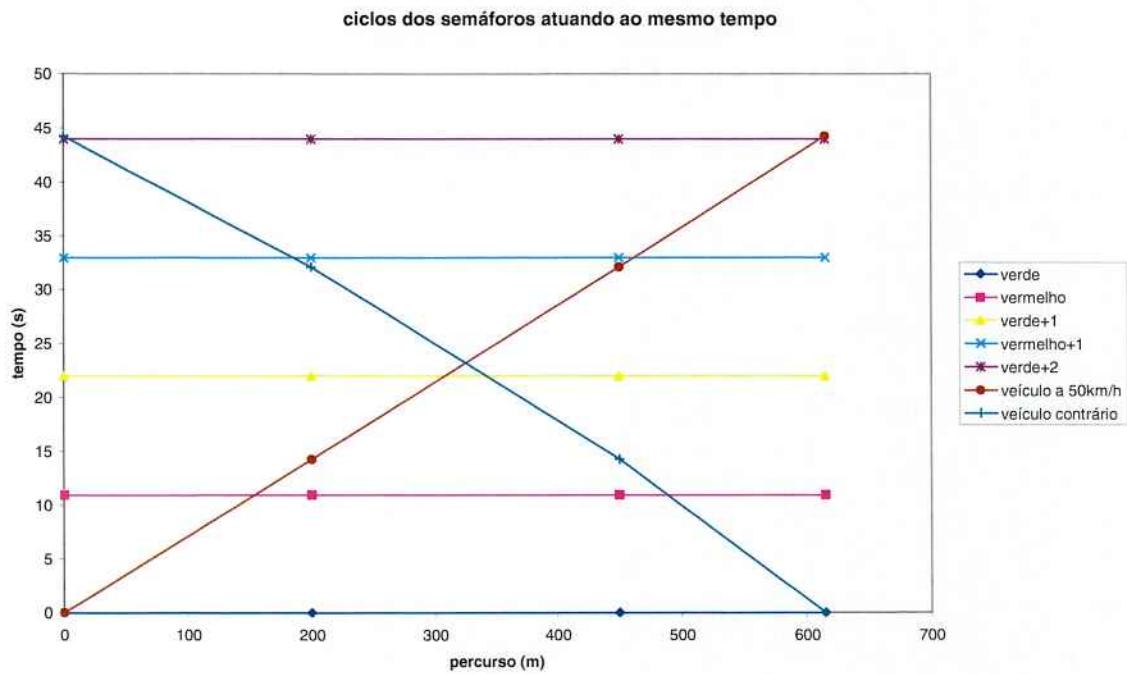


- Semáforos simultâneos – Nesta configuração todos os semáforos da via entram na fase de verde ao mesmo tempo. Não há atraso entre atuações entre semáforos e nota-se que um veículo trafegando a um velocidade de 50 Km/h encontrará o cruzamento 2 já em fase vermelha, tendo de parar e aguardar a liberação do cruzamento. Isso se deve ao fato de que o tempo de fase de verde é inferior ao necessário para que o veículo atravesse o trecho entre um cruzamento e outro. Ao mesmo tempo, um veículo vindo na mesma velocidade em sentido contrário também irá parar no semáforo seguinte, pois não há tempo para que possa cruzar o trecho e chegar ao semáforo antes que este mude fase.

