

HENRIQUE BARBOSA DE MOURA

**Análise de eficiência de dispositivos
de sincronização autônoma de
semáforos**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
À Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia de Computação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Dias Maciel

São Carlos
2007

Sumário

Lista de figuras	3
Resumo	4
Abstract.....	5
1 Introdução e motivação	6
2 Descrição do algoritmo de sincronização	8
3 Descrição do dispositivo.....	10
4 Descrição do simulador	12
5 Análise dos dados das simulações	14
5.1 Cenários de teste.....	14
5.1.1 Via de mão única	14
5.1.2 Via de mão dupla	15
5.1.3 Malha de quarteirões com ciclo	15
5.2 Análise.....	16
5.2.1 Via de mão única	16
5.2.2 Via de mão dupla	18
5.2.3 Malha de quarteirões com ciclo	20
6 Conclusões.....	23
7 Referências bibliográficas	24

Lista de figuras

Figura 1	Modelo do dispositivo sincronizador	10
Figura 2	Diagrama representando uma via de mão única.....	14
Figura 3	Diagrama representando uma via de mão dupla.....	15
Figura 4	Diagrama representando uma malha de quarteirões com ciclos.....	16
Figura 5	Via de mão única com comportamento padrão	17
Figura 6	Via de mão única com comportamento de sincronização	17
Figura 7	Via de mão única com comportamento de sincronização com limitação de ajuste	18
Figura 8	Via de mão dupla com comportamento padrão	19
Figura 9	Via de mão dupla com comportamento de sincronização	19
Figura 10	Via de mão dupla com comportamento de sincronização com limitação de ajuste.....	20
Figura 11	Malha de quarteirões com comportamento padrão.....	21
Figura 12	Malha de quarteirões com comportamento de sincronização.....	21
Figura 13	Malha de quarteirões com comportamento de sincronização com limitação de ajuste	22

Resumo

Atualmente, a produção, em todos os níveis, depende dos meios de transporte tanto quanto depende das fontes de energia. A necessidade de transportar matérias-primas, produtos finais e, principalmente, trabalhadores requer enorme volume de transportes.

Em grandes centros urbanos esta necessidade gera graves efeitos colaterais – gasto de energia, desperdício de tempo e impacto ao meio ambiente são apenas alguns exemplos. Qualquer iniciativa que vise à redução de tais efeitos indesejáveis são muito bem-vindas no contexto atual.

Neste trabalho é analisada a eficácia de um sistema embarcado que objetiva sincronizar, de maneira autônoma, o funcionamento dos semáforos de trânsito, de modo a facilitar o tráfego de veículos motorizados e tentar mitigar os efeitos de congestionamentos que ocorrem quando grandes quantidades destes veículos circulam nos centros urbanos.

Palavras-chave: semáforo, sincronização, trânsito, sistemas embarcados

Abstract

Production nowadays, on every level, depends on transportation as it depends on energy sources. The need to commute raw materials, final products and, mostly, workers require transportation at enormous levels.

In big urban areas this transportation need generates serious collateral effects - energy expenses, time waste and environmental impacts are some examples. Any advancement towards the reduction of such undesired effects is greatly appreciated in the present reality.

This work analyzes the efficiency of an embedded system that aims synchronizing, in an autonomous way, the transit semaphores operation, easing the motorized vehicle flow and trying to mitigate the unsought effects of traffic jams that occur when a great number of such vehicles pass through urban areas.

Keywords: semaphore, synchronization, transit, embedded systems

1 Introdução e motivação

O transporte é irrevogavelmente uma necessidade atual. Mover trabalhadores e produtos de um ponto a outro é um ato diário e definitivamente incorporado ao cotidiano. Infelizmente, especialmente no sistema rodoviário, o crescimento da malha de transporte não acompanha o crescimento nem do número de veículos que trafegam nem da dependência que o processo produtivo tem deste meio de transporte.

Os efeitos colaterais desta disparidade entre o incremento do uso do meio de transporte rodoviário e da infra-estrutura sobre a qual este uso acontece tornaram-se evidentes nas últimas décadas. Segundo Trinta, “O tráfego é caracterizado pelo transporte de mercadorias, pelo transporte de passageiros, pelo direito de ir e vir das pessoas e pelo excessivo número de viagens em veículos particulares. Este conjunto de fatores impacta primordialmente a mobilidade, a acessibilidade, a segurança dos pedestres e, principalmente, o meio ambiente” [1]. Basta dirigir numa grande metrópole durante a hora do *rush* para perceber os problemas gerados pela sobre-utilização do sistema de transporte rodoviário.

Existem vários estudos sobre os benefícios da melhoria dos sistemas de transporte rodoviário das grandes cidades. Dentre as diversas ações possíveis nesta direção, a sincronização dos semáforos de trânsito é uma solução teoricamente simples e que traz muitos ganhos se aplicada, como, segundo Munshi, redução de congestionamentos, aumento de segurança e melhoria no tempo de resposta de veículos de emergência [2].

Apesar de teoricamente simples e fonte de diversos benefícios, sincronizar semáforos manualmente envolve muita mão de obra e manutenção. Falhas na alimentação elétrica e falta de precisão de relógios são alguns dos empecilhos desta tarefa.

Neste documento será avaliada a eficácia de um dispositivo embarcado que objetiva, de maneira autônoma e distribuída, sincronizar semáforos de trânsito de uma malha rodoviária para reduzir os efeitos prejudiciais que o funcionamento desordenado destes semáforos pode causar. A construção de protótipos de dispositivos não coube ao escopo deste trabalho; portanto, apenas o algoritmo foi realmente desenvolvido, e o dispositivo permanece como uma entidade abstrata ao longo do documento.

Na seção 2 será descrita a lógica interna avaliada, que tem por objetivo realizar a sincronização dos semáforos. Na seção 3 será apresentada uma possível construção de um

dispositivo, levando em consideração o domínio de utilização e tecnologias aplicáveis. O simulador utilizado para avaliação da eficácia dos dispositivos sincronizadores é apresentado na seção 4.

Finalmente, nas seções 5 e 6 são discutidos os resultados das simulações e apresentadas as conclusões obtidas a partir destes resultados, respectivamente. A seção 7 contém as referências bibliográficas deste documento.

2 Descrição do algoritmo de sincronização

Se todos os semáforos fossem controlados por um novo dispositivo, para que o comportamento de uma malha rodoviária fosse idêntico ao existente, bastaria que cada dispositivo contasse o tempo e mudasse as fases do semáforo de acordo. Nenhuma comunicação seria necessária, nem o conhecimento da topologia da malha. Também, nenhuma sincronia seria garantida.

Para iniciar uma sincronia, suponha-se que um dispositivo tenha conhecimento do outro próximo, seguindo a direção da rua. Se este primeiro dispositivo tiver acesso ao valor da distância entre os dois e à velocidade máxima permitida ao tráfego, será fácil calcular em qual exato momento o segundo dispositivo deveria ter um semáforo no estado “verde” para direção do fluxo entre os dispositivos.

