

CONTROLE ÓTIMO DE UM CRUZAMENTO AUTOMATIZADO DE TRÁFEGO URBANO

RÔMULO S. DE OLIVEIRA†, JEAN-LOUP FARGES‡, GUILHERME O. MOREIRA†, WERNER KRAUS JR.†

†*Depto. de Automação e Sistemas*
Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis SC, Brasil
E-mail: <romulo,gmoreira,werner>@das.ufsc.br

‡*ONERA, Toulouse, França*
E-mail: farges@cert.fr

Resumo— Propõe-se um novo conceito para cruzamentos viários baseado no uso intensivo de componentes de Sistemas Inteligentes de Transportes. Os veículos que adentram um certo perímetro do cruzamento tem suas acelerações definidas por um Controlador Veicular Centralizado (CVC). O CVC elimina a necessidade de semáforos, minimizando o efeito “gargalo” que ocorre devido aos conflitos entre fluxos transversais. Examina-se a aplicação do CVC em um problema de cruzamento com dois fluxos conflitantes, com chegadas aleatórias distribuídas de acordo com uma lei exponencial modificada. O controle baseia-se em algoritmo de minimização dos atrasos veiculares. Resultados de simulação mostram o aumento de capacidade obtido pelo CVC. Discute-se ainda a relação entre o custo computacional e o desempenho ótimo do cruzamento.

Abstract— A new concept for road intersections is proposed, based on Intelligent Transportation Systems (ITS) technology. Vehicles entering a certain perimeter from the intersection are accelerated by a Centralized Vehicle Controller (CVC). The CVC eliminates the need of semaphores, minimizing the bottleneck effect caused by conflicting traffic streams. Application of the CVC in an intersection with two conflicting approaches with arrival patterns following a modified exponential distribution is examined. Control is accomplished by a vehicle-delay minimization algorithm. Simulation results show the capacity increase granted by the CVC. Also, the trade-off between intersection performance and computational cost of implementing the controls is discussed.

Key Words— Sistemas Inteligentes de Transportes, Controle de Tráfego Veicular, Engenharia de Tráfego.

1 Introdução

O rápido avanço na tecnologia de veículos e de infra-estrutura das auto-estradas tem permitido a implantação de métodos de controle que aumentam a capacidade de fluxo nestas vias. Exemplos incluem a formação de “pelotões” de veículos controlados automaticamente para minimização do espaço inter-veicular (PATH, 1999), estratégias de prevenção de colisões (Jones, 2001) e controle da entrada de veículos por acessos laterais (Gibson, 1995). Sistemas que empregam intensivamente tais tecnologias são comumente denominados de *ITS*, do inglês *Intelligent Transportation Systems* (ITS, 2001).

A transposição das técnicas de automação veicular para o cenário urbano tem sido menos estudada. Os benefícios de ter-se veículos dirigidos automaticamente (autônomos ou não) pelas vias urbanas são facilmente perceptíveis. Do ponto de vista dos motoristas, dirigir em cidades é uma tarefa árdua, com paradas e arranques frequentes em um ambiente compartilhado com pedestres, bicicletas e veículos lentos de vários tamanhos (carros estacionando, ônibus, caminhões de entrega). Já do ponto de vista do desempenho do sistema viário urbano, existe um grande desperdício de capacidade devido ao método tradicional de resolução de conflitos (paradas e tempos de vermelho de segurança em cruzamentos), implicando

em atrasos de viagem importantes. Além disso, os cruzamentos semaforizados também respondem por boa parte da poluição ambiental, tanto atmosférica como sonora.

Neste artigo, propõe-se o uso de um Controlador Veicular Centralizado (CVC) para resolver os conflitos em cruzamentos. Assume-se que todos os veículos possam ser comandados pelo CVC assim que adentrem um certo perímetro de controle. Fora deste perímetro, os motoristas tem total controle sobre o veículo. O problema de controle consiste em garantir que não haja colisões, ao mesmo tempo em que é minimizado o atraso total dos veículos, respeitados os limites de velocidade e as restrições de aceleração.

A solução implementada em simulador consiste em uma estratégia de controle ótimo baseada em algoritmo *branch and bound*. O cenário simulado corresponde a um cruzamento de duas vias com uma faixa cada. Como resultado, o algoritmo de otimização produz uma tabela de tempos com os instantes em que cada veículo entra no cruzamento. Os tempos são calculados para garantir que (i) dois veículos na mesma via estejam espaçados de, no mínimo, um tempo h_s que corresponde ao *headway* de saturação da via, e que (ii) veículos em movimentos conflitantes estejam espaçados de um tempo h_t , denominado *headway* transversal. Os resultados de simulação mostram o ganho propiciado pelo CVC em termos do au-

mento capacidade do cruzamento estudado.