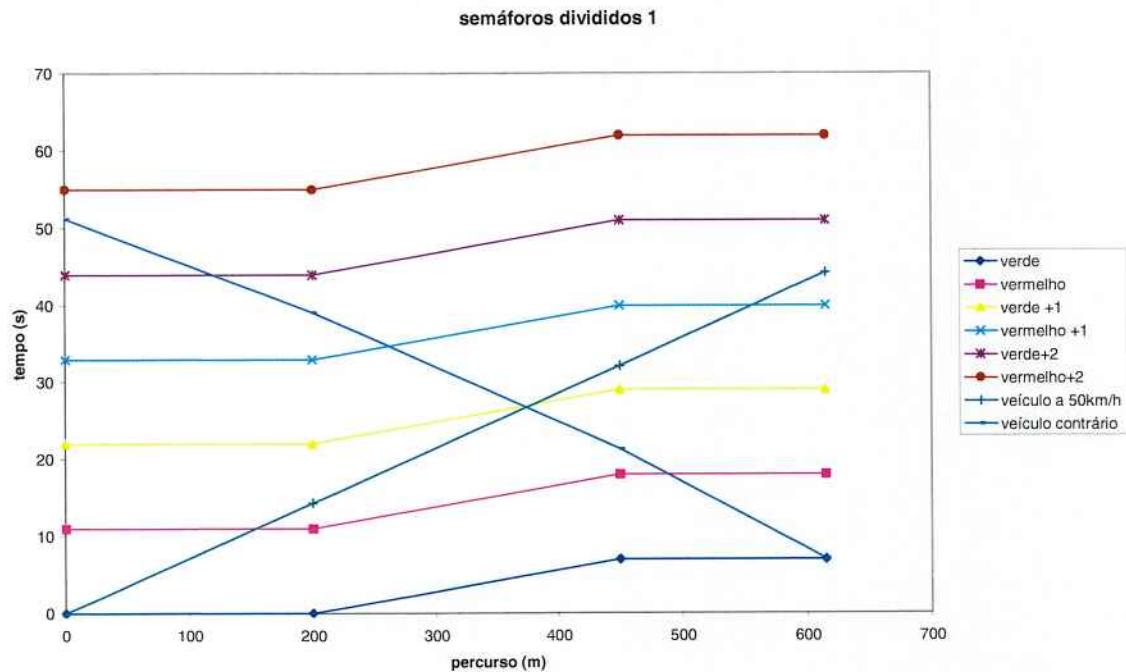


ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

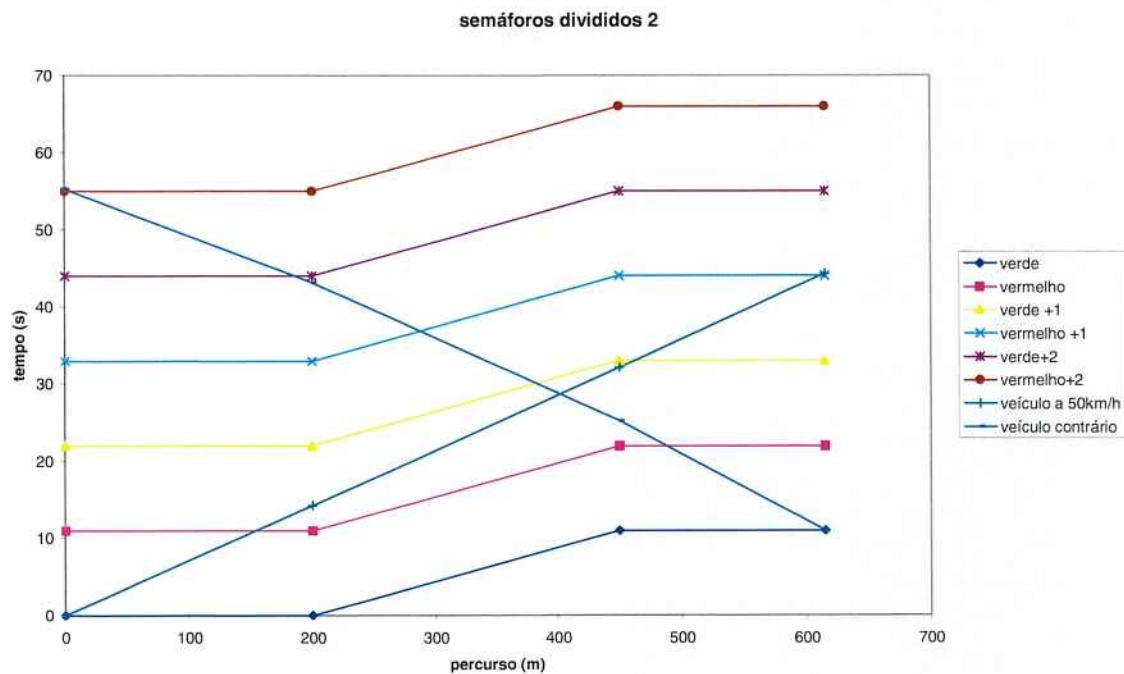
Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas



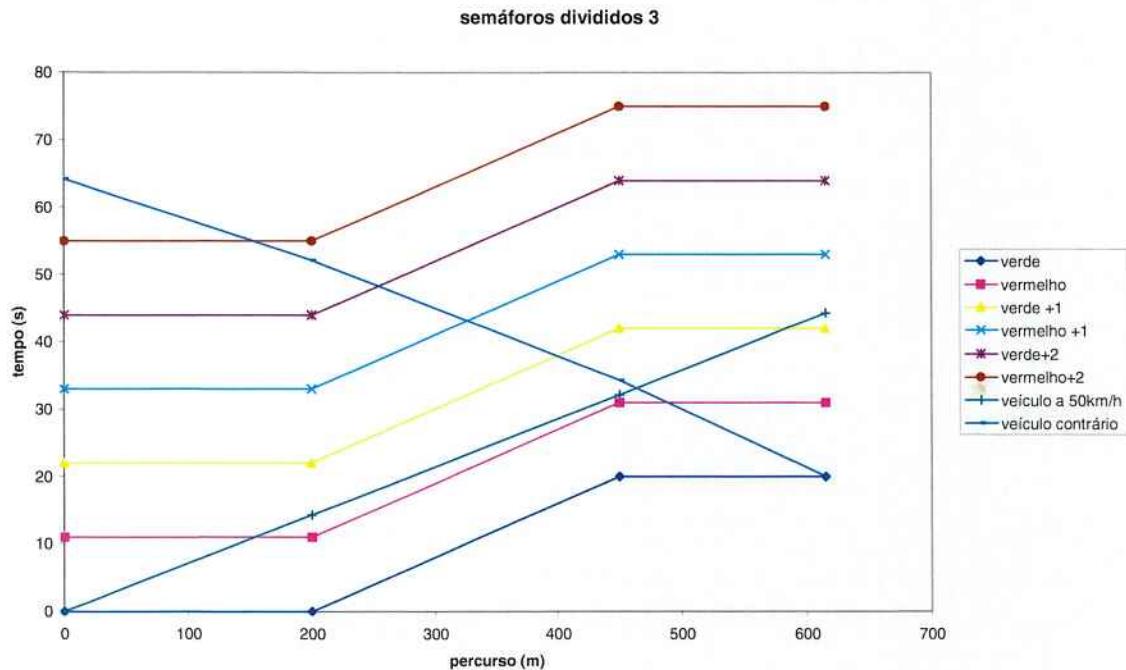
- Semáforos divididos 1 – Nesta configuração, os semáforos 1 e 2 atuam ao mesmo tempo enquanto os semáforos 3 e 4 atuam juntos após um atraso de 7 segundos, que é um intervalo de tempo menor do que o tempo de fase de verde. Nota-se que, devido ao atraso de atuação entre os semáforos iniciais e finais, somado ao tempo de verde baixo, um veículo percorrendo a via a 50Km/h encontrará o semáforo seguinte ao inicial já em fase vermelha, assim como um veículo vindo no sentido contrário encontrará o semáforo 3 em fase vermelha, sendo forçado a aguardar na fila.



- Semáforos divididos 2 - Nesta configuração, os semáforos 1 e 2 atuam ao mesmo tempo enquanto os semáforos 3 e 4 atuam juntos após um atraso de 11 segundos, que é um intervalo de tempo igual ao tempo de fase de verde. Nota-se que, devido ao atraso de atuação entre os semáforos iniciais e finais, somado ao tempo de verde reduzido, um veículo percorrendo a via a 50Km/h encontrará o semáforo 2 em fase vermelha, tendo de parar por um momento até que a fase de verde se inicie, também, um veículo vindo em sentido contrário encontrará o semáforo 3 em fase vermelha.



- Semáforos divididos 3 - Nesta configuração, os semáforos 1 e 2 atuam ao mesmo tempo enquanto os semáforos 3 e 4 atuam juntos após um atraso de 20 segundos, que é um intervalo de tempo maior do que o tempo de fase de verde. Nota-se que, devido ao atraso de atuação entre os semáforos iniciais e finais, somado ao elevado tempo de verde, um veículo percorrendo a via a 50Km/h encontrará o semáforo 2 em fase vermelha, tendo de parar por um momento até que a fase de verde se inicie, assim como um veículo vindo no sentido contrário encontrará semáforo 3 em fase vermelha.