Estas informações – velocidade permitida e distância – são informações fáceis de obter e que dificilmente mudam. Daí se origina a idéia principal do algoritmo testado neste trabalho. Se o dispositivo puder “dizer” ao seguinte quando este deveria “abrir” o semáforo, estes dois semáforos estariam sincronizados para uma dada direção do fluxo. Pode-se repetir a idéia a cada dispositivo, onde cada um necessita conhecer apenas o vizinho imediato, e ter-se-iam inúmeros semáforos sincronizados.

O algoritmo definido, então, para este trabalho consiste basicamente desta idéia apresentada. Há um dispositivo em cada cruzamento controlando o semáforo, estes se comunicam com seus vizinhos, informando quando cada semáforo deve estar verde para uma dada direção do fluxo. Há, porém, certas restrições e limitações neste algoritmo.

Primeiramente, um dispositivo não poderia ignorar completamente uma fase do semáforo – ou, em outras palavras, ignorar que deveria se acender o sinal verde depois de transcorrido o tempo necessário ao vermelho. Isto traria mais problemas que soluções ao trânsito, maior descontentamento por parte dos motoristas. Por isso, o tamanho do ajuste é limitado a uma fração do tempo determinado para uma fase do semáforo. A limitação é análoga à taxa de amortecimento de um sistema de controle, para que a sincronização não ocorra de maneira muito brusca, pouco previsível.

Segundo, há o caso de uma esquina onde veículos de uma transversal podem converter à direção do fluxo principal enquanto este espera o semáforo vermelho. Nesta situação, quando

o semáforo sinaliza que os veículos podem realizar a conversão, o dispositivo não pode comunicar ao próximo (que também é o próximo do fluxo principal) quando deve estar aberto. Caso contrário, quando o fluxo principal puder se mover, esta comunicação também ocorreria, e a conclusão é que o próximo semáforo deveria estar sempre verde – o que impede o tráfego da transversal deste semáforo seguinte. Portanto, apenas o fluxo principal deverá ser sincronizado.

Sendo assim, o algoritmo foi desenvolvido seguindo a idéia básica apresentada e levando em consideração as duas limitações citadas.

3 Descrição do dispositivo

Nesta seção está descrito o dispositivo sincronizador idealizado, suas características e restrições. Como não foi do âmbito deste trabalho a construção de protótipos reais do dispositivo, nesta seção há apenas uma abstração deste, levando em consideração o domínio de aplicação. Na Figura 1 há um modelo demonstrando os módulos do dispositivo idealizado.

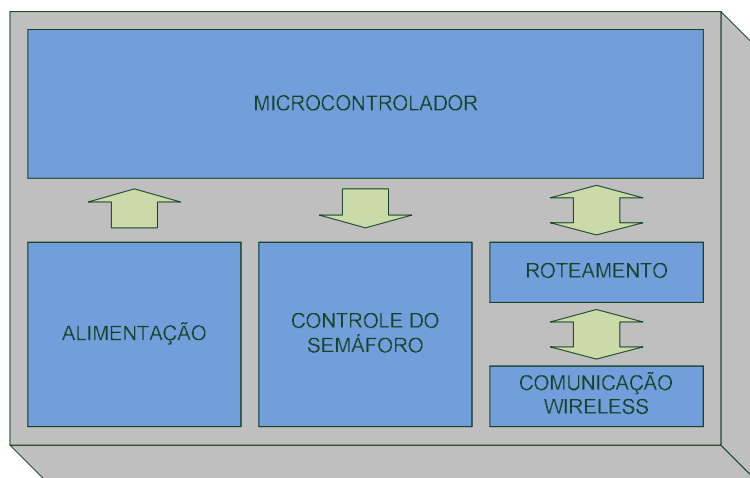


Figura 1 Modelo do dispositivo sincronizador

Uma vez que o objetivo é sincronizar um número variável, e potencialmente grande, de semáforos em malhas rodoviárias distintas de tamanhos diversos, podemos delinear as principais características desejáveis ao dispositivo sincronizador: baixo custo, modularidade, escalabilidade. Ademais, ele deve atuar de maneira distribuída dentro de um conjunto, independentemente do tamanho e morfologia da malha e do número total de dispositivos.

O domínio de aplicação também traça outras características. Uma vez que os semáforos necessitam de eletricidade, pode-se assumir a existência de uma fonte externa de energia próxima e acessível. Desta forma, não é necessária a existência de baterias, e o consumo de eletricidade do módulo não se torna uma questão prioritária, como em muitos sistemas embarcados. No entanto, seria interessante que houvesse uma bateria para alimentação do módulo em caso de quedas de energia, mantendo o funcionamento do sistema. Além disso, o tamanho final do dispositivo não é uma restrição: um módulo com algumas dezenas de centímetros de tamanho nas três dimensões é perfeitamente admissível.

O algoritmo de sincronização apresentado na seção anterior depende da comunicação entre dispositivos; portanto, estes devem ser capazes de se comunicar uns com os outros. Nesta situação, a comunicação *wireless* tem mais vantagens sobre a comunicação que utiliza outros meios, sejam maior facilidade de instalação, baixo preço de módulos de comunicação e maior escalabilidade. Em contrapartida, devem-se levar em consideração interferências na comunicação, inerentes ao ambiente urbano, e distância entre os módulos.

A capacidade de processamento necessária no microcontrolador também não é prioridade, tendo em vista que os semáforos mudam de estado num intervalo da ordem de dezenas de segundos. Ainda tendo em vista o algoritmo apresentado na seção 2, poucos cálculos são necessários e, portanto, um microcontrolador de baixa capacidade é suficiente.

Para conseguir a comunicação entre diversos dispositivos, será necessário um algoritmo de roteamento de mensagens, uma vez que não é esperado que um dispositivo tenha ao seu alcance todos os outros da malha. Algoritmos existentes atualmente são aplicáveis neste contexto. Pode-se citar como exemplo o algoritmo de roteamento o AODV (*Ad hoc On-demand Distance Vector*), apresentado por Tanenbaum [3]. Este algoritmo mantém uma tabela com o custo até um destino e constrói a rota apenas no momento da transmissão, levando em consideração largura de banda limitada e consumo de eletricidade, encaixando-se perfeitamente no contexto escalar e distribuído do sistema discutido.

É interessante que haja uma camada dedicada à transmissão de dados para que a comunicação se torne transparente na implementação da lógica, e que o redirecionamento de mensagens destinadas a outros dispositivos não ocupe tempo de processamento do microcontrolador.

É interessante também considerar a possibilidade de se implementar toda a lógica, inclusive um módulo distinto para roteamento, numa única *Field Programmable Gate Array* (FPGA). Uma solução utilizando esta tecnologia é mais flexível e melhorias no produto final têm um custo menor. Ademais, facilitam o tempo de desenvolvimento e pesquisa.

