

## ANÁLISE DE RESULTADOS DO SIMULADOR DE TRÁFEGO INTEGRATION NO CASO DE CRUZAMENTOS SEMAFORIZADOS

Barbara Stolte Bezerra

Antonio Clóvis Pinto Ferraz

Scarlett del Carmen Levia Tapia

Departamento de Transporte  
Escola de Engenharia de São Carlos  
Av. Trabalhador Sãocarlense, 400  
São Carlos-SP Cep 13560-290  
e-mail: barbarabezerra@hotmail.com

### RESUMO

Neste trabalho são apresentados e analisados os resultados obtidos com a aplicação do simulador de tráfego *Integration Release 2.2* em alguns casos simples de interseções com semáforos. O processo de análise consistiu da verificação do comportamento de resultados do *Integration* e da comparação com valores de outros modelos teóricos de avaliação do desempenho de semáforos. São objetivos deste trabalho verificar (comprovar) a validade e a consistência dos resultados fornecidos pelo programa em alguns casos simples de interseções com semáforos de tempo fixo.

### ABSTRACT

This paper presents and analyses the results obtained with application of simulator Integration Release 2.2 in simple cases of signalized intersections. The analysis process consisted in the verification of results from Integration and its comparison with others theoretical models of evaluation of signalized intersections. The objectives of this paper are verify the validity and consistence of the software in simple cases of the signalized intersections.

## 1. INTRODUÇÃO

O software *Integration* foi desenvolvido por Michael Van Aerd, Queens University. É um simulador de tráfego microscópico, no qual o comportamento dos veículos é modelado segundo uma relação interveicular em que a velocidade de um veículo é função do espaçamento entre ele e outro veículo que trafega à sua frente. O *Integration*. modela as interações das freeways e as ruas com a composição do tráfego, com controle e rotinas estáticas ou dinâmicas, e componentes de ITS. O modelo também considera que as rotas multi-caminhos dos veículos podem ser dinamicamente selecionadas durante a simulação, baseada nas condições do tráfego. O modelo também realiza a análise do nível de serviço para interseções e coordenação semafórica.

Foram realizados quatro estudos de casos hipotéticos para a verificação dos resultados obtidos pelo software *Integration*. Em todos os casos analisados, os resultados obtidos com o emprego do *Integration* correspondem a um tempo de simulação de 1 hora. As seguintes premissas e parâmetros foram admitidos: fluxo constituído somente de carros, velocidade em fluxo livre = 40km/h, velocidade na capacidade = 30km/h, fluxo de saturação por faixa = 1500veíc/h, densidade de congestionamento = 140veíc/km, duração do amarelo em cada fase = 3s (igual a do entreverdes), tempo perdido em cada fase = 3s, 1 faixa de tráfego para todos os fluxos e extensão dos trechos antes e depois dos semáforos = 150m. De acordo com os resultados de pesquisas de campo realizadas por Demarchi (2002), velocidade na capacidade situa-se em torno de 75% da velocidade em fluxo livre – valor que foi adotado neste trabalho nas aplicações utilizando o *Integration*, salvo em alguns casos devidamente explicitados.

## 2. ANÁLISE DOS ESTUDOS DE CASO

### 2.1. CASO 1 – SEMÁFORO ISOLADO NO CRUZAMENTO DE DUAS VIAS DE SENTIDO ÚNICO

Um caso simples, uma interseção com apenas dois movimentos, e, portanto apenas duas fases, uma para cada movimento das vias. As curvas do atraso e número de paradas x duração do ciclo para os três casos analisados são mostradas nas Figuras 2.2, 2.3 e 2.4 e mostra os valores do atraso e do número de paradas obtidos com a aplicação do *Integration* para diferentes valores do tempo de ciclo, nos seguintes três casos:  $V_1 = 500\text{veíc/h}$  e  $V_2 = 400\text{veíc/h}$ ;  $V_1 = 800\text{veíc/h}$  e  $V_2 = 400\text{veíc/h}$ ;  $V_1 = 855\text{veíc/h}$  e  $V_2 = 500\text{veíc/h}$ . Os tempos de verde foram distribuídos proporcionalmente às taxas de ocupação das faixas críticas. As curvas do atraso e do número de paradas obtidas com os valores fornecidos pelo *Integration* mostram comportamento similar às apresentadas por outros modelos teóricos e por pesquisas de campo.

