

COMPARAÇÃO DE CONTROLADORES PARA O FLUXO PRINCIPAL EM RODOVIAS COM O USO DE LIMITES DE VELOCIDADE VARIÁVEIS

Rodrigo Castelan Carlson

Ioannis Papamichail

Markos Papageorgiou

Dynamic Systems and Simulation Laboratory
Department of Production Engineering and Management
Technical University of Crete

RESUMO

Propõe-se dois controladores realimentados para o controle do fluxo principal (CFP) em rodovias, realizado via limites de velocidade variáveis (LVV). Ambos os controladores são avaliados e comparados à um controlador CFP realimentado proposto anteriormente e à uma abordagem de controle ótimo. Todos os controladores realimentados usam apenas medições em tempo real de fácil obtenção, são simples e robustos, e levam em consideração restrições práticas e de segurança, sendo portanto adequados para implantações em campo. As avaliações são realizadas por simulação para um trecho hipotético de malha rodoviária com o uso de um modelo de tráfego veicular macroscópico de segunda ordem. Os resultados mostram que os controladores realimentados apresentam um comportamento satisfatório de controle e que se aproximam dos resultados obtidos com a abordagem de controle ótimo. Recomendações para a operação dos controladores são fornecidas.

ABSTRACT

Two simple controllers for feedback mainstream traffic flow control (MTFC) on freeways, enabled via variable speed limits (VSL), are proposed. Both controllers are evaluated and compared to a previously developed MTFC feedback cascade controller and to an optimal control approach. All feedback controllers rely on readily available real-time measurements, are simple and robust, and take into account a number of practical and safety restrictions, therefore being suitable for implementations in the field. The evaluations are conducted for a hypothetical freeway network by use of a validated second-order macroscopic traffic flow model. The results show that the feedback controllers exhibit a satisfactory control behavior and, indeed, approach the optimal control results. Recommendations for the operation of the controllers are given.

1. INTRODUÇÃO

O congestionamento do tráfego veicular é um problema notório da sociedade moderna. A extensão temporal e espacial dos congestionamentos, observados diariamente durante horários de pico nas rodovias, cresce a cada dia. Congestionamentos reduzem a capacidade nominal da infraestrutura rodoviária, com efeitos severos nos tempos de viagem, na segurança no tráfego, no consumo de combustível e na poluição ambiental (Papageorgiou e Kotsialos, 2002).

Controle do fluxo principal (CFP, do inglês *Mainstream Traffic Flow Control - MTFC*) (Carlson *et al.*, 2010b, 2010c), realizado via limites de velocidade variáveis (LVV), foi proposto como uma nova ferramenta para o gerenciamento do tráfego rodoviário. Estratégias similares, porém realizadas via semáforos e baseadas em algoritmos heurísticos, datam dos anos 1960 e 1970 (Greenberg e Daou, 1960; Gazis e Foote, 1969; McCalden Jr., 1984). Outros pesquisadores (Jacobson e Landsman, 1994; Haboian, 1995) propuseram *mainline metering*, mediante o uso de semáforos, mas sem desenvolver a ideia em detalhes técnicos. Trabalhos mais recentes consideraram o uso de LVV com diferentes abordagens de controle e diferentes configurações de aplicação (Hegyi, 2004; Zhang *et al.*, 2006; Popov *et al.*, 2008; Hegyi e Hoogendoorn, 2010). Também recentemente, Carlson *et al.* (2010b, 2010c) demonstraram os benefícios de CFP para evitar a queda da capacidade (*capacity drop*). Devido à praticidade limitada da abordagem de controle ótimo empregada, Carlson *et al.* (2010a, 2011a) projetaram um controlador CFP realimentado em cascata simples e eficaz, realizado via LVV, e que é considerado mais adequado para implantação em campo.

Neste artigo propõe-se outras duas estruturas de controle realimentado baseadas no mesmo conceito de aplicação CFP como a desenvolvida por Carlson *et al.* (2010a, 2011a). Os controladores propostos são demonstrados e avaliados em simulação. Os novos controladores são comparados ao controlador CFP realimentado em cascata existente (Carlson *et al.*, 2010a, 2011a), e tem sua eficiência comparada à uma abordagem de controle ótimo.