4 Descrição do simulador

O simulador foi implementado em linguagem de programação Java, utilizando a ferramenta de desenvolvimento Eclipse. Os dados de entrada estão em formato específico para a aplicação e os resultados são dispostos em arquivos com valores separados por vírgula (CSV), para posteriormente serem gerados gráficos utilizando a ferramenta Excel.

Em linhas gerais, o simulador cria uma representação de uma malha rodoviária em memória, com todos os semáforos necessários, e atribui a cada cruzamento um comportamento; ou, em outras palavras, um algoritmo para os semáforos. Uma vez criada a malha, ele cria veículos que trafegam na malha e mede a eficiência do tráfego, gerando um relatório.

Uma malha rodoviária pode ser descrita por um grafo direcionado [4]. Cada aresta representaria uma faixa da via, portanto, um conjunto de arestas na mesma direção, com mesma origem e destino, representaria uma via com mais de uma faixa de rodagem. E uma via pode participar de mais de um cruzamento, estes representados pelos nós. Há uma adição em relação a um grafo comum: nem sempre é possível tomar qualquer aresta que segue a partir de uma aresta qualquer que chega ao nó. Em cada nó, há uma lista de possíveis arestas a se tomar para cada aresta que chega. Estas seriam as conexões entre vias.

Cada conexão tem um semáforo associado. Este determina quando o fluxo pode passar através do cruzamento, de um segmento da via a outro. Várias conexões podem ser regidas pelo mesmo semáforo. E um cruzamento pode ter vários semáforos. Em cada cruzamento cria-se uma entidade abstrata, um grupo de semáforos, e é nele que há a lógica de quando cada semáforo deve assumir um estado, e é sobre esse grupo que atua a abstração do dispositivo.

Foram definidos três comportamentos para os dispositivos:

- Comportamento padrão: o mesmo existente atualmente, onde não há comunicação. Definido para controle da simulação.
- Comportamento de sincronização: os dispositivos se comunicam com seus vizinhos, dizendo quando as fases devem ser trocadas, e estas ordens são sempre seguidas à risca.
- Comportamento de sincronização com limite de ajuste: semelhante ao anterior, porém o ajuste na duração da fase é limitado a uma porcentagem da duração da fase.

O simulador conta o tempo em unidades arbitrárias, para que seja possível configurar uma precisão desejada. As distâncias dos segmentos são valores cabíveis para um quarteirão (desde 50 até 200 metros). As velocidades-limites de cada via são aquelas determinadas legalmente: 40 km/h para vias vicinais, 50 km/h para arteriais, etc. Estes valores são convertidos para a unidade de tempo utilizada. A cada unidade de tempo avançada, os semáforos são atualizados, e os veículos trafegam a distância possível neste período, seja limitado pela velocidade de tráfego, seja por veículos à frente, seja por semáforos fechados.

Para cada simulação, um tempo limite é definido. Este tempo é suficiente para que sejam criados veículos suficientes para preencher completamente todas as vias (pior caso de trânsito), partindo da malha completamente vazia (melhor caso de trânsito). Veículos são criados em um ponto aleatório da malha. As métricas obtidas periodicamente durante a simulação são:

- Total de veículos trafegando.
- Quantidade de veículos que trafegam com dificuldades: dado uma fração de tempo de execução e o limite de velocidade da via, o veículo pode trafegar certa distância. Caso o veículo consiga se mover, mas não toda esta distância, este é considerado trafegando com dificuldades.
- Quantidade de veículos estáticos quando não deveriam: este caso ocorre quando o semáforo se encontra verde, mas a via de destino está completamente preenchida, e os veículos não podem cruzar ou sequer se mover. Representa a situação de engarrafamento.

Estes valores são tabulados para posterior visualização em gráficos.

Há limitações no simulador que devem ser levadas em consideração durante a análise dos dados. Os veículos têm o mesmo comprimento, semelhante a um carro. O tempo de aceleração e desaceleração, bem como o tempo de resposta a eventos, não é considerado: veículos mudam instantaneamente de velocidade. Os veículos não mudam de faixa enquanto trafegam numa via que tem várias faixas de rodagem, não quebram nem fecham cruzamentos. Vale lembrar, porém, que mesmo com estas limitações a comparação será feita entre simulações no mesmo simulador, e as possíveis imprecisões incorrerão em todos os casos de estudo.

5 Análise dos dados das simulações

5.1 Cenários de teste

Os cenários de testes pesquisados são apenas três, mas a partir desses três cenários básicos pode-se montar topologias mais complexas. Por exemplo, uma malha de várias ruas que se cruzam, mas sem formar ciclos, pode ser sincronizada. Se cada rua estiver sincronizada individualmente, os cruzamentos com outras ruas representam apenas um deslocamento no tempo, não alterando a sincroniza entre os cruzamentos da rua em si.

Nos diagramas apresentados a seguir, os valores ao lado das arestas representam o comprimento da via. Os veículos que trafegam têm comprimento cinco. Os valores abaixo dos nós representam as durações de cada fase do grupo de semáforos.

5.1.1 Via de mão única

Este cenário representa o mais simples caso de sincronização, onde apenas uma via será sincronizada, sem nenhum controle das vias transversais. O cenário é ilustrado na Figura 2. No caso, pode-se variar o tempo das fases dos semáforos e as distâncias de cada segmento da via.

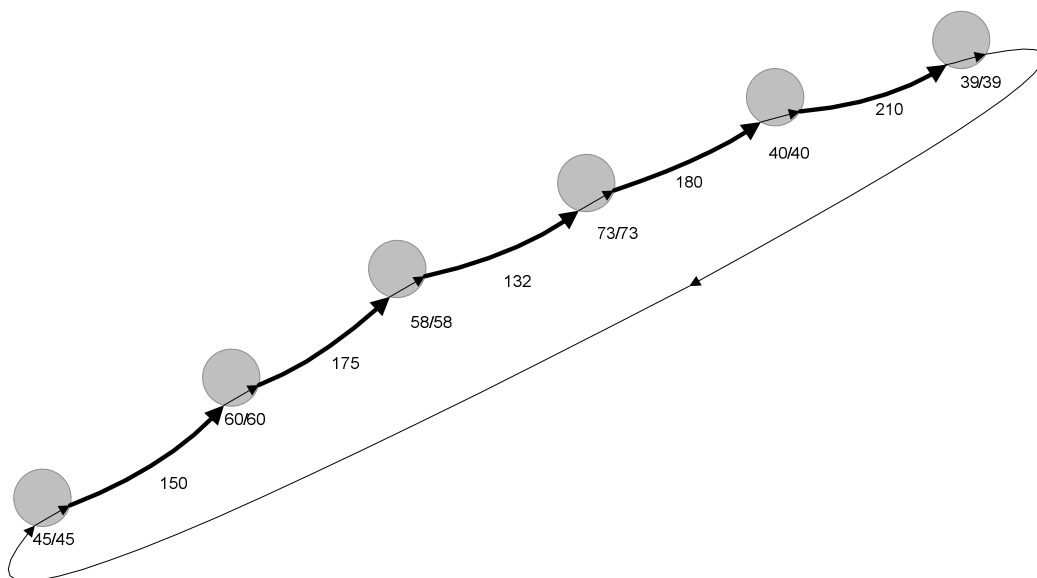


Figura 2 Diagrama representando uma via de mão única

5.1.2 Via de mão dupla

Este cenário representa uma via de mão dupla, mas em que o tráfego é autorizado nas duas direções durante a mesma fase do semáforo. Este é um caso de controle, pois não é possível sincronizar um mesmo grupo de semáforos de modo que em direções contrárias haja o efeito “onda verde”; apenas em situações especiais que envolvem valores específicos de distância, duração das fases e velocidade permitida – quase nunca factível. O cenário é ilustrado na Figura 3.