Pode-se notar que o atraso diminui rapidamente com o aumento da duração do ciclo; numa segunda etapa, permanece mais ou menos constante; e, numa terceira etapa, aumenta lentamente. Assim, para operar com atraso próximo do mínimo, o ciclo deve estar nos intervalos indicados na Tabela 2.1. O número de paradas cai rápido a princípio e passa a diminuir devagar. Assim, para operar com o número de paradas próximo do mínimo, o ciclo deve ser maior que os valores indicados na Tabela 2.1. Também foi analisada a influência da duração do ciclo no consumo de combustível e na emissão de poluentes. No tocante a emissão de poluentes, foi considerada a

soma dos três agentes poluentes (HC, CO e Nox) fornecidos pelo *Integration*. Os resultados obtidos encontram-se nas Figuras 2.5, 2.6 e 2.7..

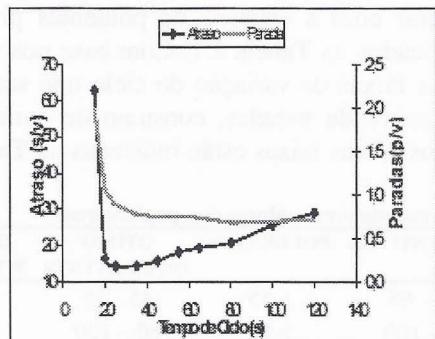


Figura 2.2 : Atraso e número de paradas x ciclo para  $V_1 = 500\text{veic/h}$  e  $V_2 = 400\text{veic/h}$ .

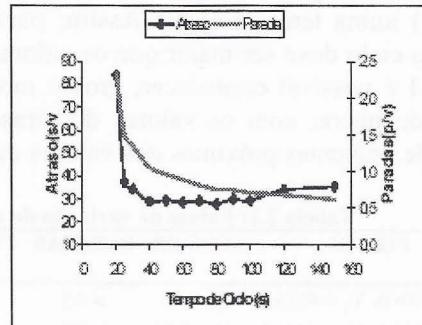


Figura 2.3: Atraso e número de paradas x ciclo para  $V_1 = 800\text{veic/h}$  e  $V_2 = 400\text{veic/h}$ .

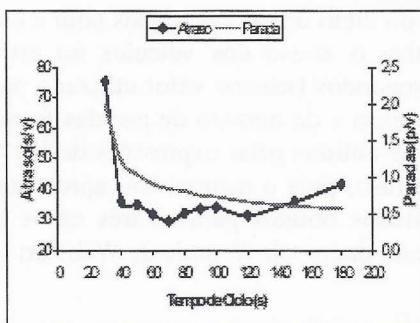


Figura 2.4: Atraso e número de paradas x ciclo para  $V_1 = 855\text{veic/h}$  e  $V_2 = 400\text{veic/h}$ .

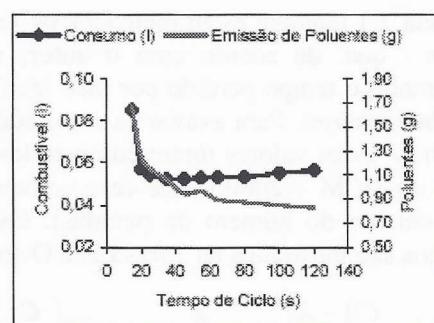


Figura 2.5: Consumo de combustível e emissão de poluentes x ciclo para  $V_1 = 500\text{veic/h}$  e  $V_2 = 400\text{veic/h}$ .

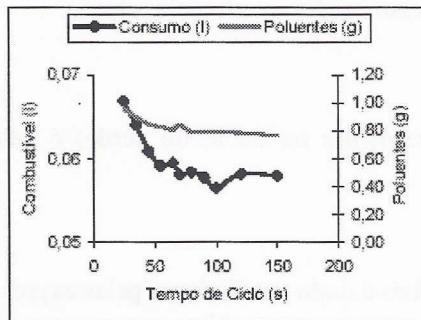


Figura 2.6: Consumo de combustível e emissão de poluentes x ciclo para  $V_1 = 800\text{veic/h}$  e  $V_2 = 400\text{veic/h}$ .

