

# CONTROLE INTEGRADO DE ACESSO E DO FLUXO PRINCIPAL EM RODOVIAS

**Rodrigo Castelan Carlson**

Centro de Engenharias da Mobilidade e Programa de Pós-graduação em Engenharia de Automação e Sistemas  
Universidade Federal de Santa Catarina

**Ioannis Papamichail**

**Markos Papageorgiou**

Laboratório de Sistemas Dinâmicos e Simulação  
Universidade Técnica de Creta

## RESUMO

O Controle de Acesso (CA) é a técnica mais direta e eficiente para o gerenciamento de tráfego em rodovias. Porém, devido ao comprimento normalmente curto das rampas de entrada, o CA geralmente é desativado para evitar interferência da fila criada na rampa com o tráfego adjacente à rodovia. A integração de CA com Controle do Fluxo Principal (CFP) realizado via Limites de Velocidade Variáveis (LVV) permite manter o controle na rodovia mesmo que a rampa fique cheia. Uma proposta de integração foi realizada pela extensão de uma estrutura de controle realimentado em cascata para o CFP-LVV, por meio de uma estrutura do tipo *split-range*. Considerou-se, entretanto, apenas o caso em que CA e CFP-LVV operam com o mesmo período de controle. Neste artigo, a operação do controlador integrado é revisada considerando períodos de controle diferentes para CA e CFP-LVV. O controlador é avaliado em simulação com um modelo de uma malha viária real e comparado com os resultados de CA e CFP-LVV aplicados individualmente, e demonstra desempenho satisfatório.

## ABSTRACT

Ramp Metering (RM) is the most direct and efficient tool for the freeway traffic flow management. However, because of the usually short length of the on-ramps, RM is typically deactivated to avoid interference of the created ramp queue with adjacent street traffic. By the integration of local RM with Mainstream Traffic Flow Control (MTFC) enabled via Variable Speed Limits (VSL), control operation could be continued even if the on-ramp is full. Integration was performed by the extension of an existing simple local cascade feedback MTFC-VSL controller via a split-range-like scheme assuming the same control period for RM and MTFC-VSL. In this paper, the same structure is revised considering distinct control periods for RM and MTFC-VSL. The controller is evaluated in simulation with the model of a real infrastructure and compared to stand-alone RM or MTFC-VSL, and exhibits a satisfactory performance.

## 1. INTRODUÇÃO

O congestionamento de tráfego veicular em rodovias é um problema sério e crescente da sociedade moderna. Os congestionamentos reduzem a capacidade nominal da rodovia (Papageorgiou e Kotsialos, 2002), e afetam negativamente os tempos de viagem, a segurança no tráfego, o consumo de combustível e o meio ambiente.

Entre as várias medidas de gerenciamento de tráfego que já foram propostas para reduzir os congestionamentos em rodovias, o Controle de Acesso (CA) em rampas de entrada é a técnica mais direta e eficiente. Porém, uma vez que o espaço para a fila de veículos em uma rampa de entrada é limitado, o CA costuma ser desligado quando a fila tiver ocupado toda a extensão da rampa, de maneira a não interferir no tráfego da infraestrutura viária adjacente à rodovia. Assim, o CA pode postergar a formação do congestionamento, acelerar a sua dissolução e reduzir a sua extensão, mas pode permanecer desativado pela maior parte do período de pico em virtude de rampas cheias (Papamichail *et al.*, 2010).

Para superar esta limitação, a integração de diferentes medidas de controle de tráfego com CA foi estudada no passado, por exemplo, CA integrado com *Route Guidance* (Kotsialos *et al.*, 2002; Karimi *et al.*, 2004), ou CA integrado com Limites de Velocidade Variáveis (LVV) (Hegyi *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2006; Carlson *et al.*, 2010). Porém, a maioria destas estratégias foi baseada em métodos sofisticados que podem apresentar dificuldades de

implementação em campo, ou então os resultados de simulação não foram satisfatórios. Outra proposta de integração de CA e LVV, chamada SPECIALIST-RM (Schelling *et al.*, 2011), considera o caso particular de congestionamentos que não são fixos ao gargalo.

Carlson *et al.* (2012a) propôs a integração de CA e de Controle do Fluxo Principal (CFP) via LVV por meio de uma estrutura de controle realimentado do tipo *split-range* (Stephanopoulos, 1984). Embora a simplicidade da estrutura proposta e os resultados de simulação tenham indicado que a estratégia de controle integrado pode ser adequada para aplicação em campo, foi considerado apenas o caso em que os períodos de controle de CA e de CFP-LVV são iguais. No entanto, o período de controle em aplicações de CA costuma ser menor do que o usado em aplicações com LVV. Quando períodos de controle diferentes são usados, cuidados adicionais devem ser tomados na integração das duas técnicas.

Neste trabalho, a proposta de integração de Carlson *et al.* (2012a) é revisada para permitir períodos de controle diferentes para CA e CFP-LVV. Adicionalmente, as simulações usando um simulador de tráfego macroscópico de segunda ordem são realizadas para um modelo de uma malha viária real, em contraste com o trabalho de Carlson *et al.* (2012a) em que foi usado um modelo de uma malha viária hipotética. Os resultados da estratégia de controle integrado são comparados com CA e CFP-LVV aplicados individualmente.

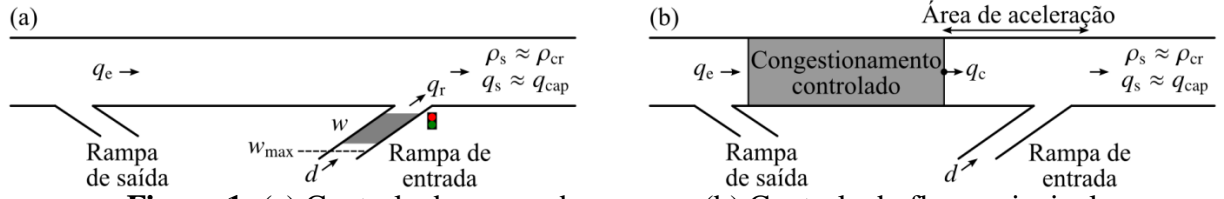
Na próxima seção, os conceitos de gerenciamento de tráfego rodoviário envolvendo CA e CFP são revisados. A Seção 3 apresenta uma revisão das estratégias de controle realimentado empregadas neste artigo e introduz as considerações necessárias para a operação do controle integrado com períodos de controle diferentes para CA e CFP-LVV. O controlador integrado é testado em simulação na Seção 4. Finalmente, a Seção 5 conclui o artigo.