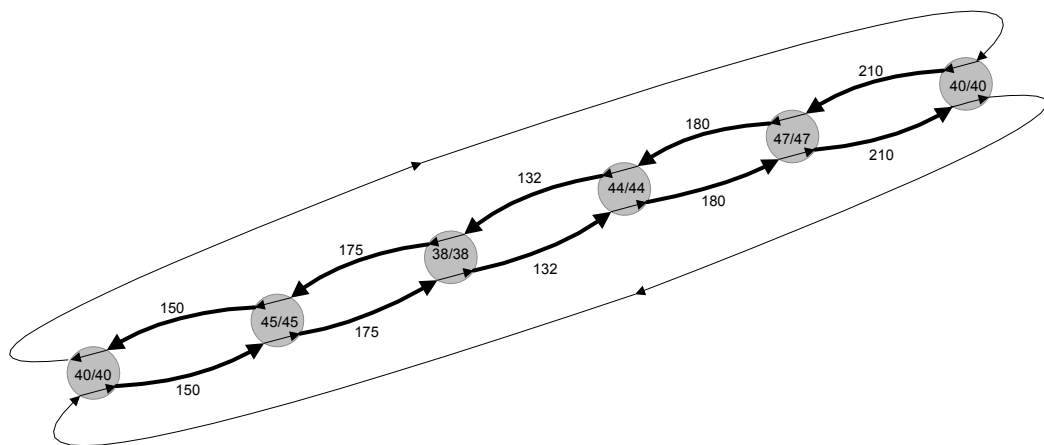


Figura 3 Diagrama representando uma via de mão dupla

5.1.3 Malha de quarteirões com ciclo

Este cenário representa centros urbanos regulares, com quarteirões quadrados e vias de uma única mão, em direções alternadas. A Figura 4 ilustra este cenário.

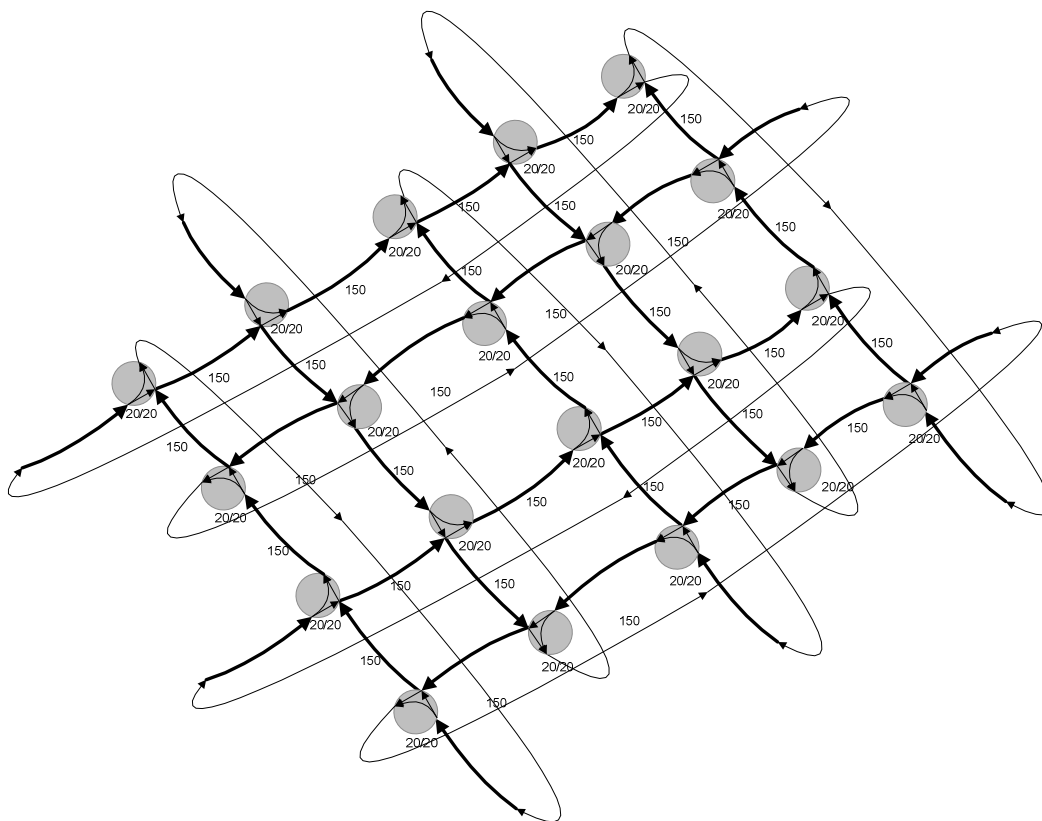


Figura 4 Diagrama representando uma malha de quarteirões com ciclos

5.2 Análise

Nos gráficos apresentados a seguir há o valor das três métricas extraídas pelo simulador, mais as linhas de tendências para as métricas de veículos com movimento dificultado e para veículos estáticos quando não deveriam, utilizando regressão para uma função logarítmica.

5.2.1 Via de mão única

Os resultados obtidos para o cenário de uma via de mão única são apresentados a seguir. Na Figura 5 estão apresentados em gráfico os resultados com o comportamento padrão; na Figura 6 está o comportamento de sincronização; e na Figura 7 está o comportamento de sincronização com limitação de ajuste.