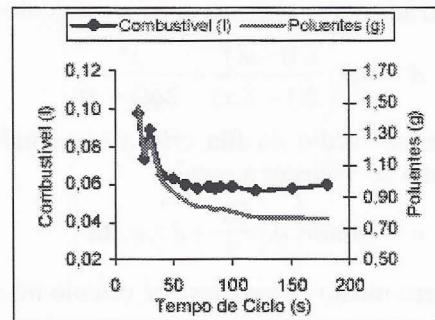


Figura 2.7: Consumo de combustível e emissão de poluentes x ciclo para  $V_1 = 855\text{ veic/h}$  e  $V_2 = 400\text{veic/h}$ .

As curvas do consumo de combustível para os três casos mostram comportamento similar. Numa primeira etapa, o consumo diminui rapidamente com o aumento da duração do ciclo; numa segunda etapa, permanece mais ou menos constante; e, numa terceira etapa, aumenta lentamente. Assim, para operar com o consumo de combustível próximo do mínimo, o ciclo deve estar nos intervalos indicados na Tabela 2.1. Também as curvas de emissão de poluentes para os três casos

se mostram análogas. A quantidade emitida cai rápido numa primeira etapa; passa a diminuir devagar numa segunda etapa; e diminui de maneira bastante lenta (permanece praticamente constante) numa terceira etapa. Assim, para operar com a emissão de poluentes próximo do mínimo, o ciclo deve ser maior que os valores indicados na Tabela 2.1. Com base nos valores da Tabela 2.1 é possível estabelecer, grosso modo, as faixas de variação do ciclo que satisfazem o objetivo de operar com os valores do atraso, número de paradas, consumo de combustível e emissão de poluentes próximos dos valores mínimos. Essas faixas estão indicadas na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1: Faixas de variação do ciclo com menores valores dos parâmetros.**

FLUXOS	ATRASO	PARADAS	COMBUSTIVEL	POLUENTES	OTIMO INTEGRATION	OTIMO WEBSTER
$V_1 = 500\text{v/h}$ $V_2 = 400\text{v/h}$	25 - 45	> 45	35 - 65	> 55	45 - 55	35
$V_1 = 800\text{v/h}$ $V_2 = 400\text{v/h}$	40 - 100	> 80	70 - 100	> 80	80 - 100	70
$V_1 = 855\text{v/h}$ $V_2 = 400\text{v/h}$	60 - 120	> 90	70 - 120	> 100	90 - 120	86

Na Tabela 2.1 também estão indicados os valores do ciclo ótimo calculados com a expressão de Webster - que, de acordo com o autor, minimiza o atraso dos veículos no cruzamento -, considerando o tempo perdido por fase igual a 3 segundos (mesmo valor utilizado na simulação com o *Integration*). Para avaliar os resultados do atraso e do número de paradas fornecidos pelo *Integration*, esses valores foram comparados com os obtidos pelas expressões de Webster e pelo método do HCM - 2000 (neste caso somente o atraso, pois o manual não apresenta expressão para o cálculo do número de paradas). Os resultados obtidos para os três casos particulares analisados são mostrados na Tabela 2.2. O atraso total dado pela fórmula de Webster:

$$d = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0,65 \left( \frac{C}{q^2} \right)^{\frac{1}{3}} x^{(2+5\lambda)} \quad (1)$$

Considerando que o terceiro termo da fórmula anterior representa na ordem de 5 a 15% da soma dos dois primeiros, a seguinte expressão simplificada, denominado Webster simplificado, pode ser utilizada como alternativa para o cálculo do atraso médio é dado pela relação:

$$d = 0,9 \left[ \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} \right] \quad (2)$$

O tamanho médio da fila crítica (no final do vermelho ou início do verde) é calculado pela expressão de Webster a seguir:

$$n = \text{Maior} \left[ q \cdot \left( \frac{Re}{2} + d \right), q \cdot Re \right] \quad (3)$$

O número médio de paradas por veículo no semáforo é dado por Webster pelas expressões:

$$p = \frac{n}{q \cdot C \cdot (1 - q/s)} \quad \text{se } n < (s-q) \cdot Ge \quad (4.1) \quad p = \frac{n}{q \cdot C} + \frac{Ge}{C} \quad \text{se } n > (s-q) \cdot Ge \quad (4.2)$$

Onde, p: número médio de paradas por veículo em paradas/veíc.; d: atraso médio em seg./veíc; C: ciclo em seg.,  $\lambda = Ge/C$ : fração do verde efetivo no ciclo; x: índice de congestionamento; q: volume de tráfego em veíc/seg.; s : fluxo de saturação veíc./seg.; Ge: duração do verde efetivo em seg. e Re : vermelho efetivo em seg.