## 2. GERENCIAMENTO DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO

Esta seção descreve duas técnicas de gerenciamento de tráfego rodoviário, controle de acesso (Papageorgiou e Kotsialos, 2002) e controle do fluxo principal (Carlson *et al.*, 2010), bem com sua integração (Carlson *et al.*, 2012a). Essas técnicas são usadas para melhorar as condições de tráfego em rodovias, evitando a queda de capacidade no gargalo e o bloqueio de rampas de saída a montante do gargalo, e a consequente redução no escoamento do tráfego.

### 2.1. Controle de acesso

O controle de acesso (CA) (Papageorgiou e Kotsialos, 2002), mostrado na Figura 1(a), é útil quando a demanda  $d$  (veíc/h) que chega pela rampa de entrada e o fluxo  $q_e$  (veíc/h) que chega pela via principal excedem a capacidade da rodovia a jusante da rampa, configurando um gargalo. Neste caso, ocorreria uma queda de capacidade que poderia ser evitada com CA. O CA consiste em restringir a entrada de veículos na rodovia pela rampa estipulando um fluxo de entrada  $q_r$  (veíc/h) por meio de semáforos (Papageorgiou e Papamichail, 2008), de maneira a manter o fluxo de saída  $q_s$  (veíc/h) próximo à capacidade  $q_{cap}$  (veíc/h). Quando o fluxo no gargalo é máximo, a densidade  $\rho_s$  (veíc/km/faixa) do gargalo fica próxima à densidade crítica  $\rho_{cr}$  (veíc/km/faixa), à qual também corresponde uma velocidade crítica  $v_{cr}$  (km/h). Como CA evita a formação do congestionamento no gargalo, o bloqueio de rampas de saída a montante do gargalo também é evitado. Por outro lado, CA gera uma fila  $w$  (veíc) na rampa de entrada. Como o espaço da rampa de entrada é limitado pelo seu comprimento, geralmente alguma técnica de gerenciamento de fila é utilizada para evitar que a fila exceda um valor máximo  $w_{max}$  (veíc) e interfira com o tráfego da infraestrutura viária adjacente.



**Figura 1:** (a) Controle de rampa de acesso e (b) Controle do fluxo principal

## 2.2. Controle do fluxo principal

A ideia básica de controle do fluxo principal (CFP) (Carlson *et al.*, 2010) (Figura 1(b)) é regular o fluxo  $q_e$  que chega pela via principal suficientemente a montante de gargalos, formando um congestionamento controlado com fluxo de saída  $q_c$  (veíc/h). Cria-se assim uma área de aceleração entre o local onde o fluxo é regulado e a área do gargalo. Isto permite que os veículos que deixam o congestionamento controlado acelerem e cruzem a área do gargalo com a velocidade crítica  $v_{cr}$  (na qual o fluxo é máximo), de maneira tal que a queda de capacidade é evitada. O fluxo controlado  $q_c$  é definido para que  $q_s$  seja igual à capacidade do gargalo  $q_{cap}$ , independente do valor de demanda  $d$  que chega pela rampa (ou mesmo na ausência de rampa quando se trata de outro tipo de gargalo). Notar também que, como o fluxo que deixa o congestionamento é maior no caso com CFP do que no caso sem controle, pois a queda de capacidade foi evitada, o congestionamento controlado criado por CFP é espacial e temporalmente menor. Neste artigo, LVVs são utilizados como atuador de CFP para impor o fluxo controlado  $q_c$  na via principal. Para maiores detalhes, veja (Carlson *et al.*, 2011).

## 2.3. Controle integrado

No caso de controle integrado de CA e CFP, a ideia é especificar uma combinação dos valores dos fluxos  $q_c$  na via principal e  $q_r$  na rampa de entrada de maneira a manter o fluxo  $q_s$  próximo à capacidade do gargalo  $q_{cap}$ . A vantagem da integração é a possibilidade de manter o controle em operação mesmo que determinada restrição de uma das técnicas tenha sido atingida. Por exemplo, é possível que CFP continue controlando mesmo que a fila na rampa tenha atingido o limite máximo. A disponibilidade de determinação de dois fluxos de entrada,  $q_c$  e  $q_r$ , permite ainda que a distribuição desses fluxos seja feita de acordo com algum critério estabelecido como, por exemplo, balanceamento dos tempos de espera em fila na rampa e na via principal ou balanceamento dos tamanhos de fila (Papamichail e Papageorgiou, 2011)

## 3. CONTROLE REALIMENTADO DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO

Esta seção delinea três estratégias de controle realimentado de tráfego rodoviário que são usadas nas simulações da Seção 4, uma para CA, uma para CFP-LVV, e uma que faz integração das duas técnicas. Ao final, são apresentadas as considerações para a adoção de períodos de controle diferentes para CA e para CFP-LVV no caso integrado.

### 3.1. PI-ALINEA e gerenciamento de fila

PI-ALINEA (Wang e Papageorgiou, 2006) é uma estratégia de CA realimentado que corresponde a uma estrutura de controle do tipo Proporcional-Integral (PI). PI-ALINEA ordena fluxos de entrada na rodovia pela rampa de entrada baseada nas medidas de densidade do gargalo  $\rho_s$  (veíc/km/faixa), como segue:

$$\bar{q}_r(k) = \bar{q}_r(k-1) + (\bar{K}_P + \bar{K}_I)e_p(k) - \bar{K}_P e_p(k-1) \quad (1)$$

em que  $\bar{q}_r(k) \in [q_{r,min}, q_{r,max}]$  (veíc/h) é o fluxo de entrada calculado que prevalecerá no intervalo  $(kT_{CA}, (k+1)T_{CA}]$ , com  $T_{CA}$  (h) o período de controle e o argumento  $k$  denota as variáveis no tempo  $kT_{CA}$ ;  $\bar{K}_I$  e  $\bar{K}_P$  são os ganhos integral e proporcional, respectivamente; e

$e_p(k) = \hat{\rho}_s - \rho_s(k)$  é o erro de controle da densidade com  $\hat{\rho}_s$  (veíc/km/faixa), a referência, normalmente escolhida próxima à densidade crítica  $\rho_{cr}$ , na qual  $q_s$  é máximo.

Quando o espaço da rampa é limitado, é necessário controlar o comprimento da fila na rampa de maneira a mantê-la dentro do limite estipulado. Gerenciamento de fila opera em conjunto com CA sobrescrevendo o fluxo de entrada na rodovia ordenado por CA, quando necessário, para evitar filas longas nas rampas. Um controlador do tipo Proporcional (P) com pré-alimentação da demanda  $d$  da rampa pode ser usado (Smaragdis e Papageorgiou, 2003):

$$\tilde{q}_r(k) = -\frac{1}{T_{CA}}[\hat{w} - w(k-1)] + d(k-1) \quad (2)$$

em que  $\tilde{q}_r(k) \in [0, q_{r,max}]$  (veíc/h) é o fluxo de entrada ordenado pelo gerenciamento de fila,  $w(k)$  é o comprimento da fila na rampa, e  $\hat{w} \leq w_{max}$  é a fila máxima admissível (referência). O fluxo final ordenado que entra na rodovia pela rampa será  $q_r(k) = \max\{\tilde{q}_r(k), \tilde{q}_r(k)\}$ . Um controlador do tipo PI também pode ser usado (Xiaotian e Horowitz, 2005).