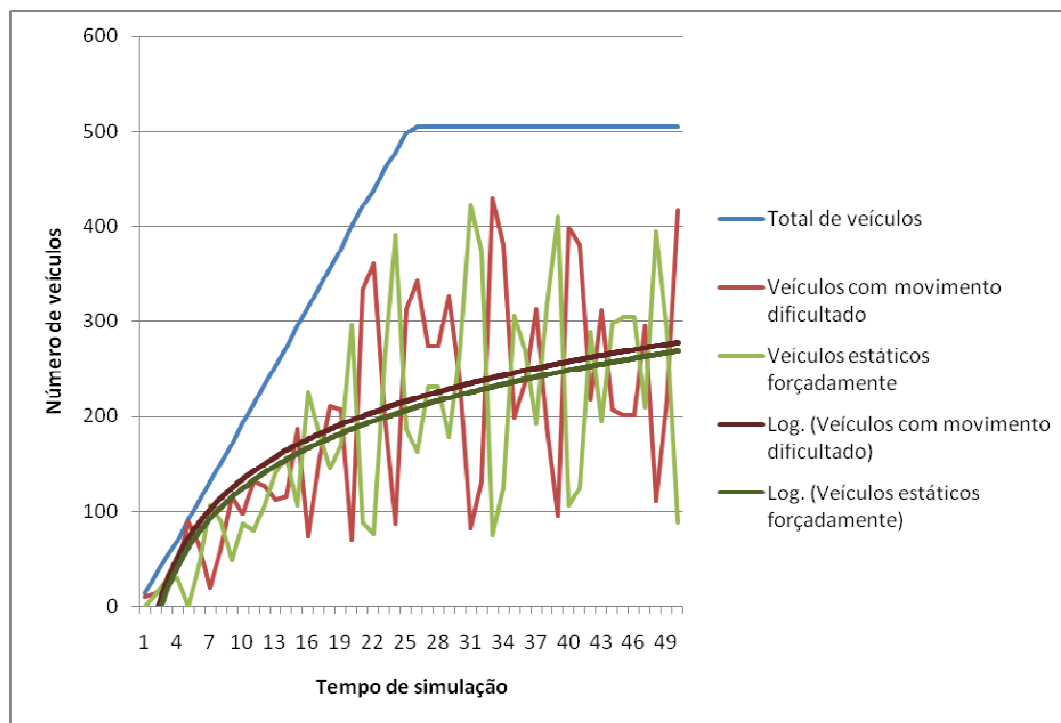


Figura 5 Via de mão única com comportamento padrão

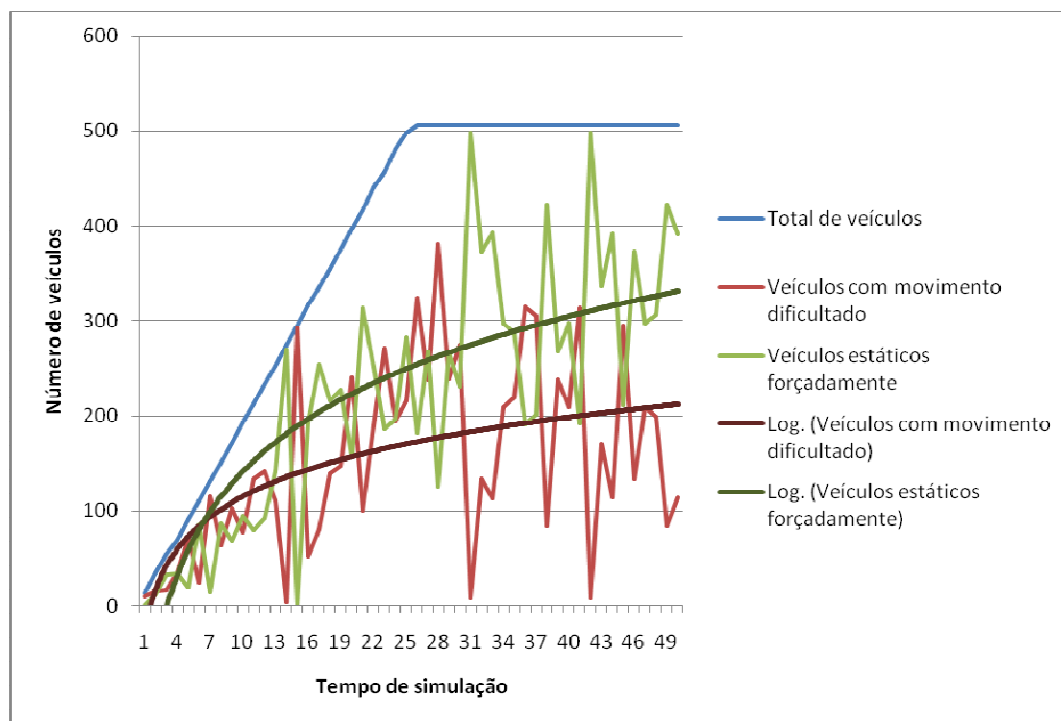


Figura 6 Via de mão única com comportamento de sincronização

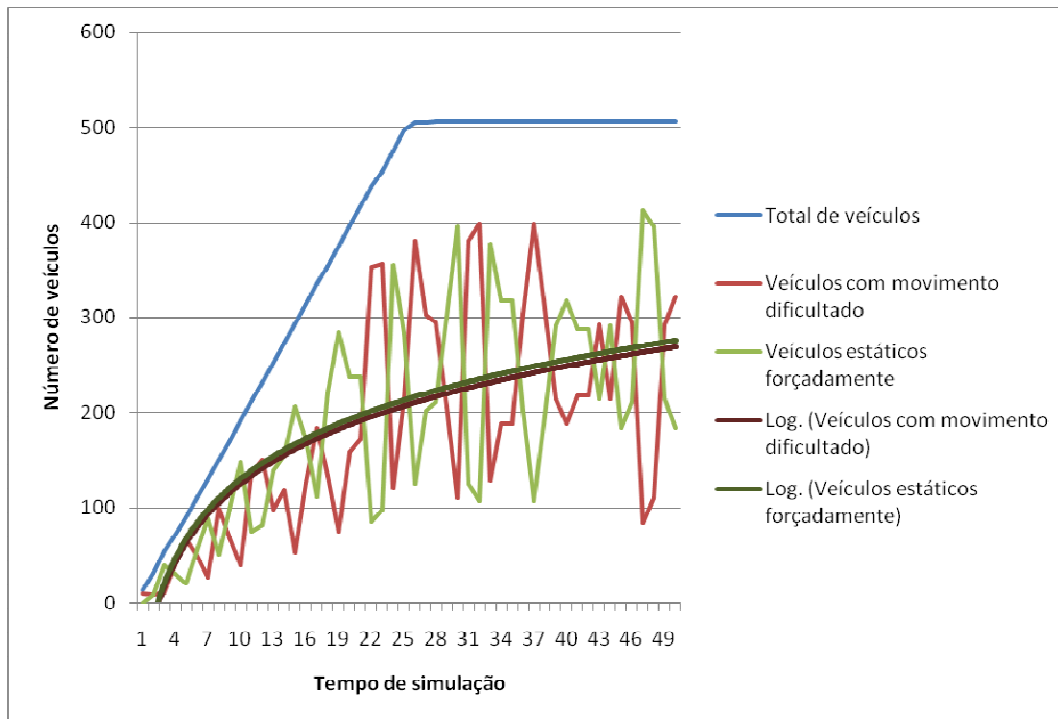


Figura 7 Via de mão única com comportamento de sincronização com limitação de ajuste

Pode-se observar, como previsto, que o comportamento de sincronização sem limitação de ajuste causa mais problemas que benefícios. Pode-se observar também que os resultados do comportamento de sincronização com limitação ficam bem próximos do comportamento padrão. Ao levar em consideração as limitações do simulador e a simplicidade do algoritmo, pode-se imaginar que há espaço para melhorias.

