

CONTROLE SEMAFÓRICO SEM BLOQUEIO E COM PRIORIDADE PARA TRANSPORTE COLETIVO URBANO

Rodrigo Castelan Carlson e Werner Kraus Junior

Depto. de Automação e Sistemas

Univ. Federal de Santa Catarina

Florianópolis SC Brasil

FAX: +55 48 331 9934

e-mail: <rkarlson.werner>@das.ufsc.br

RESUMO

Apresenta-se a aplicação de duas estratégias de controle semafórico em malha viária de pequeno porte, objetivando (i) a eliminação de bloqueios que atualmente ocorrem nesta malha e (ii) garantir prioridade para ônibus coletivo urbano. O estudo não pode utilizar o programa de temporização Transyt 10 devido às deficiências deste em lidar com sincronização semafórica em situações de bloqueios causados por filas excessivas (*spillback effect*). A avaliação do desempenho das várias estratégias foi feita com base em modelo de simulação implementado sobre a plataforma de microsimulação SITRA-B+, a qual permite modelar o efeito de comportamentos de veículos individuais sobre a malha viária. Os resultados de simulação permitem afirmar que a estratégia de eliminação de bloqueios conserva o desempenho do controle ora em uso, apesar de gerar ociosidade na ocupação das filas internas, e que a estratégia de prioridade para ônibus deve ser melhorada, com medidas de compensação para as fases que não recebem extensão por não serem rotas de ônibus coletivo urbano.

1. INTRODUÇÃO

Dentre os vários problemas que surgem na operação de malhas viárias urbanas, os bloqueios de cruzamentos causados por filas de veículos é um dos mais graves, suscitando medidas preventivas (CET, 2001). Em cruzamentos semaforizados, pode-se minorar os bloqueios através do uso de temporização sincronizada de forma a dar vazão a fluxos majoritários através de cruzamentos sucessivos. Isto implica ainda no aumento da segurança no trânsito, pois o fim dos bloqueios tende a eliminar manobras arriscadas de motoristas através de faixas desbloqueadas, calçadas e canteiros, além de diminuir o número de paradas e, por conseguinte, diminuir o risco de colisões. Benefícios não menos importantes são a redução de poluição atmosférica e sonora, e o aumento do conforto para os condutores.

Este trabalho apresenta, na forma de um estudo de caso, a aplicação de técnicas de controle semafórico visando eliminar bloqueios que hoje ocorrem num trecho específico da malha viária da cidade de Florianópolis, SC, Brasil. O estudo é feito por simulação, comparando-se três estratégias: (i) aquela atualmente em uso, (ii) a introdução de fases para descarga de filas internas da malha viária e (iii) o uso de regra de prioridade para uso ônibus coletivo urbano. Esta última estratégia foi estabelecida para verificação do efeito da valorização do transporte coletivo no desempenho global da malha viária sob estudo. O efeito pretendido é o de estimular o uso do transporte coletivo através de melhorias como a diminuição do tempo de viagem e maior previsibilidade dos horários de chegada.

Apesar da disponibilidade da ferramenta Transyt 10 (Crabtree, 1996), esta não pode ser utilizada na geração de planos semafóricos coordenados pois não faz o tratamento adequado do fenômeno de bloqueios de cruzamentos a montante. A escolha das fases foi feita com o objetivo de esvaziar as filas internas da malha viária, criando-se espaços para armazenamento de veículos; como esta solução não faz uso intensivo da capacidade de ocupação das vias, torna-se interessante estudar o problema da deterioração de desempenho quando comparada com uma estratégia que maximiza a ocupação. A hipótese que se faz é que os bloqueios causados por esta última pioram o desempenho a ponto de se tornar preferível uma ocupação menor das vias. Com se verificará, esta hipótese foi confirmada quando se compara desempenho através de número de paradas; já com relação ao atraso médio global, ambas são equivalentes. Por último, compara-se o desempenho da estratégia com prioridade para ônibus, cujo desempenho global espera-se ser pior que as demais, porém com ganhos significativos para a operação do transporte coletivo urbano.