Na próxima seção, a degradação da infraestrutura causada por congestionamentos e o conceito CFP são revisados. O simulador METANET e a ferramenta de controle ótimo AMOC utilizados para a avaliação dos controladores também são apresentados. A Seção 3 recapitula o controlador CFP realimentado em cascata projetado por Carlson *et al.* (2010a, 2011a) e apresenta dois projetos alternativos, bem como alguns aspectos práticos relacionados ao uso de LVV. As estratégias de controle são comparadas e avaliadas na Seção 4. Finalmente, a Seção 5 conclui o artigo e traz comentários sobre futuras investigações sobre o assunto.

2. CONGESTIONAMENTO DE TRÁFEGO E CFP

Esta seção recapitula aspectos relevantes de Carlson *et al.* (2010a, 2011a). Os aplicativos METANET (Messmer e Papageorgiou, 1990) e AMOC (Kotsialos *et al.*, 2002) são descritos.

2.1. Degradação da infraestrutura causada por congestionamentos

Um gargalo em uma rodovia é um local onde a capacidade a montante q_{cap}^{up} é maior do que a capacidade a jusante q_{cap}^{down} do local do gargalo (Figura 1(a)). Se o fluxo veicular que chega q_{in} é maior do que q_{cap}^{down} , o gargalo é ativado, ou seja, forma-se um congestionamento. O congestionamento que se forma em um gargalo ativo tem dois efeitos prejudiciais à capacidade da rodovia e ao escoamento do tráfego (Papageorgiou e Kotsialos, 2002):

1. Queda de capacidade (*capacity drop*): um fluxo de saída q_{out} do gargalo ativo que pode ser de 5 a 20% menor do que capacidade nominal q_{cap}^{down} . A causa principal da queda de capacidade é a aceleração dos veículos saindo da área congestionada (Figura 1(a)).
2. Bloqueio de rampas de saída: veículos que pretendem deixar a rodovia antes do gargalo podem sofrer atraso se as rampas de saída estiverem bloqueadas pelo congestionamento.

2.2. O conceito CFP

A ideia básica de CFP é regular o fluxo principal a montante de gargalos (pelo menos cerca de 500 m). Cria-se assim uma área de aceleração entre o local onde o fluxo é regulado (área controlada) e a área do gargalo. Isto permite que os veículos que deixam a área controlada acelerem antes de atingirem a área do gargalo. Assim, a queda de capacidade é evitada e condições ótimas de tráfego são estabelecidas. O gargalo da Figura 1(b) não está ativo e CFP não é necessário enquanto $q_{in} < q_{cap}^{down}$, caso no qual se tem $q_{out} \approx q_{in}$. Se q_{in} aumentar e tornar-se maior do que q_{cap}^{down} , o gargalo seria ativado e, na ausência de controle, q_{out} seria reduzido devido à queda de capacidade (Figura 1(a)). Por outro lado, CFP pode aplicar um fluxo controlado q_c tal que q_{out} seja igual à capacidade do gargalo. O congestionamento na via principal não pode ser evitado por CFP porque $q_{in} > q_{cap}^{down}$. Mas como o fluxo que deixa o congestionamento é maior no caso com CFP do que no caso sem controle, o congestionamento criado por CFP tem velocidade interna maior e é espacial e temporalmente menor. Neste artigo, LVV é utilizado como atuador de CFP para impor o fluxo controlado q_c .

2.3. METANET e AMOC

METANET (Messmer e Papageorgiou, 1990) é um simulador macroscópico de tráfego e AMOC (Kotsialos *et al.*, 2002) é uma ferramenta de controle ótimo de tráfego em rodovias.