A expressão genérica para determinação do atraso médio dos veículos em semáforo de tempo fixo não congestionado ( $x \leq 1$ ) do HCM 2000 é dada pela expressão abaixo:

$$d = d_1 \cdot PF + d_2 \quad (5)$$

$$d_1 = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} \quad (6)$$

$$d_2 = 900T \left[ (x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{8klx^2}{T \cdot cap}} \right] \quad (7)$$

Onde,  $d_1$  = atraso devido às chegadas uniformes;  $d_2$  = atraso adicional devido ao efeito de chegadas aleatórias (ajustado pelo período de análise, tipo de semáforo, assumindo que o grupo de faixas não possui fila residual no início da análise), PF: fator função do tipo de coordenação existente entre os semáforos, T: período de análise em horas; cap.: capacidade; l: fator que depende do grau de saturação do fluxo que segue em frente relativo ao semáforo anterior dado, k=0,5 para semáforos de tempo fixo; C: tempo de ciclo s;  $\lambda = Gei/C$  e x: grau de saturação.

Tabela 2.2: Valores do atraso e do número de paradas.

Método	Webster	Webster aproximado	HCM – 2000	Integration
<b><math>V_1=500\text{veíc/h}, V_2=400\text{veíc/h}, C=35\text{s (óptimo de Webster)}, x=0,72 \text{ para os dois fluxos}</math></b>				
Atraso no fluxo $V_1$	12,54	12,88	12,73	12,30
Atraso no fluxo $V_2$	15,38	15,60	15,75	15,20
Atraso no cruzamento	13,80	14,05	14,07	13,58
Número de paradas no fluxo $V_1$	0,81	-	-	0,80
Número de paradas no fluxo $V_2$	0,86	-	-	0,80
Número de paradas no cruzamento	0,83	-	-	0,80
<b><math>V_1=800\text{veíc/h}, V_2=400\text{veíc/h}, C=70\text{s (óptimo de Webster)}, x=0,87 \text{ para os dois fluxos}</math></b>				
Atraso no fluxo $V_1$	21,58	22,79	17,69	22,20
Atraso no fluxo $V_2$	43,09	45,27	34,40	42,70
Atraso no cruzamento	28,75	30,27	23,26	29,69
Número de paradas no fluxo $V_1$	0,84	-	-	0,70
Número de paradas no fluxo $V_2$	0,95	-	-	1,10
Número de paradas no cruzamento	0,87	-	-	0,83
<b><math>V_1=855\text{veíc/h}, V_2=400\text{veíc/h}, C=86\text{s (óptimo de Webster)}, x=0,90 \text{ para os dois fluxos}</math></b>				
Atraso no fluxo $V_1$	26,09	27,38	18,24 <sup>a</sup> /17,59 <sup>b</sup>	20,90
Atraso no fluxo $V_2$	56,38	58,44	38,36 <sup>a</sup> /36,51 <sup>b</sup>	46,80
Atraso no cruzamento	35,74	37,28	24,64 <sup>a</sup> /23,64 <sup>b</sup>	29,15
Número de paradas no fluxo $V_1$	0,85	-	-	0,70
Número de paradas no fluxo $V_2$	0,96	-	-	1,00
Número de paradas no cruzamento	0,88	-	-	0,80

(a) Para um intervalo de análise de 15 minutos; (b) Para um intervalo de análise de 5 minutos.

Na Tabela 2.3 são mostrados os resultados obtidos com a variação do ciclo, nos três casos analisados. Com a variação do ciclo temos a alteração do grau de saturação (x).

Os valores do atraso fornecidos pelas expressões de Webster (1958) (ambas, a original e a simplificada, fornecem valores bastante próximos), do HCM – 2000 (calculada para um período de análise de 15 minutos) e pelo *Integration* são bastante próximos. Para o caso em que  $x \geq 0,90$ ,

no entanto, os valores do *Integration* começam a ficar menores que os fornecidos pelos outros métodos. Isso era esperado no caso da expressão de Webster, pois a mesma não representa bem a realidade para fluxos congestionados ou próximos do congestionamento. No caso da expressão do HCM – 2000, as diferenças, embora menores, ainda são significativas. Os valores do HCM – 2000 para um tempo de análise de 5 minutos, também indicados na Tabela 2.2 e Tabela 2.3, se mostram mais próximos dos valores fornecidos pelo *Integration*.