2. A INTERSEÇÃO EM ESTUDO

A Figura 1 mostra o trecho da malha viária sob estudo, com os 10 semáforos que exercem o controle do tráfego. Na saída norte (N) há uma parada de ônibus e na entrada oeste (O) um sensor de detecção de ônibus. Os 4 grupos de conflito a serem resolvidos estão indicados na Figura 2. A mesma mostra ainda as linhas de parada a partir das quais se formam as filas internas desta malha viária, numerados de I a IV. Esta numeração é repetida nas demais figuras para referência

O desenho desta interseção surgiu como parte do programa de melhorias de curto prazo do sistema viário desta cidade. A finalidade foi de se reduzir os congestionamentos e acidentes que

aconteciam devido a uma rotatória operada por regra de prioridade, a qual atendia a um fluxo de veículos muito elevado para seu diâmetro. A nova interseção ampliou a área de filas para veículos que procuram conversões à esquerda. O novo traçado, porém, trouxe o problema do bloqueio de cruzamentos devido às filas internas.

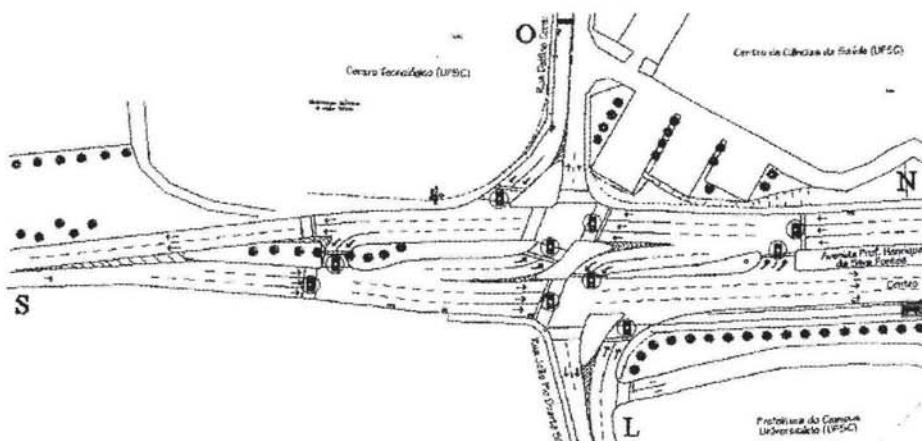


Figura 1: Interseção em estudo.

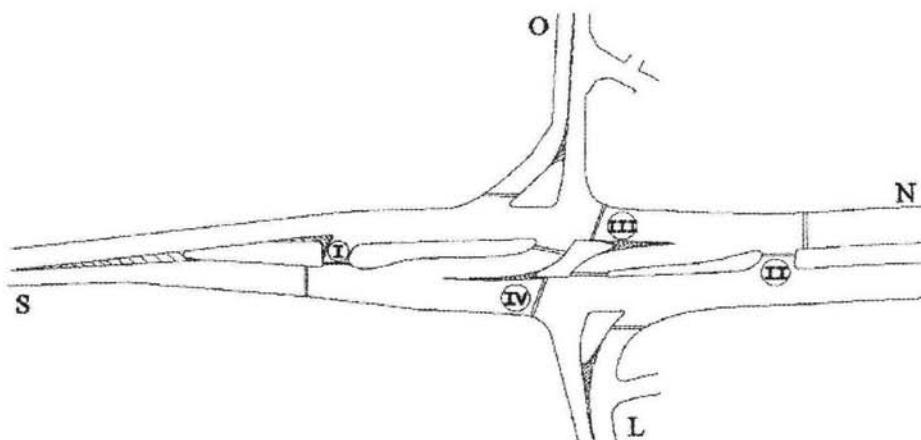


Figura 2: Locais de início de formação de filas.

2.1. A Estratégia Atual

O controle semafórico atualmente em uso consiste de duas fases, C1 e C3, cujos movimentos são apresentados nas Figuras 3 e 4. A duração destas fases é de 40 s, com 36 s de verde, 3 s de amarelo e 1 s de vermelho de segurança, totalizando um ciclo de 80 segundos.