2.3.1. Modelagem do fluxo de tráfego

A densidade e a velocidade média são variáveis de estado calculadas a partir da equação de conservação e da equação dinâmica de velocidade, respectivamente (Messmer e Papageorgiou, 1990); os fluxos são calculados por:

$$q_{m,i}(k) = \rho_{m,i}(k) v_{m,i}(k) \lambda_m. \quad (1)$$

A equação dinâmica de velocidade inclui uma relação estática de velocidade-densidade equivalente ao diagrama fundamental:

$$V[\rho_{m,i}(k), b_m(k)] = v_{f,m}[b_m(k)] \exp \left[-\frac{1}{\alpha_m[b_m(k)]} \left(\frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{cr,m}[b_m(k)]} \right)^{\alpha_m[b_m(k)]} \right] \quad (2)$$

A partir das equações delineadas anteriormente obtém-se um modelo de espaço de estados de tempo discreto, não linear e macroscópico para toda a malha rodoviária dado por:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \mathbf{d}(k)], \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (3)$$

em que \mathbf{x} é o vetor de estados, \mathbf{u} é o vetor de controle e \mathbf{d} é o vetor de perturbações. O vetor de estados consiste de densidades $\rho_{m,i}$, de velocidades médias $v_{m,i}$ de cada segmento i de cada arco m e das filas w_o de cada origem o . O vetor de controle consiste de razões LVV b_m de cada arco m onde LVV é aplicado. As perturbações são variáveis externas e consistem da demanda d_o de cada origem o e das taxas de conversão β_n^m de cada bifurcação n .

2.3.2. O problema de controle ótimo

O problema é formulado como um problema dinâmico de controle ótimo em tempo discreto com restrições às variáveis de controle em um dado horizonte K_p e foi incorporado na ferramenta de controle ótimo AMOC. A formulação geral do problema é a seguinte:

Dadas as predições de $\mathbf{d}(k)$, $k = 0, 1, \dots, K_p - 1$, e o estado inicial $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(0)$; minimizar

$$J = \mathcal{G}[\mathbf{x}(K_p)] + \sum_{k=0}^{K_p-1} \varphi[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \mathbf{d}(k)] \quad (4)$$

sujeito à (3) e às desigualdades de restrição impostas às razões LVV, $b_{\min,m} \leq b_m(k) \leq 1$.

O critério custo escolhido é o tempo total de viagem (TTV) por todos os veículos da malha rodoviária. Para detalhes a respeito da função custo usada como (4), veja (Carlson *et al.*, 2010c). A solução determinada por AMOC consiste das trajetórias ótimas das razões LVV bem como das trajetórias ótimas correspondentes das variáveis de estado.

2.4. LVV como um atuador para CFP

A aplicação de CFP via LVV baseia-se principalmente na exploração de dois aspectos do efeito de LVV no comportamento agregado do fluxo de tráfego (Carlson *et al.*, 2010a, 2011a):

- (i) Se o fluxo que chega q_{in} (Figura 1(b)) é menor do que a capacidade induzida por LVV, a aplicação de LVV irá reduzir apenas temporariamente o fluxo de saída da área de aplicação LVV, que logo retorna para o valor igual a q_{in} (Figura 2(a)). A redução temporária do fluxo é usada para postergar a formação de congestionamento no gargalo.
- (ii) Se o fluxo principal q_{in} (Figura 1(b)) que chega for maior do que a capacidade induzida por LVV, a aplicação de LVV limita o fluxo de saída da área de aplicação à valores correspondentes à capacidade induzida por LVV, que por sua vez é mais baixa do que a capacidade nominal (Figura 2(b)). Isto permite controlar o fluxo principal com valores controlados q_c que dependem da razão LVV aplicada.

Adicionalmente, valores baixos de razões LVV deslocam a densidade crítica do diagrama fundamental em direção à valores maiores (Figura 2(b)).

3. PROJETO DO CONTROLADOR

Implantações em campo requerem sistemas simples e eficientes. Nesta seção o controlador realimentado desenvolvido por Carlson *et al.* (2010a, 2011a) é apresentado e dois novos

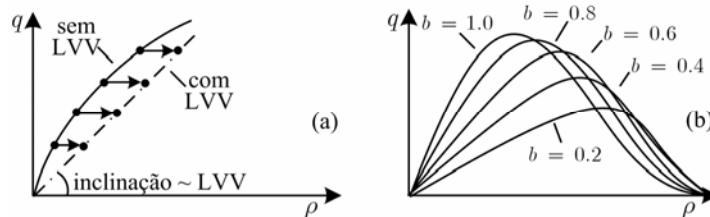


Figura 2: (a) Efeito de LVV em densidades subcríticas; e (b) diagrama fundamental para diferentes razões LVV

controladores, possivelmente mais simples, são projetados.