Inicia-se a discussão com os detalhes do CVC, destacando-se os aspectos de tempo real importantes para uma possível implementação prática. A seguir, a Seção 2 descreve o cenário simulado, com as hipóteses do modelo de tráfego. A Seção 3 apresenta o algoritmo de controle ótimo que produz a tabela de tempos de ingresso no cruzamento de cada veículo. Os resultados de simulação são apresentados na Seção 4, e os comentários finais e questões em aberto são tratados na Seção 5.

2 Formulação do Problema

O problema específico a ser tratado neste artigo é o do cruzamento simples ilustrado na Figura 1. No cruzamento simples existem duas vias, ortogonais entre si. Cada via é composta por uma única pista, sendo portanto de mão única. O cruzamento em questão representa um ponto de gargalo no sistema viário, pois somente pode ser ocupado por um veículo de cada vez, considerando o fluxo nas duas vias.

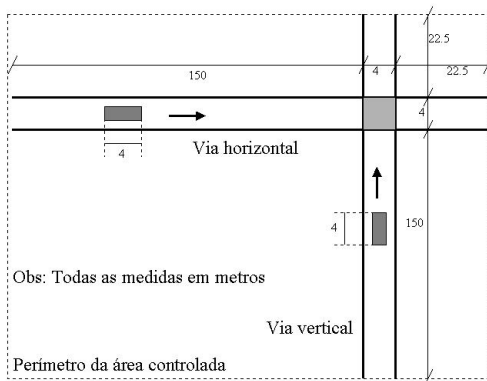


Figura 1. Esquema do cruzamento tratado neste artigo.

Para facilitar a descrição do problema, as vias serão denominadas de “via horizontal” e “via vertical”. Os veículos na via horizontal trafegam da esquerda para a direita. Na via vertical, os veículos trafegam de baixo para cima. Esta forma de visualizar o problema não altera sua essência, mas simplifica a descrição do mesmo. Ela também foi adotada na construção do simulador usado para avaliar o algoritmo de controle proposto.

2.1 Dimensões de interesse

No cenário estudado, cada veículo mede 4 m de comprimento e 2 m de largura. Não existe a possibilidade de ultrapassagem. Os veículos trafegam de forma autônoma até chegarem ao que é definido como o *perímetro de controle* do cruzamento. Dentro do perímetro, os veículos são controlados pelo sistema CVC. Da entrada no perímetro até o início do cruzamento, o veículo deve percorrer 150

m. A largura de ambas as vias é de 4 m. Logo, o cruzamento tem a forma de um quadrado com lados de 4 m. Após o cruzamento existe uma área de escape em cada via com mais 22,5 m. Os veículos permanecem sob controle do CVC até que saiam do perímetro, ou seja, o parachoque dianteiro saia da área de escape. No total, a extensão das vias sob controle do CVC é de 176,5 m (150 m + 4 m + 22,5 m).

O CVC controla a aceleração de cada veículo dentro do perímetro, limitado pelos valores de aceleração mínima de -10 m/s^2 e aceleração máxima de 3 m/s^2 . Os veículos não podem engatar marcha a ré dentro do perímetro e estão sujeitos a uma velocidade máxima permitida de 80 Km/h.

2.2 Distribuição de chegadas de veículos

Os veículos ingressam no perímetro com um intervalo entre chegadas que segue uma distribuição exponencial com média A_h para a via horizontal e A_v para a via vertical. Existe um limite de 2 s entre o ingresso de dois veículos na mesma via. O instante de chegada dos veículos no perímetro é sempre sorteado conforme a distribuição exponencial, mas o ingresso efetivo do veículo no perímetro pode ser postergado caso o veículo anterior tenha entrado a menos de 2 s (ver Figura 2). Com isto, modela-se o fenômeno do *headway* de saturação h_s que ocorre no sistema viário, consistindo da menor distância temporal que os veículos mantêm entre si. O valor de $h_s = 2 \text{ s}$ é empírico e normalmente usado na literatura.