A estratégia atual foi determinada pelo órgão municipal responsável. A determinação da temporização foi realizada de forma empírica através de ajustes sucessivos até que se obteve um resultado que se julgou adequado ao fluxo no local. Porém, a filosofia de operação com apenas duas fases não cumpre o papel de evitar bloqueios causados pelas filas internas, pois a principal característica desta estratégia é a ocupação de toda a capacidade de filas da interseção. Isto é, ela permite o acúmulo de veículos no interior da interseção, o que pode acabar provocando bloqueios.

2.2. Ocorrência de bloqueios

Os bloqueios são causados tanto por veículos de passeio como por ônibus coletivos urbanos, sendo desprezível o tráfego de caminhões nesta malha viária. Dois tipos de bloqueios ocorrem nesta malha viária: bloqueios de faixas, causados pelas filas I e II, e bloqueios de cruzamentos a montante, causados pelas filas III e IV.

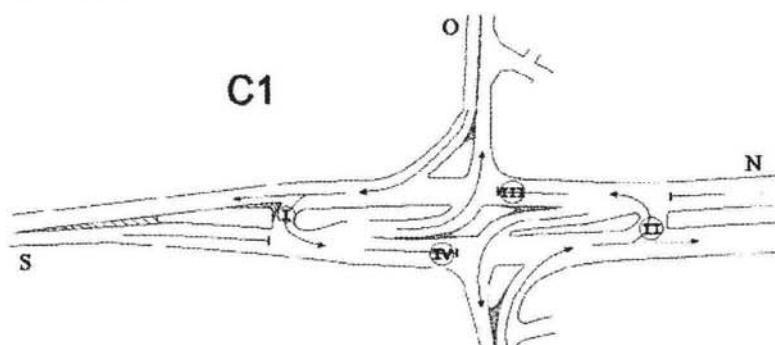


Figura 3: Fase C1.

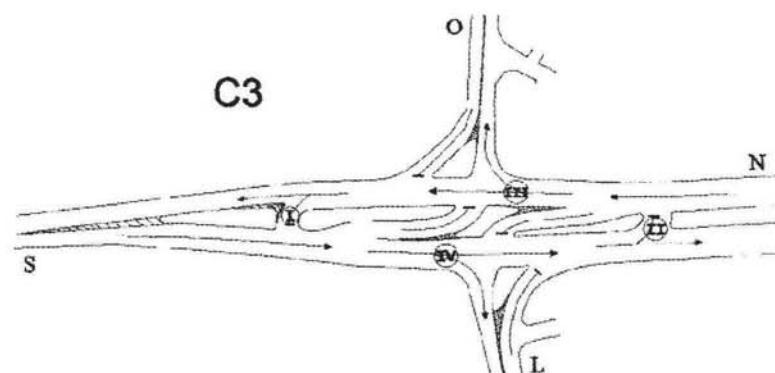


Figura 4: Fase C3.

Os bloqueios de faixas ocorrem devido à pequena capacidade das filas I e II (1 ônibus convencional, ou 2 veículos de passeio). A fila I freqüentemente bloqueia uma das duas faixas no sentido N-S, não sendo raro o bloqueio total. Já a fila II bloqueia uma faixa do sentido S-N, sendo menos freqüente o bloqueio de duas faixas. Neste ponto, existem três faixas para o sentido S-N. O bloqueio de faixas é mais grave do que o examinado a seguir, pois, uma vez formado, permanece durante toda a fase C3.

Os bloqueios a montante ocorrem pelo acúmulo, durante C1, de veículos nas filas III e IV. Este acúmulo é maior pelo fato de, ao final de C3, alguns veículos dos fluxos majoritários S-N e N-S ficarem presos nestas filas.

3. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PROPOSTAS

3.1. Proposta 1: esvaziamento das filas internas

Como forma de se minorar os bloqueios, propõe-se uma estratégia que passa a ter 4 fases, além das duas fases da estratégia atual, C1 e C3. As duas novas fases C2 e C4 são intercaladas às já existentes de acordo com o diagrama de transição de fases da Figura 5.