3.1. CFP realimentado realizado via LVV

O problema de controle da Figura 1(b) é o de regular a densidade de tráfego ρ_{out} via 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 ρ_{out} é a saída de controle.

A base para o projeto de CFP realimentado realizado via LVV é um modelo linearizado de tempo discreto derivado por Carlson *et al.* (2010a, 2011a):

$$\frac{\Delta \rho_{out}(z)}{\Delta b(z)} = K \cdot K' \frac{\tau}{z + \tau - 1} \cdot \frac{z - \alpha}{z - \beta} \quad (5)$$

em que $\alpha, \beta, \tau > 0$, $K' > 0$ e $K > 0$ são parâmetros do modelo, e $0 < \beta < \alpha \leq 1$; z a variável complexa de tempo discreto; $\Delta \rho_{out}$ a variação da densidade na região do gargalo devido a uma variação Δb na área de aplicação LVV. Note que o modelo de tráfego original (Seção 2.3.1) e o processo real de fluxo de tráfego são altamente não lineares, e os controladores realimentados projetados devem ser robustos sob qualquer condição real.

Carlson *et al.* (2010a, 2011a) projetaram um controlador CFP realimentado relativamente simples baseado numa estrutura de controladores em cascata (Seborg *et al.*, 1989), como apresentado na Figura 3(a) com funções de transferência e sinais correspondentes ao modelo linearizado (5). Na Figura 3(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 LVV e é realimentado e comparado com o fluxo desejado \hat{q}_c fornecido pelo controlador primário e que serve de referência para o controlador secundário. A malha primária usa a densidade ρ_{out} medida na região do gargalo e compara-a com a referência $\hat{\rho}_{out}$ que deve ser definida igual a ρ_{cr} para maximização do escoamento.

O controlador secundário da Figura 3(a) foi projetado como um controle do tipo integral (I):

$$b(k) = b(k-1) + K_I e_q(k) \quad (6)$$

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. O controlador da malha primária é um controlador proporcional-integral (PI) dado por:

$$\hat{q}_c(k) = \hat{q}_c(k-1) + (K'_p + K'_I) e_\rho(k) - K'_p e_\rho(k-1) \quad (7)$$

em que K'_I e K'_p são os ganhos integral e proporcional do controlador, respectivamente, e $e_\rho(k) = \hat{\rho}_{out} - \rho_{out}(k)$ é o erro de densidade. Para mais detalhes sobre o projeto, ajuste e operação do Controlador em Cascata veja (Carlson *et al.*, 2010a, 2011a).

3.2. Projeto do Controlador realimentado com Tabela de Ligação

Um projeto alternativo ao controlador apresentado na seção anterior é remover a

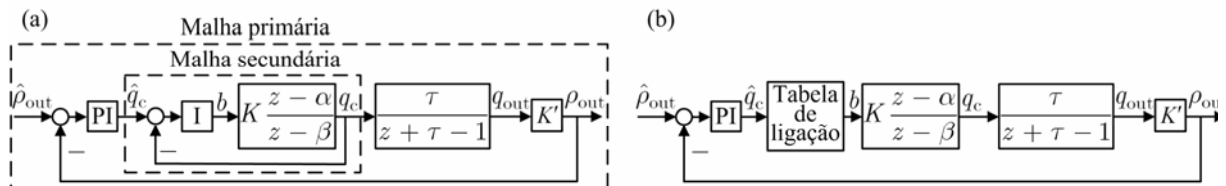


Figura 3: Estrutura do CFP realimentado com o uso de LVV como atuador: (a) em cascata; e (b) com tabela de ligação