### 3.2. CFP-LVV realimentado

O problema de controle é regular a densidade do tráfego  $\rho_s$  por meio de mudanças em tempo real do fluxo principal  $q_c$  realizado via LVV, em que a razão LVV  $b$  é a entrada de controle e a densidade de tráfego  $\rho_s$  é a saída de controle. A razão LVV  $b \in [b_{min}, 1, 0]$  é igual ao LVV exibido, dividido pelo limite de velocidade legal usado na ausência de LVV.

A Figura 2(a) apresenta a estrutura em cascata do controlador CFP realimentado projetado por Carlson *et al.* (2011) em que  $\alpha, \beta, \tau > 0$ ,  $K' > 0$  e  $K > 0$  são parâmetros do modelo de projeto, e  $0 < \beta < \alpha \leq 1$ ;  $z$  a variável complexa de tempo discreto. Na Figura 2(a), a malha secundária é afetada pela razão LVV  $b$  fornecida pelo controlador secundário que determina o fluxo controlado  $q_c$  da Figura 1(b). Este fluxo é medido a jusante da área de aplicação de LVV (área controlada) e é realimentado e comparado com o fluxo desejado  $\hat{q}_c$  (veíc/h) fornecido pelo controlador primário e que, por sua vez, serve de referência para o controlador secundário. A malha primária usa a densidade  $\rho_s$  medida na região do gargalo.

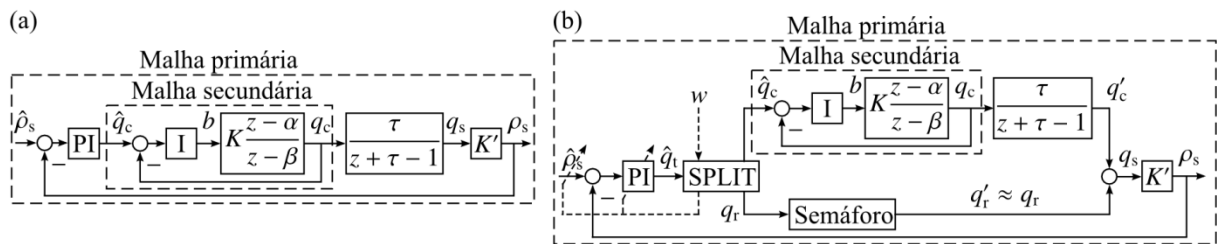
O controlador secundário da Figura 2(a), foi projetado como um controle do tipo integral (I):

$$b(k) = b(k-1) + K_I e_q(k), \quad (3)$$

em que  $K_I$  é o ganho integral do controlador e  $e_q(k) = \hat{q}_c(k) - q_c(k)$  é o erro de fluxo, enquanto o argumento  $k$  denota as variáveis no tempo  $kT_{CFP}$ , com  $T_{CFP}$  (h) o período de controle. O controlador da malha primária é um controlador proporcional-integral (PI):

$$\hat{q}_c(k) = \hat{q}_c(k-1) + (K'_p + K'_I)e_p(k) - K'_p e_p(k-1) \quad (4)$$

em que  $K'_p$  e  $K'_I$  são os ganhos integral e proporcional do controlador, respectivamente, e  $e_p(k) = \hat{\rho}_s - \rho_s(k)$  é o erro de densidade. Para mais detalhes sobre o projeto, ajuste dos ganhos e operação do controlador em cascata veja (Carlson *et al.*, 2011).



**Figura 2:** (a) CFP-LVV realimentado e (b) controle integrado realimentado

### 3.3. Controle integrado

Inicialmente é apresentada a estrutura do controle integrado proposta por Carlson *et al.* (2012a) e a seguir são feitas as considerações para o caso em os períodos de controle de CA e de CFP-LVV são diferentes.

#### 3.3.1 Estrutura de controle

A exemplo das duas abordagens anteriores para CA e para CFP-LVV, deseja-se manter a densidade  $\rho_s$  na área do gargalo próxima à densidade crítica  $\rho_{cr}$  para que o fluxo  $q_s$  seja máximo. Como agora há dois fluxos de entrada ( $q_c$  e  $q_r$ ) para controlar a densidade do gargalo, há um grau de liberdade adicional que pode ser usado para aplicar um critério desejado para distribuição dos fluxos. O critério adotado por Carlson *et al.* (2012a) foi aplicar CA enquanto o espaço de armazenamento da rampa não estiver todo ocupado, e mudar para CFP apenas quando o gerenciamento de fila for ativado. Esse critério foi implementado estendendo-se a estrutura de controle em cascata da Figura 2(a) por meio de uma estrutura de controle do tipo *split-range* (Stephanopoulos, 1984), como ilustrado na Figura 2(b).

Na Figura 2(b), o controlador PI da malha externa fornece o fluxo de referência  $\hat{q}_t$  (veíc/h), isto é, o fluxo total de entrada desejado no gargalo:

$$\hat{q}_t(k) = \hat{q}_t(k-1) + (\hat{K}_P + \hat{K}_I)e_p(k) - \hat{K}_P e_p(k-1) \quad (5)$$

em que  $\hat{K}_P$  e  $\hat{K}_I$  são os ganhos integral e proporcional do controlador, respectivamente. O argumento  $k$  denota as variáveis no tempo  $kT_c$ , com  $T_c$  (h) o período de controle. O fluxo total  $\hat{q}_t$  é dividido entre o fluxo desejado pela via principal  $\hat{q}_c$ , que é fornecido pela malha interna (como na Figura 2(a)) e implementado por LVV, e o fluxo desejado pela rampa  $q_r$ , que é implementado diretamente por semáforos, para produzirem os respectivos fluxos  $q'_c$  e  $q'_r$  que de fato chegam ao gargalo. O controlador I da Figura 2(b) é dado por (3).