5.2.2 Via de mão dupla

Os resultados obtidos para o cenário de uma via de mão dupla seguem abaixo. Na Figura 8 estão expostos gráficos dos resultados com o comportamento padrão; na Figura 9 está o comportamento de sincronização; e na Figura 10 está o comportamento de sincronização com limitação de ajuste.

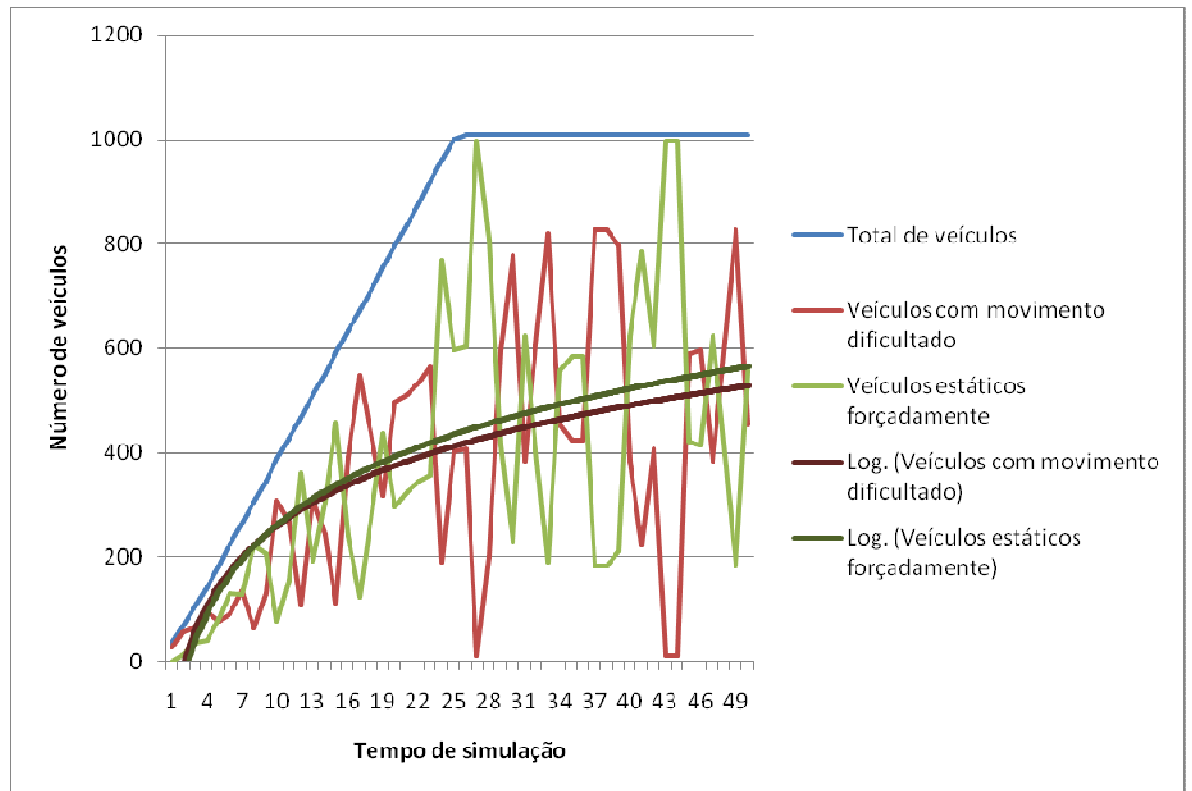


Figura 8 Via de mão dupla com comportamento padrão

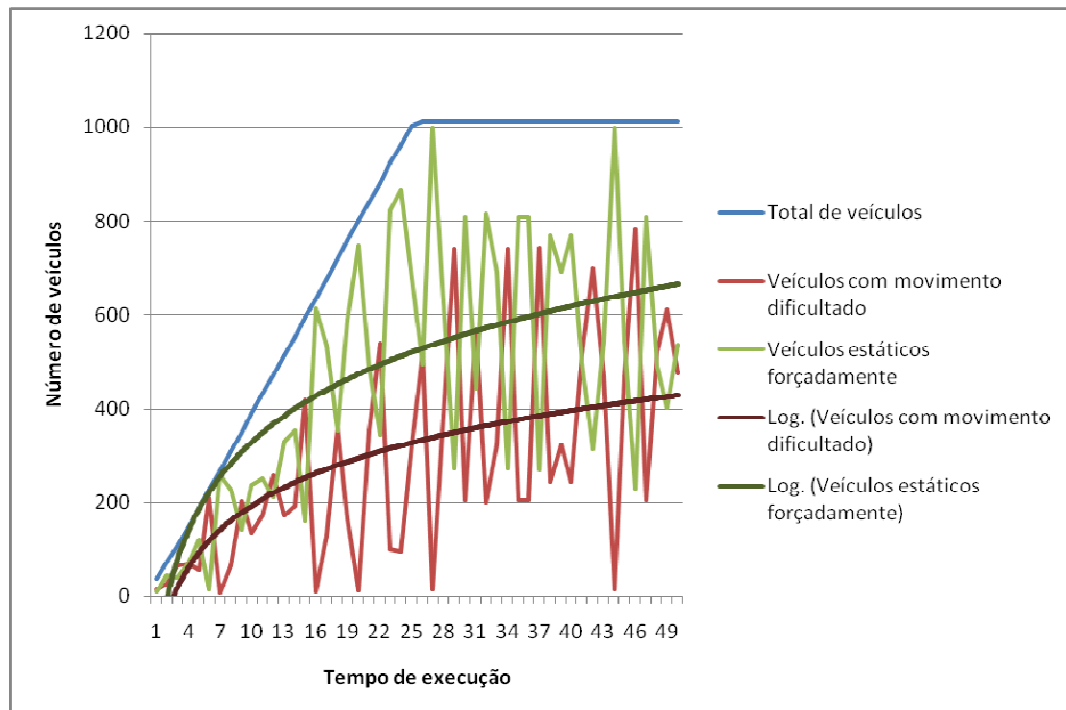


Figura 9 Via de mão dupla com comportamento de sincronização

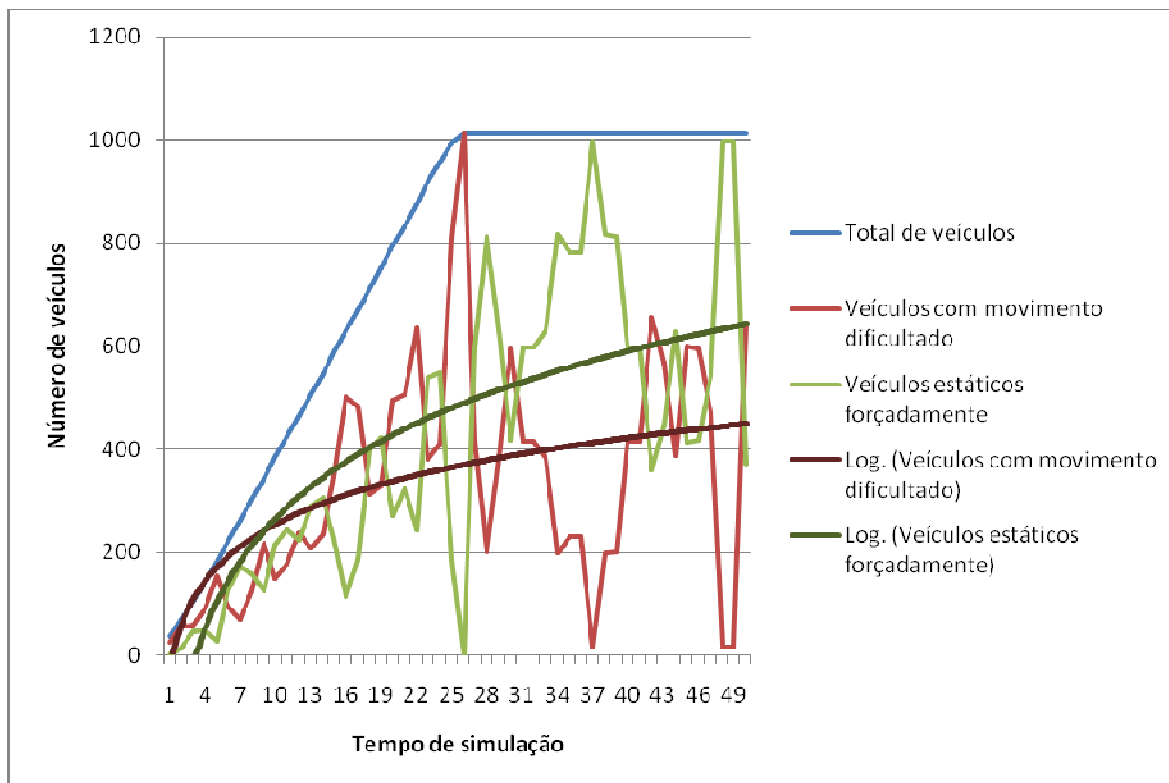


Figura 10 Via de mão dupla com comportamento de sincronização com limitação de ajuste

Como esperado, numa via de mão dupla, onde o fluxo nas duas direções é regulado pelo mesmo conjunto de semáforos, a sincronização simultânea para ambas as direções não é possível. Nenhum dos algoritmos apresentou resultados satisfatórios, e neste caso é melhor a sincronização em apenas uma direção ou o comportamento padrão.

5.2.3 Malha de quarteirões com ciclo

Os resultados obtidos para o cenário da malha de quarteirões com ciclo são apresentados abaixo. Na Figura 11 os gráficos mostram os resultados com o comportamento padrão; na Figura 12 está o comportamento de sincronização; e na Figura 13 está o comportamento de sincronização com limitação de ajuste.