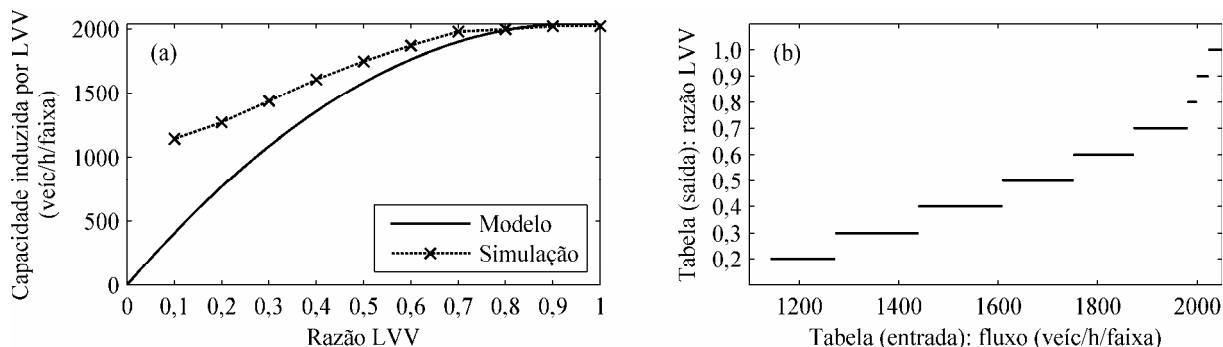


Figura 4: (a) Capacidade de fluxo induzida por LVV; e (b) tabela de ligação

realimentação secundária e substituir o controlador secundário por uma tabela de ligação não linear como na Figura 3(b). A tabela de ligação reflete a relação (estacionária) entre fluxo de capacidade e razão LVV. A linha contínua na Figura 4(a) corresponde à capacidade induzida por LVV obtida por (1), considerando a velocidade calculada por (2), com parâmetros utilizados nas simulações da Seção 4.5. Ou seja, a tabela de ligação é uma não linearidade estática que é alimentada com a saída do controlador PI \hat{q}_c para então fornecer a razão LVV desejada b que vai determinar o fluxo controlado q_c . Uma abordagem similar foi adotada por (Zhang *et al.*, 2006). Entretanto, a falta de uma área de aceleração é a possível razão para terem obtido apenas melhorias marginais.

O projeto da tabela de ligação em um simulador como o METANET (Seção 2.3.1) é bastante simples. Uma rodovia simples sem rampas de saída ou de acesso com uma área de aplicação LVV é simulada com uma demanda a montante igual à capacidade do trecho. Sob estas condições, qualquer razão LVV que for aplicada cairá no caso (ii) da Seção 2.4 e leva, em regime estacionário, à uma capacidade induzida por LVV correspondente. Assim, um conjunto de razões LVV admissíveis é considerado e cada uma delas é aplicada na área de aplicação LVV. É dado tempo suficiente para que o sistema atinja o regime estacionário antes de se registrar o fluxo de saída correspondente. A linha pontilhada na Figura 4(a) corresponde às capacidades induzidas por LVV obtidas por simulação. Note que a diferença entre as curvas na Figura 4(a) deve-se à outros termos dinâmicos incluídos em (3). A tabela de ligação pode ser construída a partir da Figura 4(a), como na Figura 4(b) a ser usada na Seção 4.5.

Na prática, os experimentos mencionados acima dificilmente podem ser efetuados. O ponto de partida são estimativas baseadas em simulação ou em dados disponíveis para valores específicos de LVV. Quando o sistema começar a operar, um refinamento da tabela de ligação pode ser realizado à medida que novos dados tornarem-se disponíveis.

A relação entrada-saída da malha secundária do Controlador em Cascata é razoavelmente rápida, assim como a compensação não linear provida pela tabela de ligação. Portanto, o controlador PI usado no Controlador em Cascata também é considerado apropriado para o Controlador com Tabela de Ligação. Os mesmos ganhos do controlador primário do Controlador em Cascata também se mostraram apropriados e são usados para este controlador.

3.3. Projeto do Controlador realimentado PI

A curva de capacidade simulada (linha pontilhada) na Figura 4(a) é relativamente achatada e pode ser aproximada por uma linha reta. Esta abordagem permite projetar um controlador linear ainda mais simples para CFP via LVV, do tipo PI. Neste caso, a estrutura de controle é

semelhante à da Figura 3(b), porém sem o bloco da tabela de ligação. Ou seja, o Controlador PI retorna diretamente a razão LVV b :

$$b(k) = b(k-1) + (\hat{K}_p + \hat{K}_i) e_p(k) - \hat{K}_p e_p(k-1) \quad (8)$$

em que as variáveis são como definidas anteriormente e \hat{K}_p e \hat{K}_i são os ganhos proporcional e integral do controlador, respectivamente.