A operação do bloco de *split* é relativamente simples. Qualquer alteração de  $\hat{q}_t$  ordenada pelo controlador primário é passada para  $q_r$ , exceto se uma de duas restrições aplicar: i) o limite inferior da rampa  $q_{r,min}$  foi atingido, ou ii) o gerenciamento de fila ordena um valor mais alto que o ordenado por CA, de tal maneira que o valor final ordenado para a rampa  $q_r$  será igual a  $\tilde{q}_r$  (ver Seção 3.1). Em qualquer um dos dois casos, qualquer mudança de fluxo ordenada será transmitida a  $\hat{q}_c$ . Ou seja, se  $q_{cap}^p$  é a capacidade da via principal e  $q_{cap}^r$  é a capacidade da rampa de entrada, tem-se  $\hat{q}_t \leq q_{cap}^p + q_{cap}^r$  por definição, e

$$q_r = \begin{cases} \hat{q}_t - q_{cap}^p & \text{se } \hat{q}_t - q_{cap}^p \geq \max(q_{r,min}, \tilde{q}_r) \\ \max(q_{r,min}, \tilde{q}_r) & \text{senão} \end{cases} \quad (6)$$

$$\hat{q}_c = \begin{cases} q_{cap}^p & \text{se } \hat{q}_t - q_{cap}^p \geq \max(q_{r,min}, \tilde{q}_r) \\ \hat{q}_t - \max(q_{r,min}, \tilde{q}_r) & \text{senão} \end{cases} \quad (7)$$

Em essência, o controlador opera como PI-ALINEA (CA) até que uma das duas restrições se aplique, quando então começa a operar como CFP-LVV e o termo  $\max(q_{r,min}, \tilde{q}_r)$  se torna um elemento de pré-alimentação que afeta a saída do controlador primário. Assim, os ganhos de operação do controlador  $\hat{K}_P$  e  $\hat{K}_I$  devem ser modificados baseados na decisão de divisão, isto é,  $\bar{K}_I$  e  $\bar{K}_P$  (ganhos do PI-ALINEA) são usados se a primeira condição em (6) e (7) é válida, caso contrário  $K'_I$  e  $K'_P$  (ganhos de CFP-LVV) são usados. Semelhantemente, a referência  $\hat{\rho}_s$  do controlador primário deve ser modificada de acordo, uma vez que o valor de LVV aplicado nas áreas de aceleração e do gargalo no caso de CFP-LVV deslocam a densidade crítica para valores mais altos (Carlson *et al.*, 2012b).

### 3.3.2 Períodos de amostragem distintos

A operação do controle integrado baseado em (5), (6) e (7) pode ser realizada imediatamente se os períodos de controle utilizados para CA,  $T_{CA}$ , e para CFP-LVV,  $T_{CFP}$ , forem iguais como em (Carlson *et al.*, 2012a). Entretanto, Carlson *et al.* (2011) sugere  $T_{CFP} = 60$  s, enquanto Papageorgiou e Papamichail (2008) sugerem  $T_{CA} \leq 60$  s, sendo preferível a adoção de valores menores para  $T_{CA}$ .

Quando  $T_{CA} \neq T_{CFP}$ , cuidados adicionais devem ser tomados pois: i) a rigor os valores de  $\hat{K}_p$  e  $\hat{K}_I$  são dependentes do período de controle  $T_c$  usado; e ii) a equação (5) depende de valores anteriores do erro de densidade  $e_\rho$  e da ação de controle  $\hat{q}_t$  que podem não estar disponíveis para o novo período de controle. Estes aspectos são detalhados a seguir.

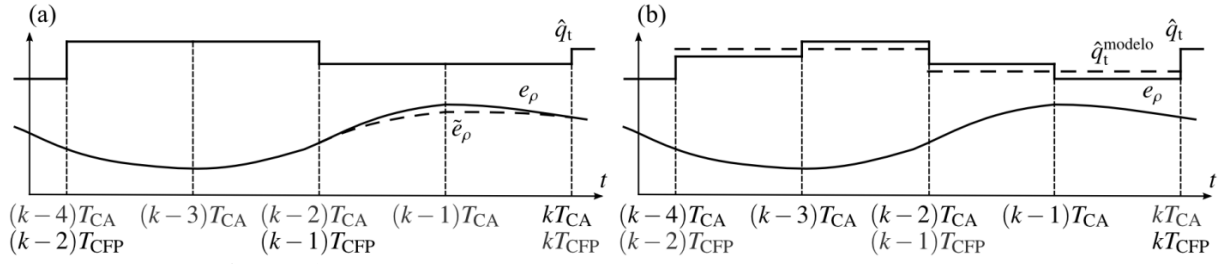
O tratamento para o problema de mudança do período de controle adotado neste trabalho, baseia-se na abordagem descrita por Fadali e Visioli (2013) e originalmente proposta por Albertos *et al.* (2003). Considera-se aqui o caso em que  $T_{CFP} = 2T_{CA}$ , mas procedimento semelhante pode ser seguido para outros múltiplos de  $T_{CA}$  (Albertos *et al.*, 2003).

Com respeito ao aspecto (i), os ganhos do controlador podem ser definidos como função do período de controle  $T_c$  e serem recalculados toda vez que o período de controle mudar. Para o caso do controlador integrado, a própria dinâmica do sistema controlado muda, e os valores de ganho e os períodos de controle para CA e CFP-LVV já estão definidos. Assim, basta alterar diretamente os ganhos como proposto na Seção 3.3.1, sem a necessidade de cálculos.

Com respeito ao aspecto (ii), considera-se separadamente o caso em que o período de controle diminui, isto é, muda-se de  $T_{CFP}$  para  $T_{CA}$ , e o caso em que o período de controle aumenta, ou seja, muda-se de  $T_{CA}$  para  $T_{CFP}$ .

A Figura 3(a) mostra o caso em que o período de controle diminui. No eixo do tempo  $t$  são mostrados os instantes de tempo de CFP e os instantes de tempo equivalentes caso CA estivesse operando. A mudança de período de controle acontece no tempo  $kT_{CFP}$ . Na figura, são mostradas as curvas de erro de densidade  $e_\rho$  e de fluxo total ordenado  $\hat{q}_t$ , este último com mudanças a cada  $T_{CFP}$ . Se no instante  $kT_{CFP}$  não houvesse a mudança de período de controle, os valores de  $e_\rho(kT_{CFP})$ ,  $e_\rho((k-1)T_{CFP})$  e de  $\hat{q}_t((k-1)T_{CFP})$  seriam usados para o cálculo de  $\hat{q}_t(kT_{CFP})$ . Como ocorre a mudança no período de controle, os valores de  $e_\rho(kT_{CA})$ ,  $e_\rho((k-1)T_{CA})$  e de  $\hat{q}_t((k-1)T_{CA})$  são necessários para o cálculo de  $\hat{q}_t(kT_{CA})$ . Note, porém, que o instante de tempo  $(k-1)$  de CFP não coincide com o instante de tempo  $(k-1)$  de CA, pois os períodos de controle são diferentes, enquanto o instante de tempo  $k$  coincide por definição. Em sistemas de controle com período variável, tipicamente os valores das variáveis envolvidas só são registrados a cada período de controle, pois os períodos de controle são definidos em tempo de execução com o intuito de economizar recursos computacionais.