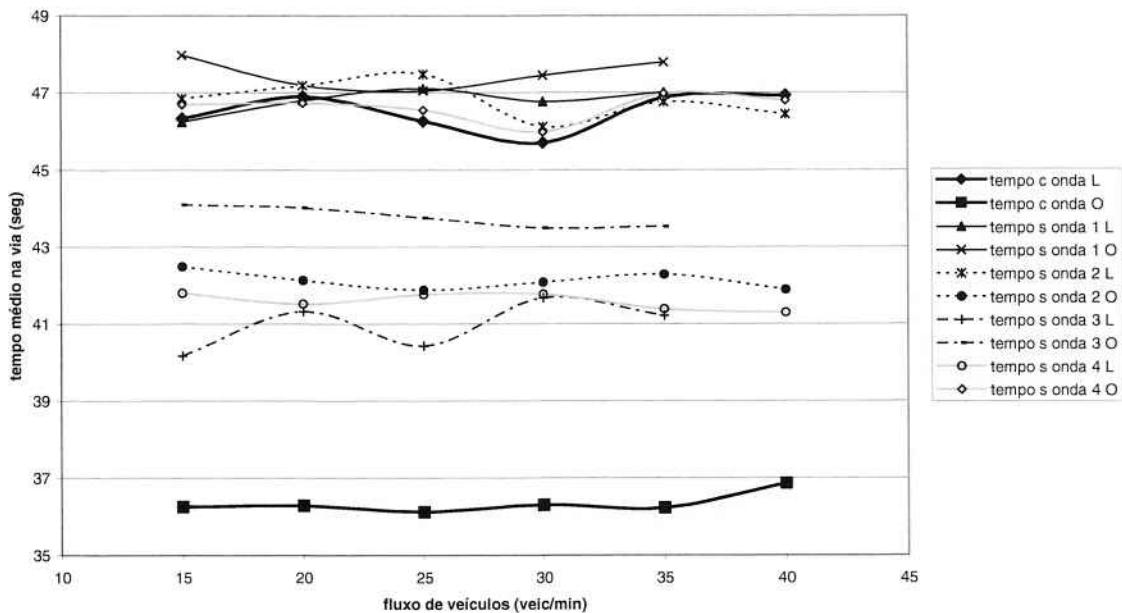
6.4. Resultados obtidos

A partir dos modelos e configurações acima descritos foram rodadas simulações no ARENA para várias condições de fluxo de veículos no modelo e os resultados foram compilados nos gráficos a seguir:

-Modelo 1 - Neste gráfico estão os resultados das simulações em todas as configurações utilizadas no modelo 1. Observa-se que o tempo de percurso obtido com a onda verde é muito inferior aos demais, porém o tempo de percurso no sentido oposto ao da onda verde é bem elevado e se compara os tempos obtidos em configurações sem onda verde.



Modelo 1



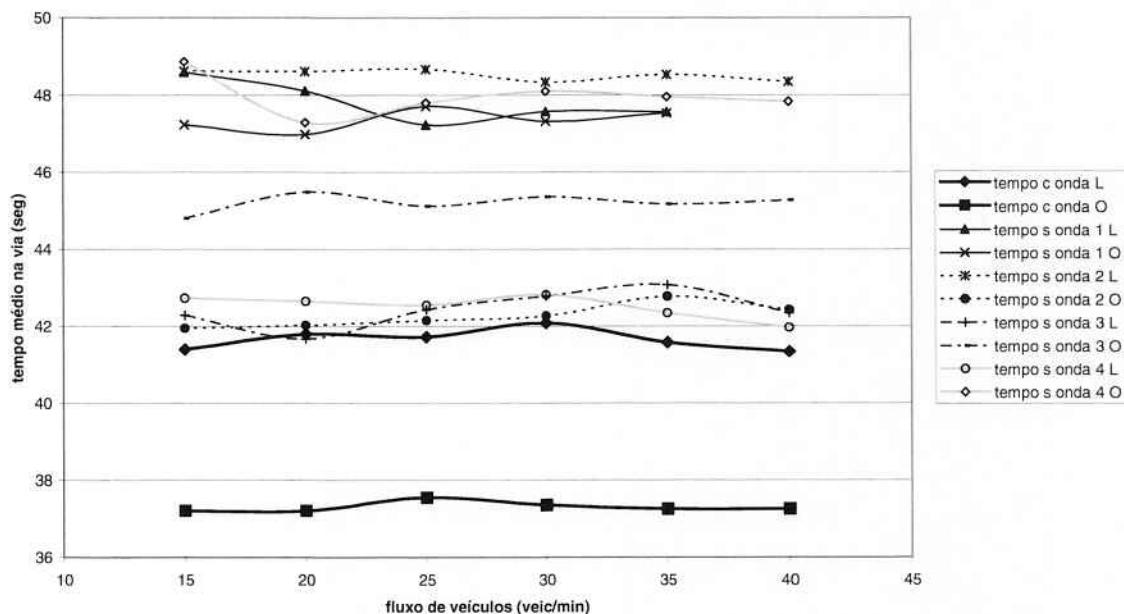
- Modelo 2 – Neste gráfico estão os resultados das simulações em todas as configurações utilizadas no modelo 2. Observa-se que o tempo de percurso obtido com a onda verde é muito inferior aos demais, porém o tempo de percurso no sentido oposto ao da onda verde, apesar de inferior aos demais, é superior ao tempo obtido no sentido da onda verde e se compara os tempos obtidos nas configurações *semáforos divididos* no sentido da onda verde.