3.4. Aspectos de aplicação prática

Esta seção resume alguns aspectos práticos da implementação de CFP via LVV (Carlson *et al.*, 2011a). Primeiramente, LVV assumem apenas valores discretos. Define-se um conjunto de razões LVV $b \in \{0, 2; 0, 3; \dots; 1, 0\}$, de acordo com o qual é arredondada a razão LVV $b(k)$ fornecida pela estratégia de controle (6) no caso do Controlador em Cascata ou pela estratégia de controle (8) no caso do Controlador PI, enquanto que o Controlador com Tabela de Ligação tem razões LVV discretas definidas no projeto da tabela de ligação. Como restrições adicionais a diferença entre duas razões LVV exibidas consecutivamente no mesmo painel é limitada a 0,2 e o mesmo limite se aplica entre duas razões LVV exibidas em dois painéis consecutivos. Além disso, uma razão LVV de 0,9 é aplicada na área de aceleração e na área do gargalo toda vez que CFP é ativado. Finalmente, painéis LVV são ativados a montante da área de aplicação LVV de tal maneira que o mesmo limite de velocidade seja exibido em toda a área do congestionamento controlado, enquanto que painéis com limites de velocidade cada vez menores serão encontrados por veículos que se aproximam da fila. O período de controle, que determina a frequência com que os LVV exibidos mudam, é $T_c = 60$ s.

4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Diferentes cenários de controle são examinados a seguir usando o simulador METANET e a ferramenta de controle ótimo AMOC. Os parâmetros do modelo foram obtidos de (Carlson *et al.*, 2010b). O efeito modelado de LVV no diagrama fundamental ocorre de acordo com a Figura 2(b) para todos os cenários. Os cenários simulados estão resumidos na Tabela 1.

4.1. Malha viária modelada e demanda

Um trecho hipotético de uma malha rodoviária de 21,5 km de extensão, apresentado na Figura 5, é usado nas simulações a seguir. A via principal é formada por quinze arcos, de L00 a L14, e dezesseis nós, de N0 a N15. Os arcos L12 e L13 possuem apenas um segmento cada, e os demais arcos estão divididos em segmentos de 500 m. Há duas rampas de entrada, O1 e O2, e uma rampa de saída D1. Na figura, a área de aplicação LVV, a área de aceleração e os locais das medições para os controladores realimentados estão indicados. O gargalo é a área de entrelaçamento da rampa de entrada O2. A demanda utilizada e as taxas de conversão aparecem na Figura 6. O período de simulação é $T = 10$ s.

4.2. Sem controle

Para o caso em que nenhuma medida de controle é aplicada, a densidade e o fluxo resultantes são apresentados na Figura 7. O fluxo na área de entrelaçamento O2 atinge a capacidade no instante $t = 0,4$ h. Apesar da forte redução do fluxo de entrada nas origens e o aumento da taxa de conversão em D1 logo a seguir, um congestionamento se forma depois de $t = 0,5$ h e causa uma queda de capacidade. O congestionamento cresce a montante e atinge a área de entrelaçamento O1 no instante $t = 0,6$ h e provoca uma redução de fluxo também neste local. Note que apesar do baixo fluxo de entrada na malha viária após $t = 2$ h, ainda são necessários 40 minutos para que o congestionamento se dissolva. O TTV resultante é igual a 4196 veíc·h.