Como o que se deseja é o cálculo de  $\hat{q}_t(kT_{CA})$ , os valores correspondentes à linha do tempo de CA devem ser usados. Uma vez que  $\hat{q}_t$  permanece constante no intervalo  $((k-2)T_{CA}, kT_{CA}]$  o valor de  $\hat{q}_t((k-1)T_{CA})$  é conhecido e pode ser usado diretamente pois é igual a  $\hat{q}_t((k-1)T_{CFP})$ . Já o valor de  $e_\rho((k-1)T_{CA})$  não é conhecido e precisa ser estimado, por exemplo, por interpolação (Fadali e Visioli, 2013), como esboçado na Figura 3(a) pela linha tracejada, em que  $\tilde{e}_\rho$  é o erro estimado. Como nesta aplicação não há a preocupação com



**Figura 3:** Transição (a) de CFP para CA e (b) de CA para CFP

recursos computacionais, optou-se por registrar  $e_\rho$  a cada  $T_{CA}$ . Assim, no momento da transição,  $e_\rho((k-1)T_{CA})$  pode ser usado diretamente.

A Figura 3(b) mostra o caso análogo em que o período de controle aumenta. No eixo do tempo  $t$  são mostrados os instantes de tempo de CA e os instantes de tempo equivalentes caso CFP estivesse operando. A mudança de período de controle acontece no tempo  $kT_{CA}$ . Na figura, são mostradas as curvas de erro de densidade  $e_\rho$  e de fluxo total ordenado  $\hat{q}_t$ , este último com mudanças a cada  $T_{CA}$ . O que se deseja é o cálculo de  $\hat{q}_t(kT_{CFP})$  e os valores correspondentes à linha do tempo de CFP devem ser usados. Nesse caso,  $\hat{q}_t$  varia durante o intervalo  $((k-1)T_{CFP}, kT_{CFP}]$  e seria necessário conhecer qual o valor constante de  $\hat{q}_t$  neste intervalo que, com base nos dados disponíveis no instante  $(k-1)T_{CFP}$ , levaria o sistema para o estado atual. Este valor pode ser calculado aproximadamente com base no modelo do sistema (Figura 2(b)) (Fadali e Visioli, 2013) e é ilustrado pela linha tracejada na Figura 3(b), em que  $\hat{q}_t^{\text{modelo}}$  é o valor obtido a partir do modelo e das medidas em  $(k-1)T_{CFP}$ . Porém, isto exigiria o conhecimento preciso dos parâmetros do modelo  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\tau$ ,  $K'$  e  $K$  que, nesta aplicação específica, são difíceis de determinar. Para este trabalho, optou-se por seguir-se a abordagem de Pohjola (2009) que usa a média dos valores de  $\hat{q}_t$  no intervalo  $((k-2)T_{CA}, kT_{CA}]$ . Como as medidas de  $e_\rho$  coincidem para CA e CFP a cada  $2T_{CA}$ ,  $e_\rho((k-1)T_{CFP}) = e_\rho((k-2)T_{CA})$  pode ser usado facilmente em (5) (Figura 3(b)).

#### 4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Diversos cenários de controle são examinados a seguir, usando o simulador METANET (Messmer e Papageorgiou, 1990) para os casos sem controle e com controle realimentado (CR), enquanto AMOC (Kotsialos *et al.*, 2002) é utilizado para controle ótimo. Os cenários simulados estão resumidos na Tabela 1. Resultados detalhados de controle ótimo para a mesma malha viária podem ser encontrados em (Papamichail *et al.*, 2010; Carlson *et al.*, 2010, 2012b) e são omitidos, exceto pelos Tempos Totais de Viagem (TTV) que são apresentados como referência para o melhor desempenho alcançável.

**Tabela 1:** Resumo dos cenários simulados

Cenário	Descrição	TTV (veíc.h)	%
Sem controle	-	14163	-
CA-AMOC	Controle de acesso ótimo sem restrição ao tamanho da fila na rampa.	7266	-48,7
CA-CR	Controle de acesso realimentado sem restrição ao tamanho da fila na rampa.	7339	-48,2
CA/F-AMOC	Controle de acesso ótimo com restrição ao tamanho da fila na rampa (200 veíc.).	12062	-14,8
CA/F-CR	Controle de acesso realimentado com restrição ao tamanho da fila na rampa (200 veíc.).	12667	-10,6
CFP-AMOC	Controle do fluxo principal ótimo.	8009	-43,4
CFP-CR	Controle do fluxo principal realimentado.	9513	-32,8
CI-AMOC	Controle integrado ótimo.	7184	-49,3
CI-CR-T	Controle integrado realimentado com o tratamento para transição do período de controle.	7301	-48,4
CI-CR	Controle integrado realimentado sem o tratamento para transição do período de controle.	7405	-47,7

#### 4.1. Anel viário de Amsterdam

Para este estudo, considera-se o sentido anti-horário do anel viário de Amsterdam (A10), ilustrado na Figura 4. Esta rodovia tem cerca de 32 km de extensão, possui 21 rampas de entrada e 20 rampas de saída, incluindo as conexões com as rodovias A1, A2, A4 e A8. A área de inserção de A1 com A10 no arco L107 (rampa OA1) é o principal gargalo desta malha viária. Os parâmetros do modelo foram determinados por validação com dados de campo (Kotsialos *et al.*, 2002), enquanto que os parâmetros referentes aos LVVs foram escolhidos de maneira a não induzir um aumento da capacidade nominal (Carlson *et al.*, 2010).

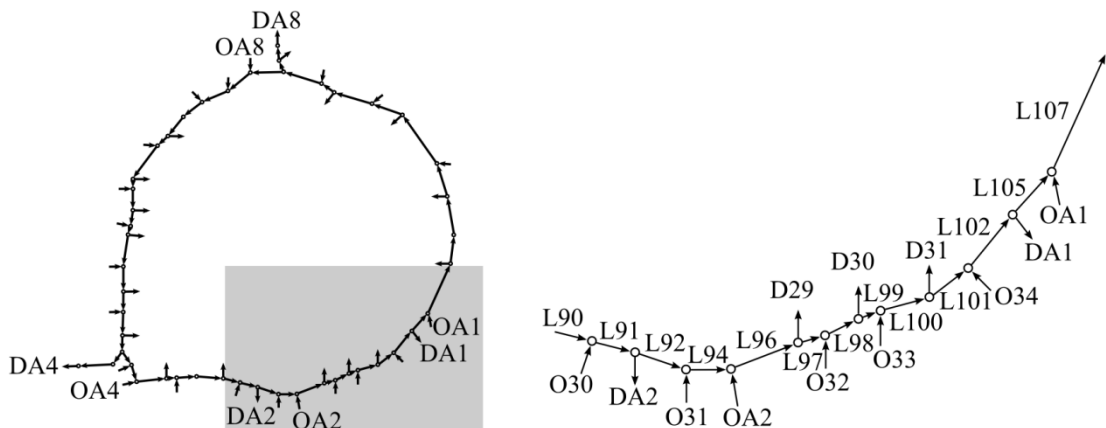
O estudo foi realizado para um horizonte de tempo de 4 h e a demanda utilizada reproduz o horário de pico do período vespertino. A menor razão LVV admissível é  $b_{\min} = 0,2$  e o menor fluxo ordenado por CA na rampa é  $q_{r,\min} = 200$  veíc/h. Os períodos de controle, que determinam a frequência com que os LVV e os fluxos da rampa são atualizados, são  $T_{\text{CFP}} = 60$  s para CFP-LVV e  $T_{\text{CA}} = 30$  s para CA. O passo de simulação é  $T = 10$  s.