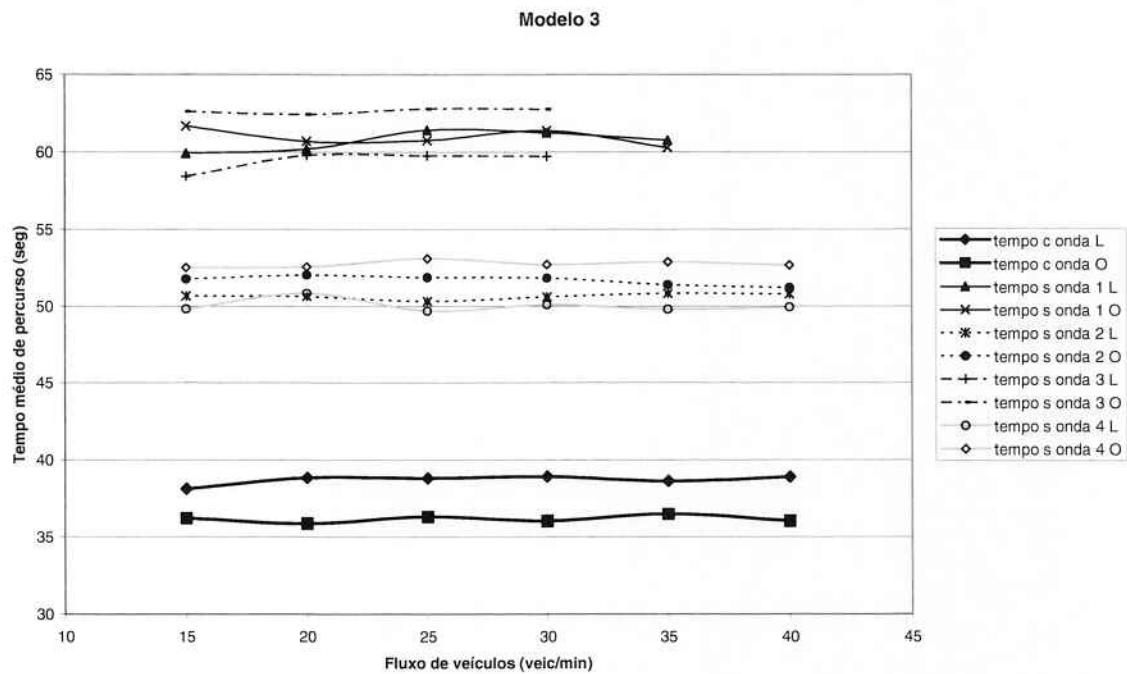
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas

Modelo 2



- Modelo 3 – Neste gráfico estão os resultados das simulações em todas as configurações utilizadas no modelo 3. Observa-se que o tempo de percurso obtido com a onda verde é muito inferior aos demais, tanto no sentido da onda verde quanto no sentido contrário, porém o tempo de percurso no sentido oposto ao da onda verde é sempre maior que o tempo obtido no sentido da onda verde.



A seguir são exibidos os gráficos dos dados agrupados por configuração:

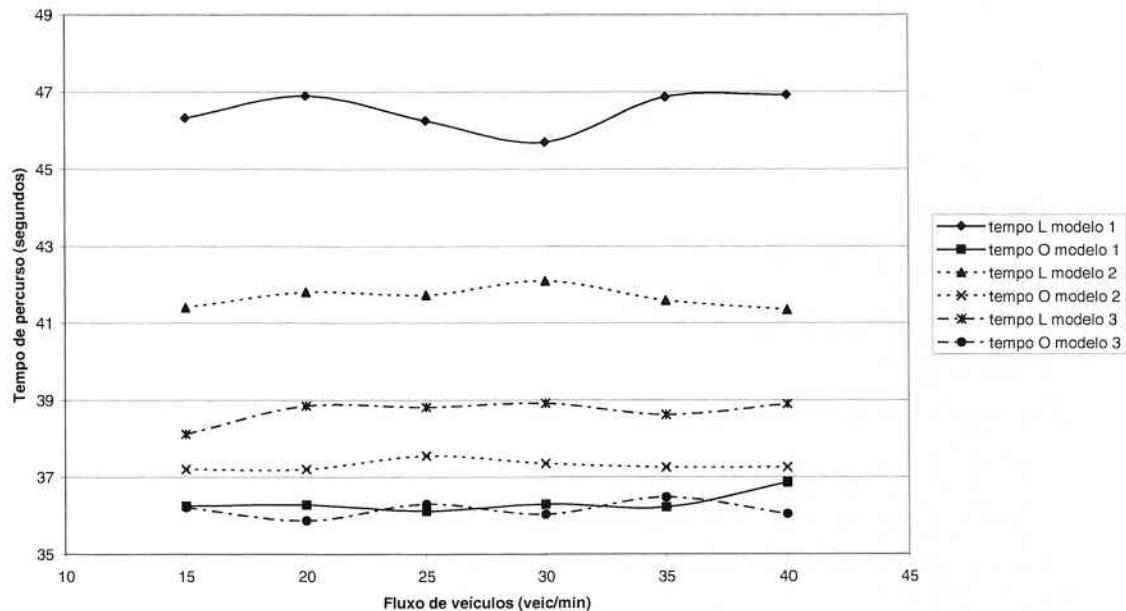
- Onda Verde – Nota-se no gráfico dos tempos de onda verde que os menores tempos de onda no sentido Oeste-Leste pertencem aos modelos 1 e 3 e os melhores tempos no sentido Leste-Oeste pertencem aos modelos 2 e 3, sendo este último o modelo que apresenta os melhores tempos, indicando que um tempo de fase de verde inferior ao tempo de percurso entre cruzamentos é a melhor configuração para a aplicação de uma onda verde, não importando a diferença de tamanho entre os trechos da via, o que a torna uma configuração viável, uma vez que com a via já construída é impossível alterar o tamanho dos trechos.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas

Padrão onda verde nos 3 modelos



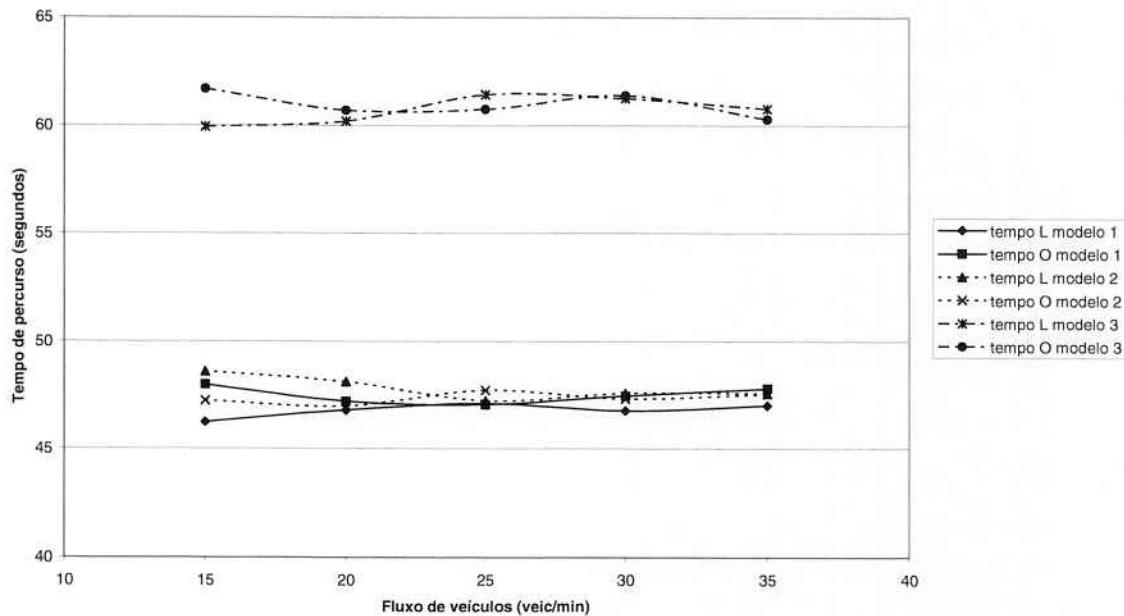
- Semáforos simultâneos – Nota-se no gráfico dos tempos de semáforos simultâneos que o maior tempo pertence ao modelo 3 e não há diferença significativa entre os dois sentidos do fluxo na via. Vemos também que os tempos em geral são superiores aos obtidos na configuração de onda verde. Pode-se concluir que para a configuração de semáforos simultâneos não é aconselhável ter um tempo de verde menor do que o tempo necessário para se cruzar o trecho de um semáforo a outro.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas

Padrão 1 nos 3 modelos

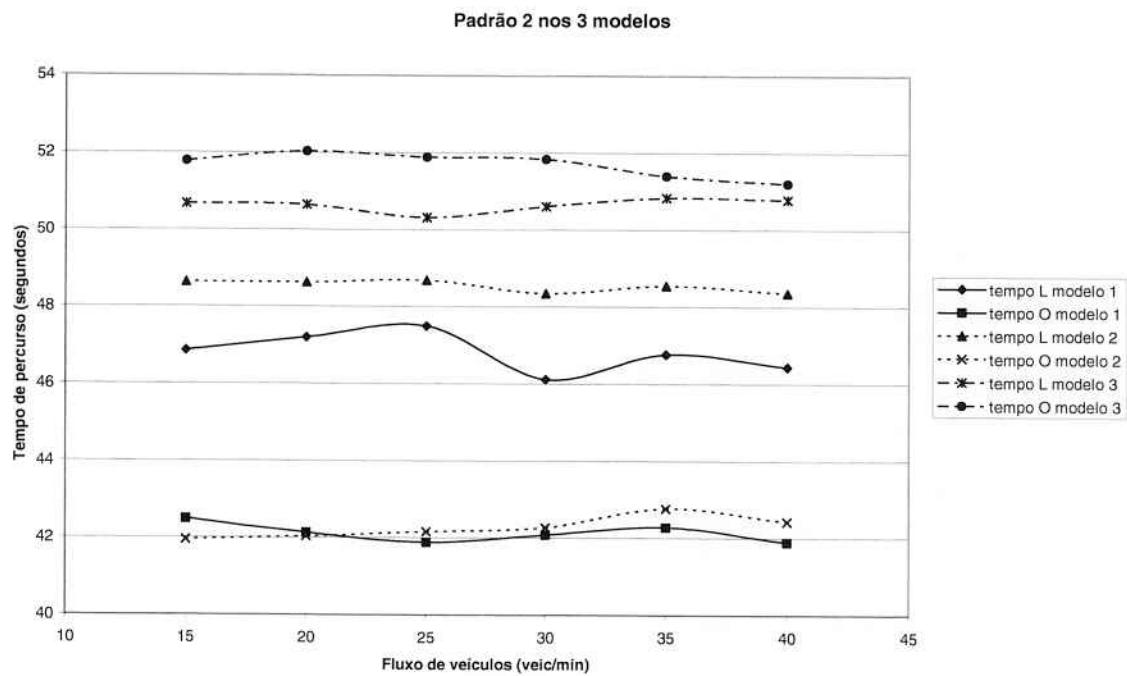


- Semáforos divididos 1 – Nesta configuração, podemos observar que os tempos médios de percurso obtidos são superiores aos obtidos pela onda verde e nota-se uma distinção nos tempos dos sentidos Oeste-Leste e Leste-Oeste, exceto no modelo 3 onde observamos os tempos mais elevados, indicando que um tempo de verde menor do que o tempo de percurso de um cruzamento a outro não é recomendado.

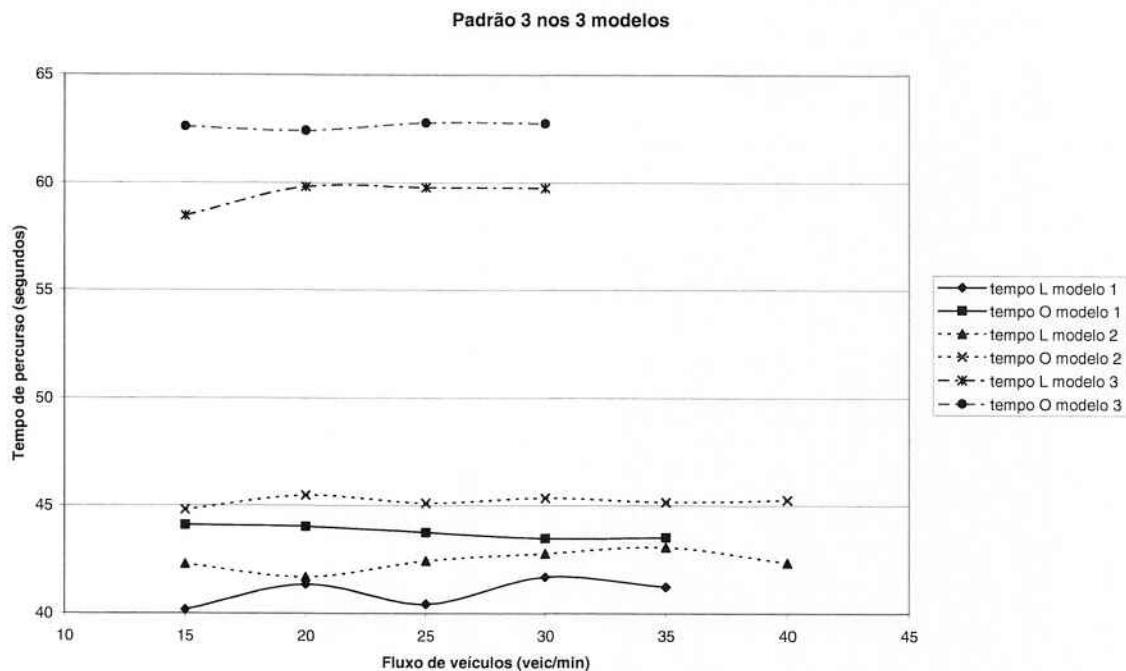


ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas



- Semáforos divididos 2 – Assim como a configuração Semáforos divididos 1, um tempo de verde baixo não é recomendado e verifica-se diferenças nos tempos obtidos de acordo com o sentido da via.