Tabela 1: Resumo dos cenários simulados

Estratégia	Descrição	TTV (veíc-h)	%
Sem controle	-	4196	-
Controle Ótimo	AMOC via LVV é aplicado em L11 e em L12-L13-L14.	3363	-19,8
Controlador em Cascata	Controlador em cascata via LVV é aplicado em L11 com as restrições da Seção 3.4.	3370	-19,7
Controlador com Tabela de Ligação	Controlador com Tabela de Ligação via LVV é aplicado em L11 com as restrições da Seção 3.4.	3376	-19,5
Controlador PI	Controlador PI via LVV é aplicado em L11 com as restrições da Seção 3.4.	3410	-18,7

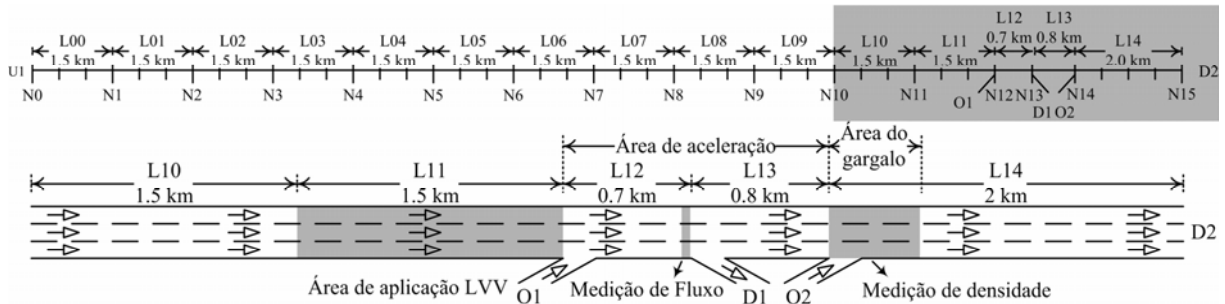


Figura 5: Trecho hipotético de malha rodoviária

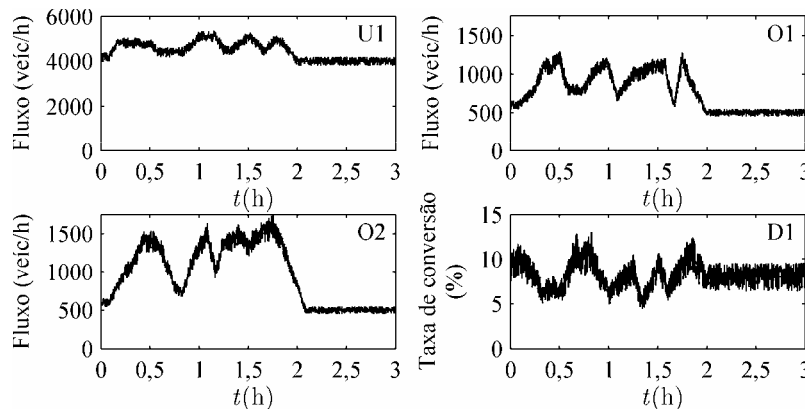


Figura 6: Demanda nas origens U1, O1 e O2 e taxas de conversão para D1

4.3. Controle ótimo (AMOC)

Para a aplicação de CFP via LVV usando controle ótimo, dois grupos de arcos são considerados. O primeiro compreende o arco L11 e o segundo compreende os arcos L12, L13 e L14. Nos demais arcos não se aplica LVV. O TTV resultante é 3363 veíc·h, o que corresponde a uma melhoria de 19,8 % em relação ao cenário sem controle. A densidade, o fluxo e as razões LVV resultantes são apresentados na Figura 8. A situação é idêntica ao caso sem controle até $t = 0,4$ h, quando LVV é ativado pela primeira vez de maneira a aumentar a densidade crítica na área de entrelaçamento O1 e a reduzir o fluxo que chega no gargalo. Esta ação LVV de curta duração é suficiente para evitar a formação de um congestionamento no gargalo e, por conta disto, LVV são praticamente desnecessários pelos próximos 20 minutos. Uma segunda ação de controle inicia por volta de $t = 1,3$ h, desta vez mais intensa. A formação de congestionamento no gargalo é evitada mais uma vez e o fluxo de saída é mantido próximo da capacidade com a densidade do gargalo próxima à densidade crítica.