#### 4.2. Sem controle

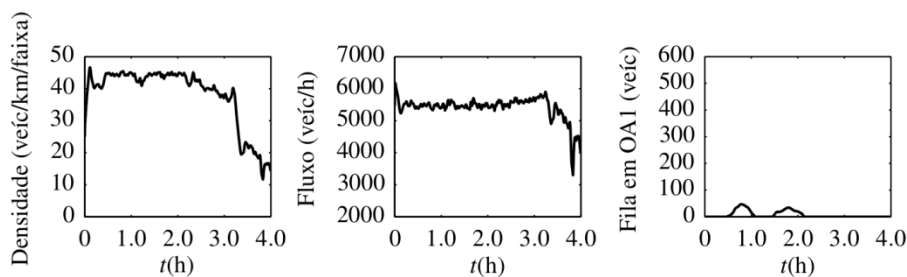
Para o caso em que o anel viário é simulado sem controle, a densidade e o fluxo no gargalo (L107) e a fila na rampa OA1 são mostrados na Figura 5. A demanda excessiva causa congestionamento na área do gargalo logo após o início da simulação e a densidade permanece acima da densidade crítica ( $\rho_{\text{cr}} = 32$  veíc/km/faixa) durante a maior parte da simulação. O congestionamento se propaga a montante, bloqueando diversas rampas de entrada e saída na porção oeste do anel viário, inclusive a importante junção com A4, provocando a redução do escoamento nas rampas de saída e formação de filas nas rampas de entrada (não mostrado). O fluxo na área do gargalo de cerca de 5400 veíc/h (Figura 5), está abaixo da capacidade nominal ( $q_{\text{cap,L107}} \approx 5900$  veíc/h) por causa da queda de capacidade de cerca de 8%. Há pouca formação de fila em OA1. O TTV deste cenário é de 14163 veíc·h. O cenário descrito é muito semelhante às condições reais na rodovia (Kotsialos *et al.*, 2002).

#### 4.3. Controle de rampa de acesso

Para a aplicação de CA, dois casos são considerados de maneira a destacar o efeito do espaço limitado na rampa de entrada. No primeiro caso (CA-CR), não há limite de tamanho para a fila na rampa controlada OA1. No segundo caso (CA/F-CR), o tamanho da fila é limitado e não deve ultrapassar  $\hat{w} = 200$  veíc. Os ganhos para PI-ALINEA são  $\bar{K}_p = 300$  km/h/faixa e  $\bar{K}_l = 120$  km/h/faixa, e a referência é  $\hat{\rho}_s = 32$  veíc/km/faixa.







**Figura 5:** Sem controle

#### 4.3.1 Espaço ilimitado para fila na rampa de entrada

O TTV resultante para CA-CR é 7339 veh·h, o que corresponde a uma melhoria de 48,2% comparado com o caso sem controle e muito próximo do resultado com controle ótimo (CA-AMOC). A densidade e o fluxo no gargalo (L107) e a fila na rampa OA1 são mostrados na Figura 6 pela linha cinza escuro.

A densidade na área do gargalo é mantida próxima à densidade crítica (linha cinza claro no gráfico de densidade), exceto quando a demanda é baixa entre  $t = 0,5$  h e  $t = 1,5$  h. Por consequência, o fluxo na área do gargalo mantém-se próximo à capacidade que leva a uma redução do TTV. Para obter esse resultado, uma fila é criada na rampa de entrada e como não há limite para o tamanho da fila, ela chega a ter quase 600 veículos por volta de  $t = 2,7$  h.

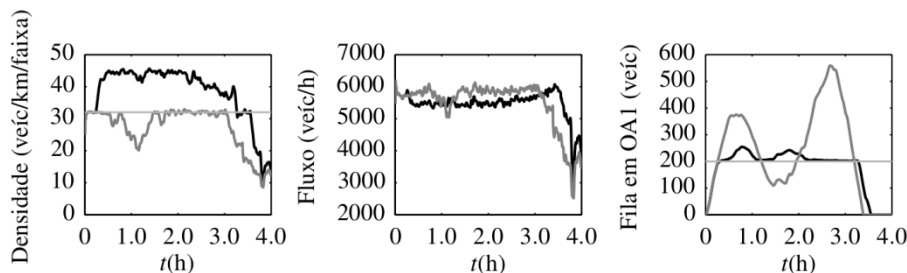
#### 4.3.2 Espaço limitado para fila na rampa de entrada

Para CA/F-CR, o TTV resultante é 12667 veh·h, o que corresponde a uma melhoria de 10,6% comparado com o caso sem controle, mas um pouco pior do que o caso correspondente com controle ótimo. O desempenho é consideravelmente pior do que no caso de fila ilimitada. A densidade e o fluxo no gargalo (L107) e a fila na rampa OA1 são mostrados na Figura 6 pela linha cinza escuro. A linha cinza claro no gráfico de fila corresponde a  $\hat{w}$ .

A situação neste cenário é idêntica ao caso anterior até  $t = 0,2$  h, quando o limite máximo da fila está prestes a ser atingido e o gerenciamento de fila é ativado para manter a fila no limite estipulado. Em consequência disso, a densidade no gargalo não pode ser mantida, em contraste com o caso com fila ilimitada. Assim, forma-se um congestionamento que leva a uma queda de capacidade no gargalo. A fila na rampa se mantém com cerca de 200 veículos, excedendo este valor em alguns momentos em virtude do congestionamento formado.