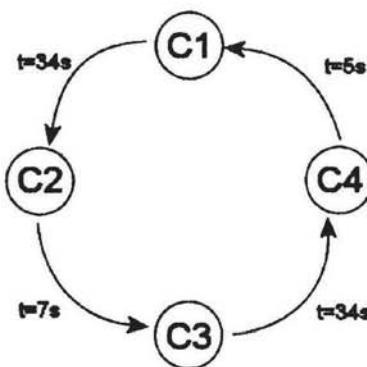


Figura 5: Diagrama de transição de fases da Proposta 1.

O objetivo destas novas fases é permitir o esvaziamento das filas internas. Este efeito é obtido pelo trancamento das alimentações externas das filas, ao mesmo tempo em que se ativa o verde para permitir a descarga das mesmas. Seja, por exemplo, a fase C1 (ver Figura 3.). As alimentações para as filas internas são originadas em O e L. Para garantir o esvaziamento das filas, ativa-se, após o término de C1, a fase C2 mostrada na Figura 6. Nesta, as alimentações de O e L são interrompidas, ao passo em que se ativa o verde para as filas formadas em I e IV, descarregando-as.

A fase seguinte, C3, é idêntica à estratégia original (ver Figura 4). Apenas uma curta duração de verde é dada a C2: 3 s. O verde efetivo é prolongado por uma indicação de amarelo também de 3 s. De modo similar, chega-se à fase C4 (ver Figura 7), a qual serve para evitar a parada de veículos que entraram na interseção durante C3 nos sentidos S-N e N-S, esvaziando as filas III e IV que serão recarregadas durante C1.

Com a finalidade de manter alguns padrões da estratégia atual evitando-se alterações bruscas e permitindo uma comparação mais simples, os tempos de vermelho de segurança e amarelo não foram alterados em relação à estratégia atual. O tempo do ciclo também se mantém.

3.2. Proposta 2: introdução de prioridade para ônibus coletivo

Como extensão da proposta 1 e em busca da priorização da passagem para o ônibus de transporte coletivo faz-se ainda uma segunda proposta.

Dentre as diversas vantagens da prioridade para a passagem de ônibus, cita-se, redução no atraso médio dos ônibus e menor variação deste atraso, o que resulta em horários mais certos para a passagem de ônibus, facilitando o planejamento das atividades dos seus passageiros e em um menor tempo de percurso e menor custo para as empresas operadoras das frotas (HEYDECKER, 1983).

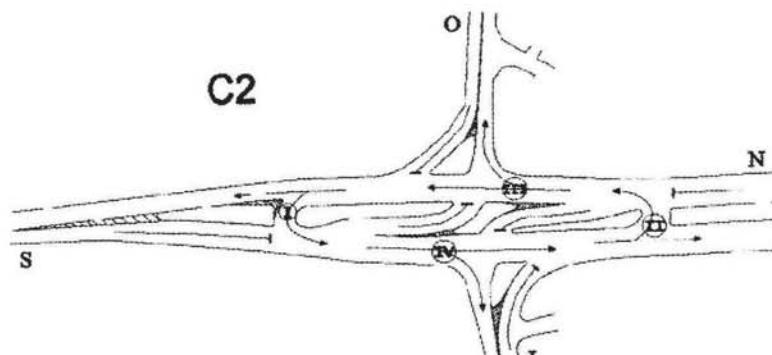


Figura 6: Fase C2.

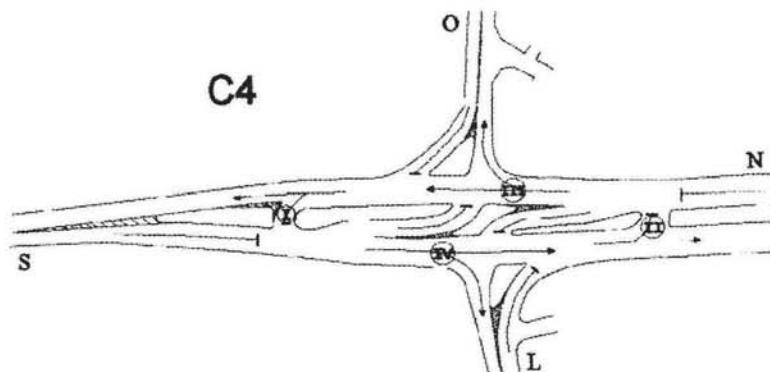


Figura 7: Fase C4.