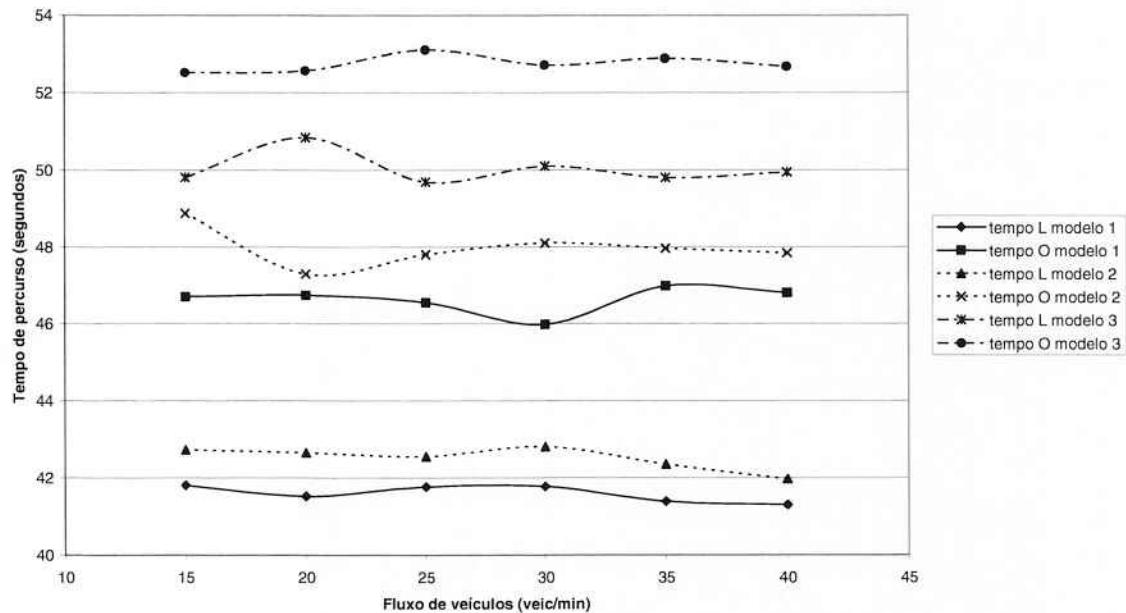
- Semáforos divididos 3 – O padrão observado na configuração *semáforos divididos 3* é o mesmo observado para as configurações *semáforos divididos 1 e 2*, isto é, um alto tempo de percurso quando o tempo de verde é inferior ao tempo de percurso do trecho e a observação de uma diferença significativa nos tempos entre o sentido Leste-Oeste e Oeste-Leste.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas

Padrão 4 nos 3 modelos





7. CONCLUSÕES

Através das Normas Técnicas da CET pode-se calcular um tempo de ciclo semafórico ótimo e aplicá-lo no modelo desenvolvido no ARENA.

O ARENA é uma ferramenta fácil de se usar e a estrutura de blocos de funções é bastante intuitiva e versátil, suportando modelos complexos. As ferramentas de simulação do ARENA fornecem uma grande gama de dados sobre o modelo simulado permitindo um estudo detalhado das reações do modelo durante a simulação.

Os modelos criados e testados no ARENA mostraram que uma série de fatores pode influir num bom funcionamento de um sistema de tráfego e que no caso da aplicação de uma onda verde é necessário observar alguns fatores, afim de que a onda verde seja realmente eficiente.

Ao contrário das outras configurações e modelos testados, o modelo com tempos de fase de verde inferiores ao tempo de percurso entre cruzamentos foi o que apresentou os melhores resultados com a onda verde, inclusive apresentando um baixo tempo de percurso médio da via e tempos semelhantes para ambos os sentidos de fluxo na via.

O que nos leva a concluir que para configurar uma onda verde eficiente deve-se observar que o tempo de fase de verde seja inferior ao tempo de percurso entre semáforos.



8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FILIZZOLA, Edson Paulo. *Noções básicas de engenharia de tráfego*. São Paulo: CET. 1977

LEITE, José G. M. *Engenharia de tráfego: métodos de pesquisa, características de tráfego, intersecções e sinais luminosos*. São Paulo: CET. 1980

MELLO, José Carlos. *Planejamento dos transportes urbanos*. Rio de Janeiro: Editora Campus. 1982

PEREIRA Junior, Glaubério A. *Controle de semáforos em um conjunto de cruzamentos*. São Paulo: Escola Politécnica. 2005 (Projeto de Formatura).

VASCONCELLOS, Eduardo A. de. *Pesquisa e levantamentos de tráfego*. São Paulo: CET. 1982

Manual de Semáforos. 2^a Ed. Brasília: DENATRAM. 1984.

Manual do ARENA

Métodos para cálculo da capacidade de intersecções semaforizadas. São Paulo: CET. 1978.