#### 4.4. Controle do fluxo principal via limites de velocidade variáveis

CFP-LVV usando controle realimentado (CFP-CR) é aplicado como descrito na Seção 3.2. A razão LVV  $b(k)$  fornecida por (3) é aplicada nos arcos L101-L102. Por questões de



**Figura 6:** CA realimentado sem (linha cinza escuro) e com (linha preta) limite de fila

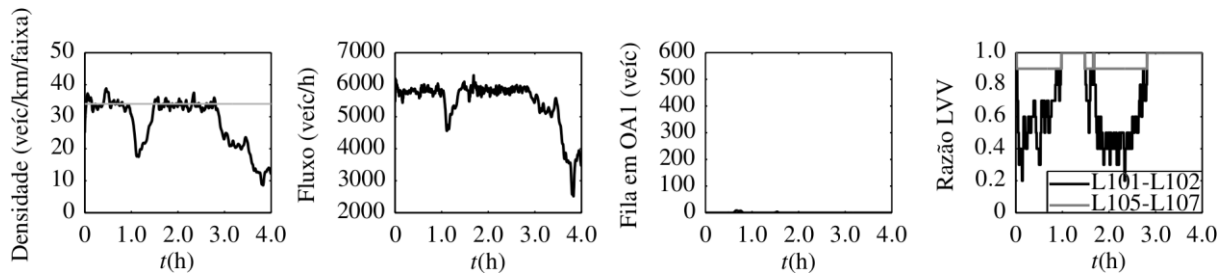
segurança, LVVs adicionais são exibidos a montante da área de aplicação para evitar que veículos que chegam ao congestionamento controlado encontrem bruscas variações de velocidade. Além disso, as razões LVV são discretizadas e a variação das razões LVV é limitada. A razão LVV nas áreas de aceleração e do gargalo (L105-L107) é fixada em 0.9 (Carlson *et al.*, 2011). A medição de densidade é obtida de L107, enquanto que a medição de fluxo é obtida de L105. A densidade crítica na área do gargalo serve de referência para o controlador primário e é  $\hat{\rho}_{out} = 34$  veíc/km/faixa. Os ganhos dos controladores são  $K_I = 0.0015$  h/veíc/faixa para o controlador secundário, e  $K_p' = 38$  km/veíc/faixa e  $K_I' = 9$  km/veíc/faixa para o controlador primário. O TTV resultante é de 9513 veíc·h, o que corresponde a uma melhora de 32,8% quando comparado ao caso sem controle e um pouco pior do que no caso com CFP-AMOC. A densidade e o fluxo no gargalo (L107), a fila na rampa OA1, e as razões LVV em L101-L102 e L105-L107 são mostrados na Figura 7.

Neste cenário, o congestionamento no gargalo, e conseqüentemente a queda de capacidade, são completamente evitados (Figura 7) uma vez que a densidade permanece em torno do valor crítico (referência), marcado pela linha cinza claro no gráfico de densidade. Congestionamentos controlados (não mostrados) são formados a montante do gargalo pelos dois períodos de ações de controle (gráfico de razão LVV) e, sendo menos intensos do que no caso sem controle, têm efeito menos prejudicial no escoamento das rampas de saída e na formação de filas nas rampas de entradas. A diferença de desempenho entre CFP-CR e CFP-AMOC se deve ao bloqueio das rampas de saída a montante do gargalo que são melhor gerenciados com CFP-AMOC, como discutido em (Carlson *et al.*, 2012b). Já no caso de CA o congestionamento no via principal é completamente evitado e não há bloqueio de rampas de saída, o que justifica o melhor desempenho em relação ao CFP.

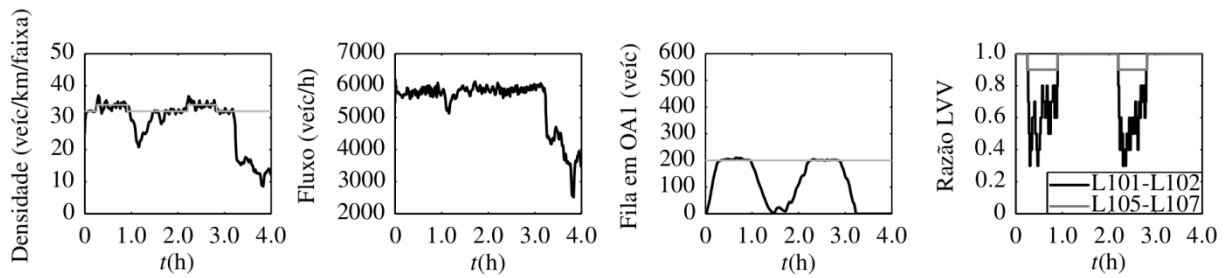
#### 4.5. Controle integrado

Quando CI-CR-T é usado, o TTV resultante é 7301 veh·h, o que corresponde a uma melhora de 48,4% quando comparado com o caso sem controle, e apenas 1% menor do que o caso com CI-AMOC. A densidade e o fluxo no gargalo (L107), a fila na rampa OA1, e as razões LVV em L101-L102 e L105-L107 são mostrados na Figura 8. Os ganhos do controlador e as referências são os mesmos usados nas Seções 4.3 e 4.4, em acordo com a Seção 3.3.

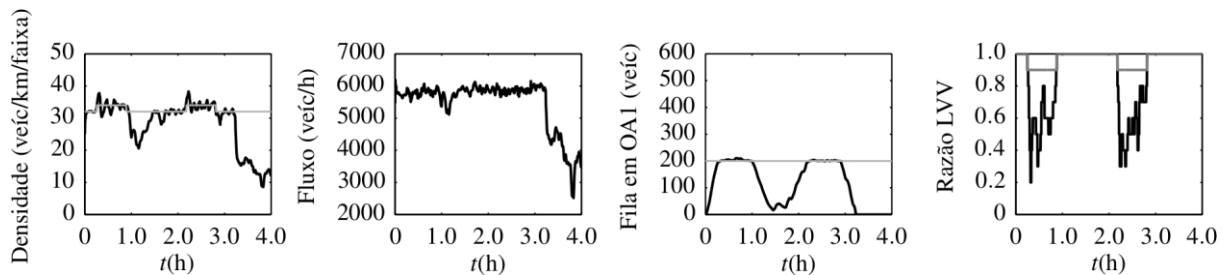
CI-CR-T é capaz de manter a densidade na área do gargalo próxima do valor crítico (linha cinza claro no gráfico de densidade) mesmo com a restrição de 200 veículos na fila da rampa. Por volta de  $t = 0,2$  h, a fila em OA1 atinge o valor de 200 veículos. Em torno desse instante, o gerenciamento de fila sobrescreve CA e o controle integrado começa a operar com CFP-LVV. De fato, LVV é ativado e nota-se uma mudança na referência de 32 para 34 veíc/km/faixa para se adequar à razão LVV de 0,9 nas áreas de aceleração e do gargalo. Quando CFP-LVV não é mais necessário, por volta de  $t = 1,0$  h, a densidade crítica volta a



**Figura 7: CFP-LVV realimentado**



**Figura 8:** Controle integrado realimentado com transição



**Figura 9:** Controle integrado realimentado sem tratamento da transição

32 veic/km/faixa e a fila começa a se dissolver à medida que CA fica menos restritivo. Comportamento semelhante se repete a partir de  $t = 2,0$  h. Como parte do tráfego fica retido na rampa, o esforço necessário de CFP-LVV é muito menor no caso integrado do que quando apenas CFP-LVV é usado (Figura 7).