Tabela 2.3: Comparação da variação do ciclo

CICLO	DEMANDA 500/400			DEMANDA 800/400		GRAU DE SATURAÇÃO
	WEBSTER	HCM-2000	INTEGRATION	WEBSTER	INTEGRATION	
26 s	15,12	14,83	14,15	0,88	0,90	x=0,78
35 s	13,80	14,07	13,58	0,83	0,80	x=0,72
45 s	14,43	14,82	14,72	0,89	0,80	x=0,70
DEMANDA 800/400						
50 s	30,12	30,11	23,80	0,92	0,95	x=0,90
70 s	28,75	30,27	29,69	0,87	0,83	x=0,87
90 s	29,44	31,57	26,80	0,85	0,80	x=0,85
DEMANDA 855/400						
65 s	39,85	34,12	28,63	0,91	0,93	x=0,92
86 s	35,74	34,88	29,15	0,88	0,80	x=0,90
108 s	36,32	37,29	30,33	0,86	0,80	x=0,88

## 2.2. CASO 2 – SEMÁFORO ISOLADO COM CONVERSÃO À ESQUERDA

Na Figura 2.8 são mostrados o esquema da interseção e os diagramas de estágios, fases e tempos empregados.

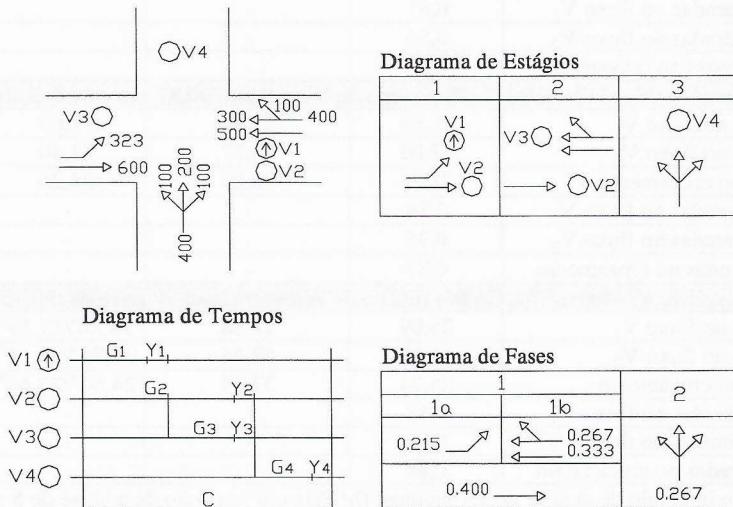


Figura 2.8: Esquema da interseção e plano empregado.

As premissas e parâmetros admitidos são os seguintes: fluxo constituído somente de carros, velocidade livre = 40km/h, velocidade na capacidade = 30km/h, fluxo de saturação por faixa = 1.500veíc/h, densidade de congestionamento = 140veíc/h, duração do amarelo em cada fase = 3s (igual ao entreverdes), tempo perdido em cada fase = 3s, 1 faixa de tráfego para todos os fluxos e extensão dos trechos antes e depois dos semáforos = 150m.

Os valores das taxas de ocupação nas diversas faixas estão indicados na Figura 2.8. O valor crítico de cada fase encontra-se assinalado com um traço em baixo e as fases críticas com um asterisco. Dessa forma, nesse caso, são três as fases críticas e, portanto, o tempo total perdido no ciclo igual a 9s. A Tabela 2.4 mostra os valores do atraso e do número de paradas para diferentes valores do tempo de ciclo fornecidos pelo *Integration*. As curvas do atraso e do número de paradas são mostradas na Figura 2.9. Os resultados mostram que o atraso diminui rapidamente até o ciclo de 40s, permanece mais ou menos constante até o ciclo de 80s e, em seguida, começa a crescer lentamente. O número de paradas cai fortemente até o ciclo de 40s, depois diminui de maneira lenta até o ciclo de 80s e, a partir daí, permanece mais ou menos constante. As curvas do atraso e do número de paradas são mostradas na Figura 2.9. Os resultados mostram que o atraso diminui rapidamente até o ciclo de 40s, permanece mais ou menos constante até o ciclo de 80s e, em seguida, começa a crescer lentamente. O número de paradas cai fortemente até o ciclo de 40s, depois diminui de maneira lenta até o ciclo de 80s e, a partir daí, permanece mais ou menos constante.