Logo, um veículo que chegue no perímetro até 2s após o ingresso anterior na mesma via terá sua chegada efetiva postergada até se passarem os 2 s. Mesmo que alguns instantes de chegada efetivos possam ser postergados, a distribuição exponencial é observada ignorando-se esse efeito. Os veículos postergados formam uma fila lógica, que é descarregada com espaçamento de 2 s, simulando-se assim um pelotão de veículos.

2.3 Velocidade de ingresso

A velocidade de ingresso V_i de um veículo é definida como a sua velocidade instantânea no momento que ele ingressa no perímetro controlado. O seu valor é definido para cada veículo individualmente e depende de uma série de fatores. A princípio, escolhe-se a velocidade de ingresso ideal V_{ii} a velocidade de cruzeiro típica da via em questão (80 Km/h no cenário estudado).

Entretanto, não é realista supor que os veículos possam, de fato, ingressar sempre com velocidade $V_i = V_{ii}$, pois pelotões formados no interior do perímetro do CVC podem trafegar a velocidades menores. Assim, por razões de segurança, os motoristas fora do perímetro atuam para garantir que possam frear sem colidir com

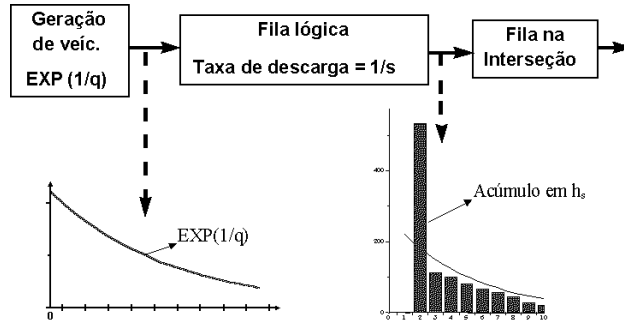


Figura 2. Distribuição exponencial modificada de geração das chegadas.

o veículo imediatamente a sua frente *caso este freie bruscamente*, isto é, use a aceleração mínima definida para o cenário simulado.

Assim, seja V_{ir} a velocidade de ingresso reduzida que o veículo deve ter ao ingressar no perímetro para que ele demore 2 s até seu pára-choque dianteiro chegar a 0,5 m de distância do pára-choque traseiro do veículo imediatamente a sua frente, chamada de distância de segurança. Neste cálculo é suposto que o veículo a frente vai sofrer uma desaceleração máxima a partir do instante que o novo veículo ingressar no perímetro. Caso não exista outro veículo dentro do perímetro na via em questão, V_{ir} é infinita por definição. Se o pára-choque traseiro do veículo a sua frente estiver a menos de 0,5 m do ponto de ingresso dos veículos, pode ser impossível satisfazer a condição descrita antes, e V_{ir} é zero por definição, caracterizando um congestionamento das vias de tráfego. Caso $V_{ir} \leq 0,1$ m/s, a via é considerada lotada e o ingresso seguinte é postergado até que V_{ir} seja maior que 0,1 m/s.

Uma vez que V_{ir} é maior que 0,1 m/s, o ingresso do veículo no perímetro acontece e sua velocidade de ingresso V_i é dada por

$$V_i = \min\{V_{ir}, V_{ii}\},$$

isto é, a menor entre a velocidade de ingresso reduzida e a velocidade de ingresso ideal.

É importante observar que, em função de congestionamentos, a taxa de ingresso de veículos no perímetro controlado pode ser menor do que o fluxo médio definido para a via. Neste caso, a fila lógica formada imediatamente antes do perímetro controlado pode ser transitória ou crescer infinitamente, dependendo dos fluxos selecionados e do algoritmo de controle usado para o cruzamento.

2.4 Comando das acelerações pelo CVC

A aceleração autônoma do veículo no instante que ele ingressa no perímetro controlado é definida a partir da velocidade de ingresso V_i . Se a velocidade de ingresso é a velocidade de ingresso reduzida V_{ir} , então a aceleração é a mínima possível, isto é, desaceleração máxima. Essa situação está

associada com a desaceleração necessária quando o veículo encontra o cruzamento com trânsito mais lento. Caso V_i seja a velocidade de ingresso ideal V_{ii} , então a via é considerada livre, e o veículo ingressa em velocidade de cruzeiro. Assim, o veículo ingressa com aceleração zero no perímetro do CVC. A aceleração autônoma permanece em vigor até que o controlador central envie um outro comando para o veículo em questão.