Para ilustrar a importância dos cuidados apresentados na Seção 3.3.2 para a transição do período de controle entre CFP-LVV e CA, a Figura 9 mostra o resultado caso eles tivessem sido ignorados. Visualmente, o desempenho é muito semelhante. Note, porém, como as transições de CA para CFP-LVV, quando a densidade muda de 32 para 34 sofre muito mais variações no caso sem tratamento da transição. O pior desempenho do caso sem transição também é visível quando a operação muda de CFP-LVV para CA por volta  $t = 2,8$  h.

## 5. CONCLUSÕES

A integração de Controle do Fluxo Principal (CFP) realizado via Limites de Velocidade Variáveis (LVV) com Controle de Acesso (CA) por meio de técnicas de controle realimentado foi revisada para considerar casos em que CFP-LVV e CA possuem períodos de controle diferentes. A avaliação da proposta foi feita por simulação com um modelo de uma malha viária real. O desempenho da estratégia de controle integrado foi comparado com CFP-LVV e CA aplicados individualmente, tanto para estratégias de controle realimentado como de controle ótimo. A estratégia de controle integrado é simples e eficiente. Pesquisa em andamento investiga a possibilidade de aplicação de outros critérios para distribuição de fluxo entre a via principal e a rampa de entrada. Testes em campo são desejáveis.

## Agradecimentos

O primeiro autor agradece à CAPES pela bolsa de pós-doutorado recebida durante a realização de parte deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- Albertos, P.; M. Vallés e A. Valera (2003) Controller Transfer Under Sampling Rate Dynamic Changes. *Proceedings of the European Control Conference*. Cambridge, UK.
- Carlson, R. C.; D. Manolis; I. Papamichail e M. Papageorgiou (2012a) Integrated Ramp Metering and Mainstream Traffic Flow Control on Freeways Using Variable Speed Limits. *Proceedings of the 13th*

- IFAC Symposium on Control in Transportation Systems*. Sofia, Bulgaria, p. 110–115.
- Carlson, R. C.; I. Papamichail e M. Papageorgiou (2012b) Controle do Fluxo Principal em Rodovias Usando Limites de Velocidade Variáveis. *Anais do XXVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*. ANPET, Joinville, Santa Catarina, Brasil.
- Carlson, R. C.; I. Papamichail e M. Papageorgiou (2011) Local Feedback-based Mainstream Traffic Flow Control on Motorways Using Variable Speed Limits. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 12, n. 4, p. 1261–1276.
- Carlson, R. C.; I. Papamichail; M. Papageorgiou e A. Messmer (2010) Optimal Mainstream Traffic Flow Control of Large-scale Motorway Networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 18, n. 2, p. 193–212.
- Fadali, M. S. e A. Visioli (2013) *Digital Control Engineering: Analysis and Design* (2ª ed.). Academic Press, Boston.
- Hegyi, A.; B. De Schutter e H. Hellendoorn (2005) Model Predictive Control for Optimal Coordination of Ramp Metering and Variable Speed Limits. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 13, n. 3, p. 185–209.
- Karimi, A.; A. Hegyi; B. De Schutter; J. Hellendoorn e F. Middelham (2004) Integrated Model Predictive Control of Dynamic Route Guidance Information Systems and Ramp Metering. *The 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. IEEE, Washington, D.C., USA, p. 491–496.
- Kotsialos, A.; M. Papageorgiou; M. Mangeas e H. Haj-Salem (2002) Coordinated and Integrated Control of Motorway Networks via Non-linear Optimal Control. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 10, n. 1, p. 65–84.
- Messmer, A. e M. Papageorgiou (1990) METANET: a Macroscopic Simulation Program for Motorway Networks. *Traffic Engineering and Control*, v. 31, n. 8, p. 466–470.
- Papageorgiou, M. e A. Kotsialos (2002) Freeway Ramp Metering: an Overview. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 3, n. 4, p. 271–281.
- Papageorgiou, M. e I. Papamichail (2008) Overview of Traffic Signal Operation Policies for Ramp Metering. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2047, p. 28–36.
- Papamichail, I.; A. Kotsialos; I. Margonis e M. Papageorgiou (2010) Coordinated Ramp Metering for Freeway Networks – a Model-predictive Hierarchical Control Approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 18, n. 3, p. 311–331.
- Papamichail, I. e M. Papageorgiou (2011) Balancing of Queues or Waiting Times on Metered Dual-Branch On-Ramps. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 12, n. 2, p. 438–452.
- Pohjola, M. (2009) Adaptive Control Speed Based on Network Quality of Service. *17th Mediterranean Conference on Control and Automation*. IEEE, Thessaloniki, Greece, p. 784–789.
- Schelling, I.; A. Hegyi e S. P. Hoogendoorn (2011) SPECIALIST-RM: Integrated Variable Speed Limit Control and Ramp Metering Based on Shock Wave Theory. *Proceedings of the 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. IEEE, Washington, D.C., USA, p. 2154–2159.
- Smaragdis, E. e M. Papageorgiou (2003) Series of New Local Ramp Metering Strategies. *Transportation Research Record*, v. 1856, p. 74–86.
- Stephanopoulos, G. (1984) *Chemical Process Control: an Introduction to Theory and Practice*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs N.J.
- Wang, Y. e M. Papageorgiou (2006) Local Ramp Metering in the Case of Distant Downstream Bottlenecks. *2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*. Toronto, ON, Canada, p. 426–431.
- Xiaotian, S. e R. Horowitz (2005) A localized Switching Ramp-metering Controller with a Queue Length Regulator for Congested Freeways. *Proceedings of the 2005 American Control Conference*. Portland, OR, USA, p. 2141–2146.
- Zhang, J.; H. Chang e P. A. Ioannou (2006) A Simple Roadway Control System for Freeway Traffic. *2006 American Control Conference*. Minneapolis, MN, USA, p. 4900–4905.

---

Rodrigo Castelan Carlson (rodrigo.carlson@ufsc.br)

Centro de Engenharias da Mobilidade e Programa de Pós-graduação em Engenharia de Automação e Sistemas,  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Campus Joinville, 89218-000, Joinville, SC, Brasil

Ioannis Papamichail (ipapa@dssl.tuc.gr)

Markos Papageorgiou (markos@dssl.tuc.gr)

Dynamic Systems and Simulation Laboratory, Department of Production Engineering and Management  
Technical University of Crete, University Campus, 73100, Chania-Crete, Greece