A prioridade foi implementada usando extensões de verde nas fases durante as quais ocorrem chegadas de ônibus. Outra possibilidade seria a interrupção do vermelho. No entanto, o impacto deste tipo de tratamento nas demais fases é de tal ordem que a compensações mais elaboradas fazem-se necessárias e o efeito final nem sempre justifica o aumento na complexidade do controle (Heydecker, 1983).

Por hipótese, apenas uma aproximação conta com detetor de ônibus e, por conseguinte, apenas as fases que atendem a esta aproximação podem receber extensão do verde. No problema em estudo, esta é a fase C1.

3.2.1. Algoritmo de extensão do verde

Quando não há ônibus detectado, o controle semafórico obedece a estratégia da proposta 1, com 4 fases projetadas para permitir a descarga das filas internas. Se, durante a fase C1, o sensor de ônibus é ativado, o comportamento passa a ser aquele representado no diagrama da Figura 8. A extensão desta fase para o primeiro ônibus detectado é equivalente à duração original da fase (34 s). Este valor foi escolhido por representar o tempo necessário para que o ônibus percorra o trajeto entre o detetor e o local de início da fila I, o qual se quer manter desbloqueado — o diagrama da malha viária na Figura 1 mostra que a parada de um ônibus neste local acarreta bloqueio de faixas da via no sentido N-S.

Ocorrerá extensão de fase ainda para um segundo ônibus desde que a distância temporal (gap) entre o segundo e o primeiro ônibus seja menor ou igual a 10 segundos. Esta extensão permite que os ônibus que estejam seguindo esta rota tenham caminho livre e venham a parar apenas na área IV.

Deve-se observar que a extensão de verde foi aplicada com a estratégia proposta 1 e não com a estratégia atual. Isto se justifica pois a aplicação de extensões de verde na estratégia atual causaria aumento severo nas filas I e IV e nos bloqueios causado por elas.

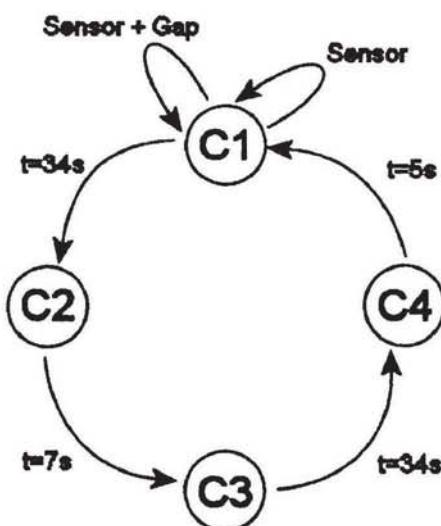


Figura 8: Diagrama de funcionamento da Proposta 2.

4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

4.1. O Modelo de Simulação

Para estudar o problema foi utilizado o simulador Sitra-B+ (CERT, 2000) desenvolvido no CERT, Toulouse, França. Do ponto de vista de fidedignidade do modelo de simulação, a principal limitação se refere ao bloqueio; algumas situações que na realidade provocariam o bloqueio não o fazem no modelo. Isto ocorre na fila I, na qual nem sempre a parada de veículos causa bloqueio. Na situação real, o bloqueio acontece apenas se há no mínimo um ônibus ou no mínimo dois carros. Portanto se apenas um carro parar na sinaleira não há bloqueio. Já no modelo de simulação algumas situações com apenas um ônibus ou com dois ou três carros podem não provocar o bloqueio, além de que nunca há bloqueio total. Isso ocorre pois, no simulador, os veículos ocupam apenas a faixa sobre a qual se encontram. Portanto, mesmo que graficamente eles ocupem outras faixas (devido à extensão do comprimento), a única faixa que é dita ocupada para o simulador é a faixa onde se encontra o centro do veículo. Para efeito do estudo comparativo ora realizado, esta limitação afeta igualmente as três estratégias de controle. Assim, apesar de o efeito dos bloqueios ser mais sério na situação real do que no modelo de simulação, as diferenças de comportamento ficarão evidentes quando se comparam os desempenhos das três estratégias estudadas.