No sistema de trânsito descrito existe a possibilidade de 3 tipos de colisões. Um veículo pode colidir na traseira do veículo da frente, podendo isto ocorrer tanto na via horizontal quanto na via vertical (colisão longitudinal). Também é possível que dois veículos colidam dentro do cruzamento (colisão transversal). A colisão transversal acontece quando dois veículos, um de cada via, encontram-se dentro do cruzamento ao mesmo tempo, ainda que parcialmente. Esta definição de colisão transversal é mais ampla do que uma colisão física, pois como a largura dos veículos é 2m e a largura das duas vias 4m, é possível que dois veículos estejam por um breve instante dentro do cruzamento sem se tocarem. O conceito de colisão foi ampliado para estabelecer uma margem de segurança no sistema e simplificar a simulação.

O objetivo de controle a ser alcançado pelo CVC é maximizar o fluxo de veículos no cruzamento, ao mesmo tempo que torna impossível a ocorrência de colisões.

3 Algoritmo de Otimização

Considerando o cenário descrito na Seção 2, foi desenvolvido um algoritmo de controle, utilizando a idéia de cruzamento inteligente, que tem como objetivos:

- permitir que os carros passem pelo cruzamento evitando colisões e dando segurança ao motorista no momento que ele retoma o controle do veículo;
- garantir que os carros percam o menor tempo possível no cruzamento, maximizando assim a capacidade deste.

O algoritmo utiliza os dados que recebe dos carros (posição, velocidade) e calcula o melhor momento para que cada um chegue ao cruzamento a fim de evitar colisões e devolver o controle do carro ao motorista numa situação segura. Para calcular a melhor solução do problema o algoritmo utiliza o conceito de *branch and bound* (Pinedo, 1995) para encontrar aquela de menor custo. Como o algoritmo visa o maior fluxo possível de carros no cruzamento, é imposta uma restrição de velocidade no cruzamento igual à velocidade máxima de tráfego na via.

3.1 Caracterização das Filas

Os carros que se encontram no perímetro de controle são diferenciados pelo algoritmo como duas filas distintas de veículos. Cada fila é ordenada de acordo com a posição do veículo na via e essa ordem é mantida durante todo o tempo que os veículos se encontram sob controle do cruzamento. Associa-se também a cada carro dois valores que representam o menor tempo (tempo mínimo de chegada) e o tempo máximo para atingir o cruzamento (sendo ainda possível desenvolver sua velocidade máxima ao chegar no cruzamento).

3.2 Resolução de conflitos

Uma vez que todas as informações necessárias sobre as filas foram reunidas o algoritmo busca eventuais conflitos de tempo, situações que representam perigo de colisão ou que o motorista retomará o controle do veículo numa situação desconfortável ou que ameace sua segurança.

Para poder solucionar todos os conflitos possíveis e encontrar a solução com a menor perda de tempo, o algoritmo verifica e soluciona os conflitos de cada veículo individualmente percorrendo as diferentes combinações possíveis até encontrar a solução que cause o menor atraso nos veículos.

O mecanismo *branch and bound* é ilustrado na Fig. 3. O algoritmo busca uma 1ª solução através de uma combinação na ordem das análises individuais de cada veículo. Essa solução encontrada passa ser a base de comparação para futuras buscas. Se na resolução de algum outro conflito o algoritmo já estiver tratando de uma solução pior que a base de comparação, todas as análises subsequentes daquela ordenação não são realizadas. No entanto se ao final de alguma outra combinação for encontrada uma solução melhor então ela substituirá a base.

Os conflitos de cada veículo são caracterizados como sendo ou um conflito longitudinal ou um conflito transversal. Os conflitos longitudinais referem-se a um problema entre as diferenças de tempo de chegada ao cruzamento de veículos que trafegam na mesma via. Os veículos envolvidos no conflito longitudinal são basicamente veículos que possuem tempos de chegada ao cruzamento

muito próximos uns dos outros, caracterizando uma situação desconfortável para o motorista, ou os tempos refletem uma inversão na fila de veículos que não pode ocorrer no problema considerado. A solução desse conflito é alterar o tempo de chegada dos veículos cujas posições na fila sejam menores. O novo tempo de chegada será igual ao tempo atual do carro à sua frente acrescido de um headway de segurança de 2 segundos, suficiente para que o motorista tenha conforto (sensação de segurança) ao retomar o controle do veículo e que não ocorram inversões na ordem da fila.