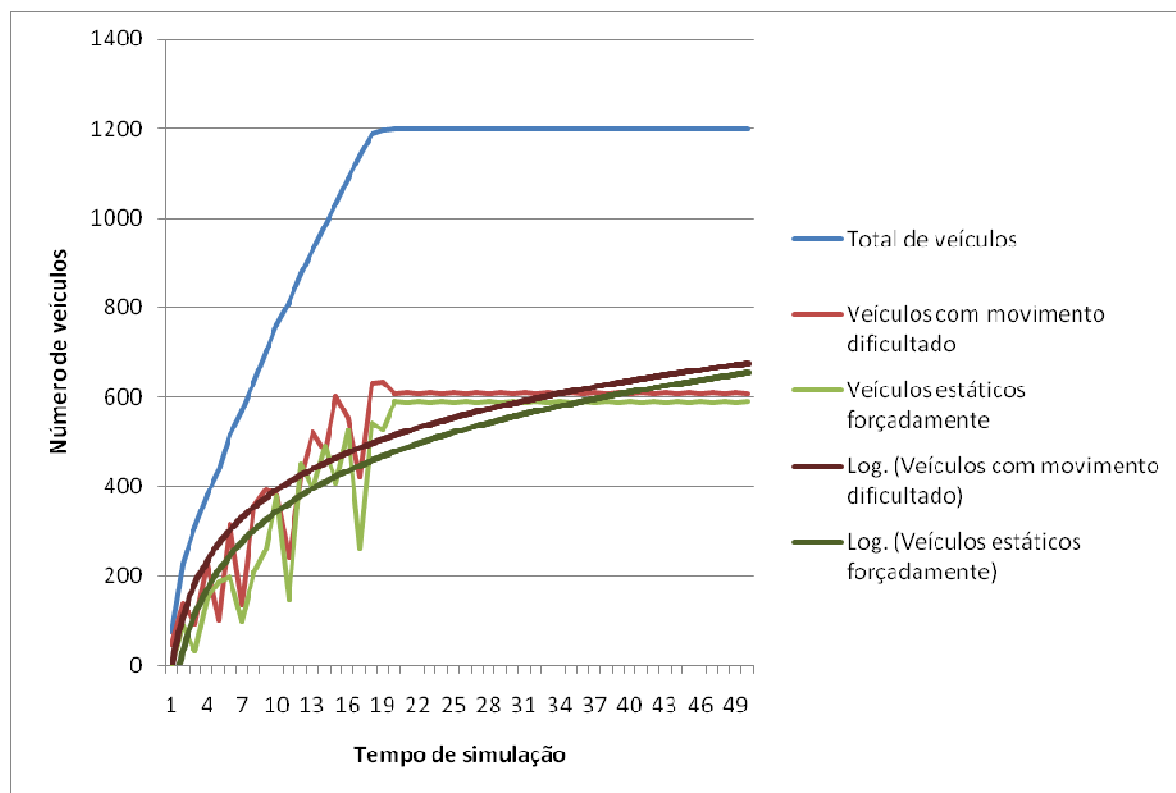


Figura 11 Malha de quarteirões com comportamento padrão

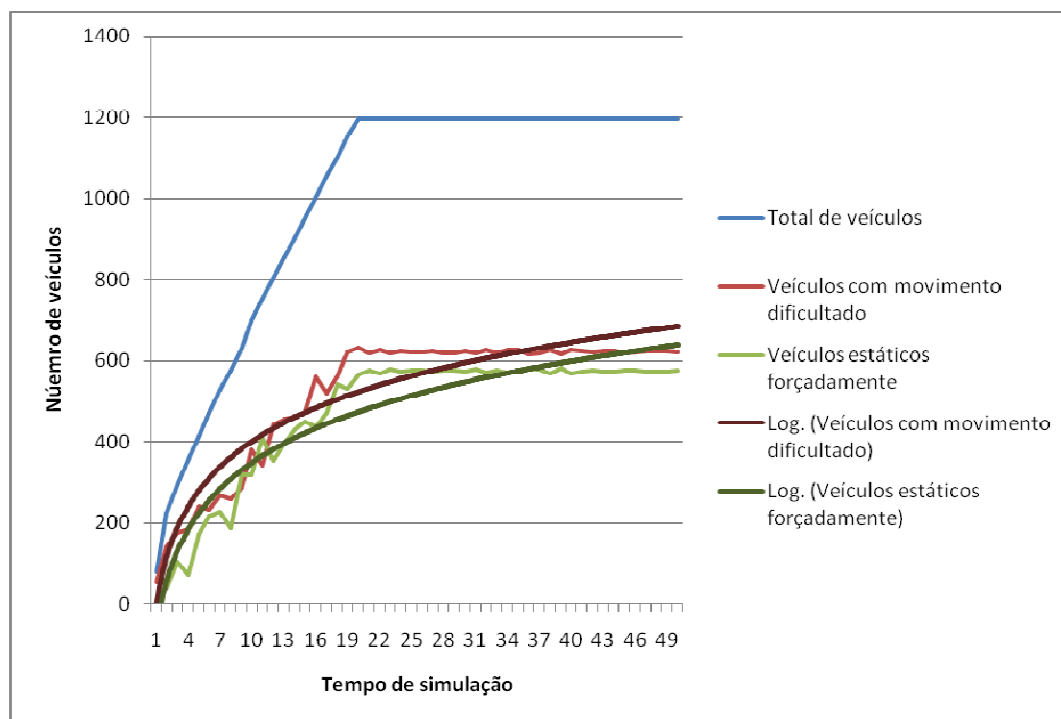


Figura 12 Malha de quarteirões com comportamento de sincronização

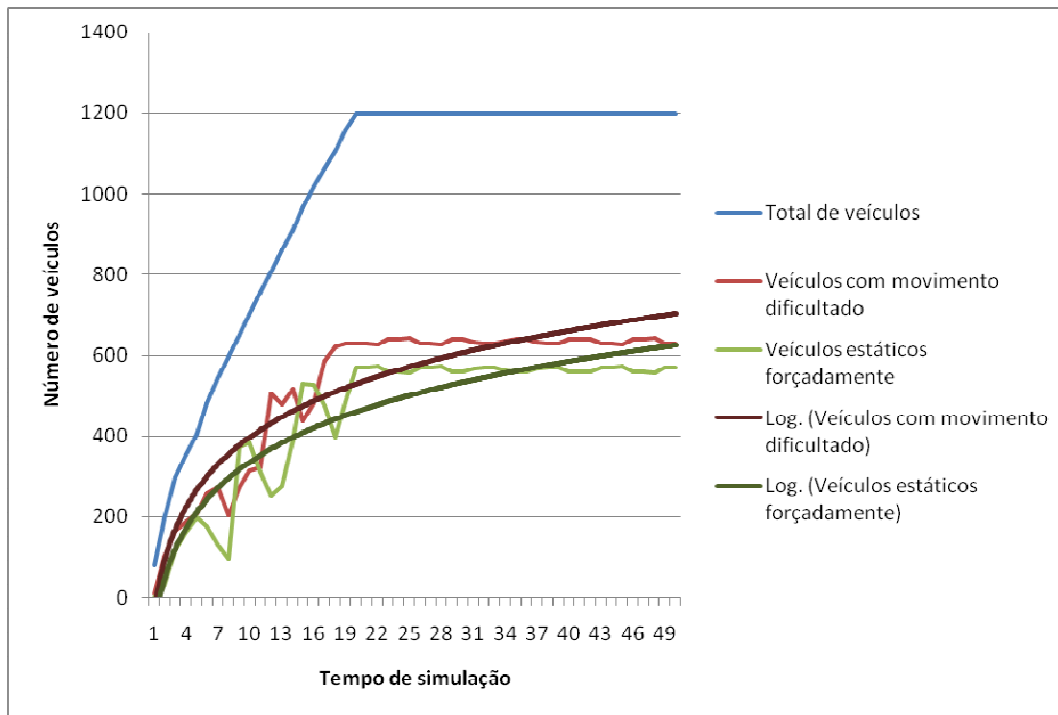


Figura 13 Malha de quarteirões com comportamento de sincronização com limitação de ajuste

Novamente, verifica-se que o comportamento de sincronização sem limitação não cumpre sua tarefa de melhorar o trânsito. No entanto, pode-se verificar que o algoritmo de sincronização com limitação de ajuste consegue ser melhor que o comportamento padrão, pois é capaz de manter mais carros se movendo, ainda que com dificuldades, do que carros estáticos. Isto reforça a idéia de que, com simulações mais precisas, a eficiência do algoritmo pode aumentar.

6 Conclusões

Os impactos causados pela má circulação de veículos em áreas urbanas são evidentes e preocupantes. Dentre as muitas iniciativas para melhorar as condições atuais, a sincronização de semáforos é uma idéia viável e que pode propiciar bom retorno.

A solução apresentada neste trabalho constitui-se de um módulo embarcado com capacidade de comunicação para a sincronização autônoma de uma malha rodoviária urbana arbitrária. No entanto, o escopo do trabalho foi apenas a análise da lógica interna que realizaria a sincronização.