O modelo simula apenas o bloqueio causado pela fila I, deixando de lado as filas II, III e IV. Isto se justifica porque o bloqueio devido a fila I é mais grave, dado que a via bloqueada tem menos faixas, seu efeito é mais duradouro e o fluxo de ônibus neste local é expressivamente maior. O fluxo majoritário de ônibus tem origem em O e destino para N, contando com ônibus articulados de comprimento em torno de 18 m. Estes são os maiores causadores de bloqueios, e, portanto, são os representados no modelo de simulação.

O modelo conta ainda com uma parada de ônibus na saída N, representado por uma placa de parada de ônibus, e um sensor de ônibus na entrada O, representado por uma faixa preta, e que podem ser vistos na Figura 1.

4.2. Comparaçāo dos resultados

As simulações realizadas tiveram duração de uma hora e possuāam as mesmas configurações. A única alteraāo é a estratégia de controle. A análise será feita inicialmente considerando os resultados globais da interseāo e posteriormente considerando os resultados para diferentes áreas da interseāo com a finalidade de verificar se os objetivos de evitar bloqueios e melhorar o tráfego de ônibus foram atingidos e se foram satisfatórios.

Os resultados globais consideram o desempenho de todas as vias que formam a malha viária, em termos de velocidade média, tempo total de percurso, distância total percorrida, número de paradas e o tempo total de parada. Todos os resultados são valores finais relativos à uma hora de simulação. Não foram feitas ponderações.

Para melhor avaliar os resultados obtidos, a Tabela 1 apresenta os fluxos nas diferentes rotas, os quais refletem a demanda fora do pico, no período da manhã, num dia típico de semana.

Tabela 1: Fluxo das diferentes rotas.

Origem	Destino	Fluxo(veh/h)
Norte	Sul	488
	Leste	208
	Oeste	492
	Total:	1188
Sul	Norte	464
	Leste	140
	Oeste	164
	Total:	768
Leste	Norte	195
	Sul	168
	Oeste	259
	Total:	622
Oeste	Norte	126
	Sul	74
	Leste	94
	Total:	294
Total Geral:		2872

4.2.1. Resultados globais

A Tabela 2 apresenta os resultados globais de desempenho. Como se observa, as estratégias atual e proposta 1 apresentam desempenho semelhante, exceto pelos critérios relacionados a paradas. Neste particular, a proposta 1 apresentou uma redução de 7.4% no número de paradas, indicando um melhor desempenho do ponto de vista de consumo de combustível e poluição ambiental (ruído e emissões de poluentes). Em contrapartida, ocorreu um aumento de 10.9% no tempo perdido em paradas com relação à estratégia atual.

Tabela 2: Desempenho global da interseção.

Critério	Atual	Proposta 1	Proposta 2
Velocidade média (m/s)	5,56	5,46	4,75
Tempo total de percurso (s)	191450	194339	222754
Distância total percorrida (m)	1065260	1060782	1059060
Numero total de paradas	3343	3096	3592
Tempo total de parada (s)	51833	57458	81597

Já a proposta 2, que contempla prioridade para ônibus coletivo urbano, tem desempenho inferior quando se comparam os dados globais, como era esperado. A adoção de uma tal estratégia tem de vir acompanhada de uma política de incentivo ao uso do transporte coletivo; de fato, o pior desempenho funciona, aqui, como uma penalização dos motoristas de veículos particulares pois, como se verá adiante, os ônibus efetivamente fluem melhor com esta estratégia.

Os tempos de verde para cada fase são mostrados na Tabela 3. Vê-se que as propostas 1 e 2 causam a redução do tempo de verde nas fases C1 e C3 em relação a estratégia atual. Claramente esta redução provoca o acúmulo de carros nas entradas da malha viária, pois nas fases C2 e C4 estas entradas estão bloqueadas enquanto se descarregam as filas internas. Também, existe uma redução do tempo de verde devido ao aumento de tempo perdido por vermelho de segurança.