Os conflitos transversais ocorrem devido a uma diferença de tempo muito pequena entre veículos que trafegam em vias diferentes. Estão caracterizados nesse conflito todos os veículos que entram no cruzamento antes que um carro da outra via tenha saído. Para solucionar esse problema o tempo de chegada do veículo conflitante deve ser igual ao tempo do veículo da outra via (que chega 1o ao cruzamento) acrescido do tempo que esse veículo ocupará a via dado por:

$$h_t = \frac{C + l}{V_{max}}$$

onde C representa o comprimento do carro, l é a largura da via e V_{max} a velocidade máxima permitida na via.

O esquema completo do algoritmo resulta em:

1. Calcular tempos mínimos de chegada
2. Calcular tempos máximos de chegada
3. Busca em árvore
 - 3.1. Busca completa do 1o ramo
 - . 1a solução encontrada = Base
 - 3.2. Procura outras soluções utilizando soluções parciais já encontradas
 - . Em cada nodulo do ramo
 - . Verifica se o carro sendo analisado possui conflito com um carro da mesma fila
 - . Se houver
 - . Calcula novo tempo do carro sendo analisado
 - . Se novo tempo de chegada for maior que tempo máximo
 - . Ir para próximo ramo.
 - . Se a solução calculada até o momento for pior que Base
 - . Descarta busca por aquele ramo
 - . Verifica se possui conflito com um carro na outra fila
 - . Se houver
 - . Calcula novo tempo do carro
 - . Se novo tempo de chegada for maior que tempo máximo
 - . Ir para próximo ramo.
 - . Se a solução calculada até o momento for pior que Base
 - . Descarta busca por aquele ramo
 - . Ao fim de cada ramo
 - . Compara solucao encontrada com Base
 - . Se Base pior que solução encontrada

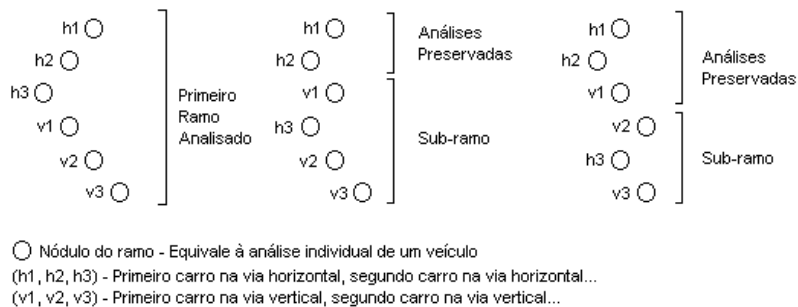


Figura 3. Exemplos de ramos produzidos pelo algoritmo.

```

. Base = Nova Solução

. Fim da busca em todos os ramos

. Fim da busca em arvore

4. Para todos os carros:
. Se sofreu alteração no tempo de
  chegada
. Nova aceleração = aceleração mínima
  do veículo
. Senão
. Nova aceleração = aceleração máxima
  do veículo

Fim

```

4 Resultados de Simulação

4.1 Simulador utilizado

Foi construído um simulador específico para o problema tratado neste artigo. Este simulador opera em tempo real e permite a visualização do cruzamento, além da coleta dos dados relevantes.

Nas experiências realizadas, o controlador executa um ciclo de controle a cada 200 ms (período de amostragem). Em cada ciclo, o CVC primeiramente obtém as posições e velocidades correntes de todos os veículos dentro do perímetro controlado. Em seguida, o algoritmo de otimização calcula as novas acelerações de todos os veículos. Finalmente, o CVC envia para cada veículo sua nova aceleração.

O simulador não cria um cenário ideal, mas inclui algumas limitações que seriam encontradas na implementação do sistema. Por exemplo, a instrumentação opera em ciclos de 50ms. Logo, o algoritmo do CVC opera sobre dados aproximados. Foram utilizadas margens de segurança no algoritmo para compensar a imprecisão decorrente da falta de instantaneidade da instrumentação.

4.2 Simulações efetuadas

Dois casos foram simulados para permitir analisar a capacidade do cruzamento sob atuação do CVC. A Tabela 1 apresenta os resultados para um fluxo

Tabela 1. Resultados de simulação, duração 10 horas.

	Via		Total
	Horizontal	Vertical	
Fluxo de Entrada Requisitado	1800 vph	1800 vph	3600 vph
Fluxo de Entrada Efetivo	1792 vph	1797 vph	3589 vph
Fluxo de Saída	1655 vph	1658 vph	3313 vph
Fluxo Retido	137 vph	139 vph	276 vph

médio de chegadas ao cruzamento igual à capacidade de cada via individual, tomada como sendo de 1800 veículos por hora. A simulação foi executada por um tempo de aproximadamente 10 horas de duração.