Neste caso foram apenas analisados os resultados de atraso e número de paradas fornecidos pelo *Integration*, para determinação do ciclo ótimo do *Integration* (o ciclo onde o atraso e número de paradas é menor), comparado-o com o ciclo ótimo calculado pela fórmula de Webster. Para este caso não foram calculados o atraso e número de paradas por Webster.

Os menores valores do atraso estão na faixa entre 40 e 80s de ciclo. Os menores valores do número de paradas ocorrem a partir do ciclo de 80s. Assim, neste caso particular, o ciclo ótimo considerando os dois fatores está em torno de 80s. O valor do ciclo ótimo calculado pela expressão de Webster é de 100s. Também neste caso de semáforo de três fases, pode-se dizer que o valor do ciclo ótimo fornecido pelo *Integration* se encontra bastante próximo do valor do ciclo ótimo baseado nos valores fornecidos pela expressão de Webster. Ambos, situam-se na zona de menores valores do atraso e, também, na zona de menores valores do número de paradas Figura 2.9.

Vale observar, no caso analisado, que se o fluxo de 600 veíc/h fosse maior que 822 veíc/h, as fases críticas do semáforo não seriam mais três, e sim duas, pois o valor da taxa de ocupação crítica correspondente ao fluxo de 600 veíc/h passaria a ser maior que 0,400. Isso, influenciaria no cálculo do ciclo ótimo de Webster, uma vez que o tempo total perdido no ciclo seria de 6s (correspondente a duas fases críticas) e não mais de 9s (correspondente a 3 fases críticas).

Tabela 2.4: Resultados obtidos *Integration*

Duração do ciclo(seg.)	Atraso (seg./veíc)	Número de paradas (par/veíc)
20	78,98	1,95
30	38,30	1,34
40	23,71	1,06
50	26,44	1,03
60	25,28	0,96
70	28,10	0,96
80	5,95	0,88
90	28,33	0,88
100	30,87	0,89
120	33,97	0,85
140	40,37	0,89

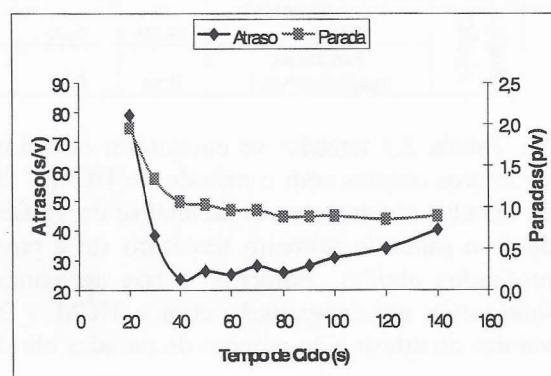


Figura 2.9: Atraso e paradas x tempo de ciclo

### 2.3. CASO 3 – DOIS SEMÁFOROS PRÓXIMOS NUMA VIA DE SENTIDO ÚNICO

Na Figura 2.10 é mostrado o esquema da situação analisada.

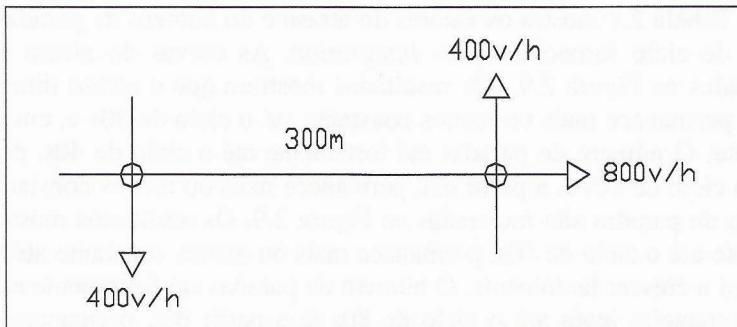


Figura 2.10: Esquema da situação analisada.

As premissas e parâmetros admitidos são os seguintes: fluxo constituído somente de carros, velocidade livre = 40km/h, velocidade na capacidade = 39,99km/h, fluxo de saturação por faixa = 1.500veíc/h, concentração de congestionamento = 140veíc/km, duração do amarelo (entreverdes) em cada fase = 3s, tempo perdido em cada fase = 3s, 1 faixa de tráfego para todos os fluxos e extensão dos trechos antes e depois dos semáforos = 150m (exceto no trecho de ligação entre os semáforos onde a extensão é de 300m). Nessas condições, o ciclo ótimo de Webster para os dois semáforos é de 70s e os tempos de verde ótimos (distribuídos proporcionalmente às taxas de ocupação críticas) de 42,64s para a via principal e 21,36s para as vias secundárias. A defasagem ótima teórica entre os semáforos é de 27s. Para verificar o impacto dos diferentes valores da defasagem (*offset*) no atraso e no número de paradas, foram realizadas simulações no *Integration* para vários valores distintos da defasagem, sendo os resultados mostrados na Tabela 2.5 e na Figura 2.11.