Do ponto de vista da prioridade para ônibus, o tempo de verde em C1 para a proposta 2 mostra que a extensão realmente aconteceu e que prejudicou em cerca de 10% o tempo de verde em C3. Isto afeta principalmente os veículos que chegam na interseção pelo Sul e pelo Norte.

A estratégia atual tem como característica o aproveitamento máximo possível do espaço disponível no interior da interseção. Tendo em vista que as propostas 1 e 2 buscam o efeito contrário, evitar um acúmulo excessivo de veículos no interior da interseção e mantê-los nas vias de entrada evitando-se os bloqueios, a seguir são comparados os resultados nas quatro entradas da malha viária em estudo.

Tabela 3: Tempo de verde para cada fase (s).

	Atual	Proposta 1	Proposta 2
C1	1620	1350	1554
C2	-	312	281
C3	1620	1355	1230
C4	-	221	209

4.2.2. Resultados nas entradas da malha

A Tabela 4 mostra os resultados separados por entrada específica da malha. Como se depreende, aumentos da ordem de 15% ocorreram na proposta 1, em relação à estratégia atual, em indicadores como taxa média de ocupação, número de paradas e o tempo total de paradas.

Simetricamente, a velocidade média sofreu redução dos mesmos 15%. Pode-se afirmar, então, que o efeito final foi de transferir para fora da malha viária as filas internas da estratégia de controle atual.

Para a proposta 2, as entradas O e L tem valores mais baixos se comparados com a primeira devido a extensão de verde para a passagem do ônibus. Nas entradas S e N o acúmulo de carros foi maior para esta estratégia mostrando que a extensão de verde as prejudica, como já havia sido constatado na análise dos tempos de verde para as fases.

Tabela 4: Desempenho nas entradas da interseção.

	Atual	Proposta 1	Proposta 2
Entrada Oeste			
Taxa média de ocupação	2.16	2.52	2.2
Velocidade média (m/s)	8.03	7.03	7.89
Tempo médio de percurso (s)	20.93	24.69	21.37
Número de paradas	26	82	41
Tempo total de paradas (s)	203	940	274
Entrada Leste			
Taxa média de ocupação	2.61	2.86	2.73
Velocidade média (m/s)	10.74	10.06	10.39
Tempo médio de percurso (s)	14.55	16.10	15.31
Número de paradas	4	39	26
Tempo total de paradas (s)	7	263	89
Entrada Sul			
Taxa média de ocupação	2.15	2.47	3.81
Velocidade média (m/s)	8.84	8.13	6.52
Tempo médio de percurso (s)	8.95	10.4	16.62
Número de paradas	26	57	224
Tempo total de paradas (s)	94	399	3632
Entrada Norte			
Taxa média de ocupação	10.75	12.61	16.97
Velocidade média (m/s)	5.83	5.13	4.15
Tempo médio de percurso (s)	31.11	36.57	49.79
Número de paradas	719	782	1053
Tempo total de paradas (s)	12037	17801	30835

4.2.3. Resultados das filas internas

Ainda com a finalidade de verificar se eficácia da estratégia de esvaziar as filas no interior da interseção, e por conseguinte acabar com os bloqueios, a seguir é feita a análise de desempenho de cada faixa individual, nas áreas afetadas. A Tabela 5 mostra os dados referentes a faixa que ocupada causa o bloqueio devido a fila I e a faixa que é bloqueada.

A proposta 1 evitou efetivamente o bloqueio pois nenhum veículo parou na pista que é bloqueada pela estratégia atual, conforme mostram as duas últimas linhas da Tabela 5. Apesar disso, não foi garantido que veículos não ficaram parados na fila I - foram registradas 9 paradas nesta fila. A proposta 2, com prioridade para ônibus, reduziu quase que totalmente o número de paradas na via bloqueada (90% de redução com relação à atual).

Tabela 5: Desempenho na fila I.