Apesar de haver sido especificada uma média de chegadas de 1800 vph, a distribuição exponencial modificada tem o efeito de “reter” alguns veículos, tendo sido gerados de fato 11 veículos a menos que os 3600 desejados. Destes, 276 veículos por hora ficam sem poder ingressar no perímetro do cruzamento devido a engarrafamentos formados. Teoricamente, isto não deveria acontecer, pois o *headway* longitudinal de 2 segundos na entrada do perímetro permite que os veículos cruzem a interseção com um *headway* transversal de 1 segundo, o que daria vazão a todos os veículos.

O comportamento ocorre pois o algoritmo do CVC usa apenas dois comandos de aceleração: frenagem máxima (aceleração mínima) e aceleração máxima. Durante um ciclo de controle (250 ms), a aceleração dos veículos não muda, e isto pode produzir uma frenagem desnecessariamente elevada; um melhor desempenho seria obtido através (i) de um período de controle menor ou (ii) de um cálculo exato do valor da desaceleração suficiente para retardar o veículo do tempo especificado.

Como se observa, a capacidade do cruzamento situou-se em cerca de 3300 vph. Isto representa

Tabela 2. Resultados de simulação, duração 10 horas, fluxo reduzido.

	Via	Via	Total
	Horizontal	Vertical	
Fluxo de Entrada Requisitado	1650 vph	1650 vph	3300 vph
Fluxo de Entrada Efetivo	1639 vph	1642 vph	3281 vph
Fluxo de Saída	1639 vph	1642 vph	3281 vph
Fluxo Retido	0 vph	0 vph	0 vph

cerca de duas vezes a capacidade do caso semaforizado, para o qual tem-se os tempos perdidos de parada e aceleração que levam a capacidade para menos da capacidade individual de cada via. Tal resultado indica os ganhos possíveis do uso de tal tecnologia de controle veicular.

A fim de se aferir a capacidade do cruzamento, foi realizado um ensaio com o fluxo de entrada similar ao fluxo de saída detectado na Tabela 1, de cerca de 3300 vph. Como se observa pelos resultados da Tabela 2, de fato não existem veículos postergados, confirmando o desempenho do controlador.

5 Conclusão e questões em aberto

Foram apresentados resultados de simulação do uso de um algoritmo de controle ótimo para uma interseção de tráfego veicular, cujos veículos podem ser comandados por um controlador central (CVC) sem necessidade de intervenção por parte do motorista.

Os ganhos de capacidade com tal tecnologia são expressivos. Em geral, cruzamentos semaforizados como o estudado apresentam capacidade total cerca de 10% menor do que a capacidade individual de cada via de acesso, devido aos tempos perdidos na frenagem e na aceleração dos veículos. Para o caso atuado pelo CVC, a capacidade situou-se próxima da soma das capacidades individuais (cerca de 3300 vph contra 3800 vph). Conceitualmente, estas deveriam ser idênticas, pois considera-se que o *headway* transversal dos veículos no interior da interseção possa ser igual à metade do *headway* longitudinal de ingresso no perímetro de controle. A diferença observada neste estudo deve-se ao período de amostragem (200 ms), cuja duração dilatada causa uma desaceleração além do necessário em certos veículos, reduzindo a velocidade dos pelotões de veículos formados em situações de grande densidade de tráfego como aquelas simuladas.

Antes de tal tecnologia poder ser aplicada,

é preciso estudar o comportamento do CVC em situações de tráfego misto, ou seja, situações na qual veículos não-controláveis estejam presentes na composição dos fluxos. Este caso será objeto de estudo subsequente.

Referências Bibliográficas

- Gibson, C. H. (1995). *Automated Highway Merging Protocols and their Effectiveness on Highway Operations and Vehicle Performance*, Master Thesis, University of California, Berkeley.
- ITS (2001). Its deployment resources, www.nawgits.com/its_res1.html.
- Jones, W. (2001). Keeping cars away from crashing, *IEEE Spectrum* pp. 40–46.
- PATH (1999). Vehicle platooning and automated highways, www.path.berkeley.edu/PATH/Publications/Media/FactSheet/VPlatooning.pdf.
- Pinedo, M. (1995). *Scheduling Theory, Algorithms, and Systems*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.