Tabela 2.5: Atraso e número de paradas x defasagem

Defasagem (seg.)		0 (70)	10	20	27	30	40	50	60
Integration	Atraso na ligação (seg./veíc)	17,20	10,80	4,10	2,40	2,70	12,30	22,20	23,90
	Paradas na ligação (par/veíc)	0,80	0,40	0,20	0,20	0,30	0,80	1,00	0,90
HCM 2000	Atraso na ligação (s/veíc)	17,04	10,39	4,32	1,22	3,52	11,48	19,44	24,15
Análise Gráfica	Atraso na ligação (seg./veíc)	14,60	6,26	2,71	0,00	0,20	4,88	14,38	26,81
	Paradas na ligação (par/veíc)	0,58	0,31	0,10	0,00	0,10	0,35	0,62	0,86

Na Tabela 2.5 também se encontram os valores do atraso no trecho de ligação entre os dois semáforos obtidos com o método do HCM – 2000, bem como os valores do atraso e do número de paradas obtidos através da análise do gráfico de espaço x tempo do movimento dos veículos desde a saída do primeiro semáforo até a passagem pelo segundo. Duas observações sobre os resultados obtidos. Primeiro, a boa aproximação entre os valores do atraso fornecidos pelo *Integration* em comparação com o HCM – 2000. Segundo, ainda que as diferenças entre os valores do atraso e do número de paradas obtidos pelo método de análise gráfica e os fornecidos

pelo *Integration* sejam significativas – o que era esperado, pois na análise gráfica o fluxo de veículos foi considerado totalmente regular. Com a sincronização adequada há significativa redução do atraso e do número de paradas no trecho de ligação dos semáforos consecutivos.

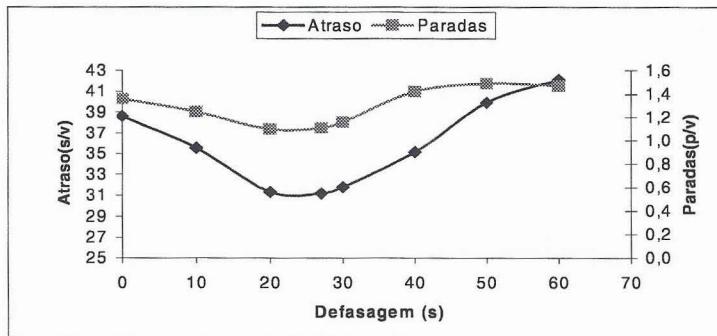


Figura 2.11: Atraso e número de paradas x defasagem

### 3. CONCLUSÕES

Numa abordagem preliminar pode-se concluir que os resultados de do software *Integration* para valores de grau de saturação até  $x = 0,90$  são próximos dos métodos de Webster e do HCM 2000, no caso 1. O ciclo ótimo do *integration* este entre os valores do ciclo de Webster (ciclo entre 0,75% e 1,25% do ciclo ótimo) como identificado no caso 1 e caso 2. O resultado sobre a defasagem ótima do *integration* está muito próximo dos resultados do HCM 2000 e da análise gráfica, como visto no caso 3. A vantagem do *Integration* é a possibilidade de visualização do que está sendo simulado, auxiliando na detecção de erros de codificação, bem como a verificação da formação de filas à montante da interseção.

### BIBLIOGRAFIA

- Demarchi, S.H.(2002). Uma nova formulação para o modelo fluxo-velocidade-densidade de Van Aerde, Anais do XVI ANPET Natal- RN 1, 313-324.
- HCM (2000). **Highway Capacity Manual**. Transportation Research Board. Washington D.C.
- Van Aerde , M. (2002) Integration Release 2.30 for Windows: User's Guide. V. I e II. Queen's University Kingston, Ontário, Canadá.
- Webster, F.V.(1958) **Traffic signal settings**. Technical Paper. Road Research