Foram analisados três comportamentos em três topologias de malha: via de mão simples, via de mão dupla e uma malha quadrada de vias. Os dados coletados apontam que a solução proposta consegue resultados ligeiramente melhores que o comportamento padrão dos semáforos. Neste ponto, o dispositivo provavelmente não seria rentável ou completamente eficaz, mas estimula maiores pesquisas na direção.

Tendo em vista as limitações do simulador implementado, podemos esperar resultados melhores se houver uma configuração fina do algoritmo, consideração de outros fatores existentes no contexto de aplicação, ou desenvolvimento de testes com protótipos do módulo.

7 Referências bibliográficas

- [1] TRINTA, Zomar Antônio, **Impactos ambientais provocados pelo trânsito urbano**. Rio de Janeiro (s/d). Disponível em:
<http://66.102.1.104/scholar?num=100&hl=en&lr=&q=cache:fwbMuKB1HL4J:www.univercidade.edu/html/cursos/graduacao/admin/ensino/revista_rea/rea3pdf/ImpactosAmburbano.pdf+efeitos+transporte+rodovi%C3%A1rio+urbano>. Acesso em: 11 Nov 2007.
- [2] MUNSHI, Rupangi Prakash, **Impacts of signal synchronization on vehicular emissions**: an on-board measurement case study. Arlington (2005). Disponível em:
<<http://dspace.uta.edu/handle/10106/189>>. Acesso em: 11 Nov 2007.
- [3] TANENBAUM, Andrew S. **Redes de Computadores**. 4. ed. São Paulo: Campus, 2003
- [4] PEREIRA, Silvio do Lago. **Estruturas de Dados Fundamentais: Conceitos e Aplicações**. São Paulo: Érica, 2000