	Atual	Proposta 1	Proposta 2
Faixa que ocupada causa bloqueio devido a fila I			
Taxa média de ocupação	0.34	0.21	0.18
Taxa máxima de ocupação	3	2	2
Velocidade média (m/s)	7.29	7.53	7.94
Tempo de percurso (s)	6.37	4.02	3.35
Número de paradas	22	9	5
Tempo total de paradas (s)	794	339	231
Faixa que é bloqueada			
Taxa média de ocupação	0.55	0.38	0.38
Taxa máxima de ocupação	4	3	3
Velocidade média (m/s)	8.65	9.48	9.64
Tempo de percurso (s)	4.09	2.83	2.82
Número de paradas	19	0	2
Tempo total de paradas (s)	469	0	6

A tabela 6 mostra o desempenho nas filas III e IV. As melhorias observadas aí foram altas para a proposta 1. O aumento da velocidade média, e redução no tempo de percurso, número de paradas, tempo total de paradas, taxa média de ocupação indica que houve um esvaziamento destas filas, como era pretendido. Para estas filas, a proposta com prioridade de ônibus (proposta 2) mostrou melhorias que a situou, em termos de desempenho, entre a estratégia atual e a proposta 1. Esta portanto, atingiu também o objetivo de esvaziamento das filas III e IV.

Tabela 6: Desempenho nas filas III e IV.

	Atual	Proposta 1	Proposta 2
Desempenho na fila III			
Taxa média de ocupação	2.53	1.93	2.41
Taxa máxima de ocupação	14	13	14
Velocidade média (m/s)	8.14	8.98	9.00
Tempo médio de percurso (s)	10.46	8.10	10.15
Número de paradas	244	176	191
Tempo total de paradas (s)	3892	2273	4054
Desempenho na fila IV			
Taxa média de ocupação	2.09	1.32	1.69
Taxa máxima de ocupação	20	18	19
Velocidade média (m/s)	6.36	8.23	7.88
Tempo médio de percurso (s)	14.52	9.01	11.62
Número de paradas	548	357	390
Tempo total de paradas (s)	11281	4529	8462

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

A comparação do desempenho das três estratégias simuladas permite concluir que, do ponto de vista de desempenho da interseção, consegue-se um menor número de paradas e bloqueios de faixas de rolagem na estratégia proposta 1. O preço a ser pago pela não utilização de toda a capacidade de armazenamento nas filas internas da malha viária é um maior tempo de espera nas filas, e uma diminuição da velocidade média global. Entretanto, pode-se argumentar que a "troca" é justa, pois um menor número de frenagens e acelerações melhora o conforto dos condutores de veículos, ao mesmo tempo em que diminui o impacto no meio ambiente causado pela emissão de poluentes e ruídos no arranque.

Do ponto de vista da proposta de prioridade para transporte coletivo urbano (proposta 2), atingiu-se os objetivos de esvaziamento da interseção e transferência das filas para as vias de entrada. Os dados da Tabela 5 também mostram que os ônibus, em sua rota preferencial, tem os melhores índices de desempenho nesta estratégia. Entretanto, a diminuição significativa do desempenho global, em termos do número de paradas (aumento de 7,4% com relação à atual) e tempo de espera nas paradas (aumento de 57%), indica serem necessários estudos de medidas compensatórias para as demais fases quando se estabelece prioridade para ônibus. Este trabalho deverá ser realizado em continuidade com o estudo aqui apresentado.

Outro aspecto a resolver numa próxima etapa do estudo é a calibração do modelo de simulação. Neste ponto, tanto o modelo de simulação deverá ser revisto como o próprio simulador usado, uma vez que limitações na representação de fenômenos de bloqueio no contexto da simulação prejudicaram as conclusões finais da pesquisa no que se refere à realidade da malha viária em estudo.

6. REFERÊNCIAS

- CET (2001); Campanha Nunca Feche o Cruzamento. <http://www.cetsp.com.br>. Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo.
- Crabtree, M.R, R.A. Vincent, S. Harrison (1996); **Transyt/10 User Guide**. TRRL Laboratory Application Guide 28, Transport and Research Laboratory, Crowthorne, Inglaterra.
- Heydecker, B. G. (1983); Capacity at a signal-controlled junction where there is priority for buses. **Transportation Research B**. Vol. 17B, No. 5. pp. 341-357.