4.4. Controlador em Cascata

Para a aplicação de CFP via LVV usando o Controlador em Cascata, LVV serão aplicados

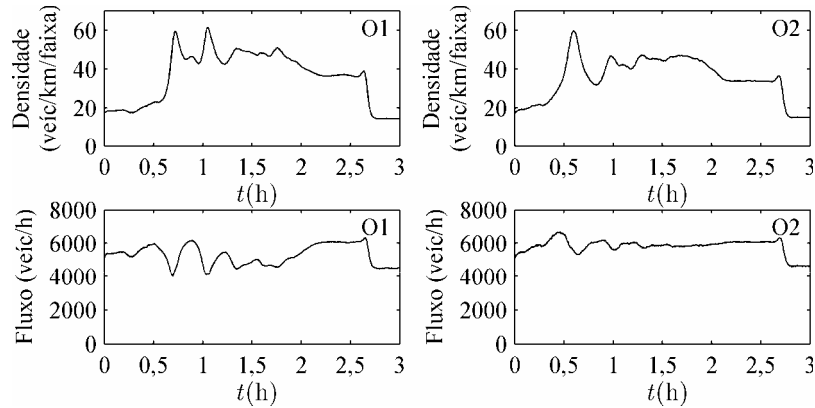


Figura 7: Sem controle: condições de tráfego nas áreas de entrelaçamento

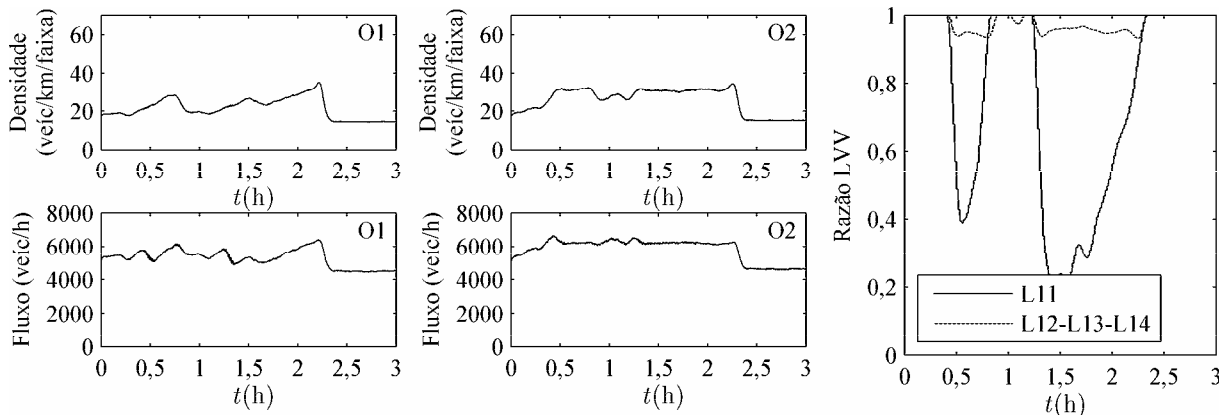


Figura 8: Controle ótimo: condições de tráfego nas áreas de entrelaçamento e razões LVV

também nos arcos de L01 a L10. A razão LVV fornecida pela lei de controle (6) será aplicada no arco L11 depois de qualquer restrição ser imposta. As razões LVV nos outros arcos seguem as regras apresentadas na Seção 3.4. As medições são feitas onde indicado na Figura 5. A referência para o controlador primário é $\hat{\rho}_{out} = 32$ veic/km/faixa. Os ganhos dos controladores foram obtidos de Carlson *et al.* (2010a, 2011a) e são $K_I = 0,0007$ h/veic/faixa para o controlador secundário, e $K'_I = 3$ km/h/faixa e $K'_p = 50$ km/h/faixa para o controlador primário. O TTV resultante é 3370 veic·h, o que corresponde a uma melhoria de 19,7% em relação ao cenário sem controle e muito próximo do cenário com controle ótimo. A densidade, o fluxo e as razões LVV resultantes são apresentados na Figura 9.

Neste cenário a densidade na área de entrelaçamento O2 ultrapassa a referência $\hat{\rho}_{out}$ (linha pontilhada no gráfico de densidade) nas duas ocasiões em que LVV é ativado. Os valores das variáveis de tráfego variam mais em torno de valores próximos aos da Figura 8 por causa do uso de valores discretos para as razões LVV. A linha tracejada no gráfico de fluxo da área de entrelaçamento O1 mostra a saída \hat{q}_c do controlador primário que serve de referência para o controlador secundário e que é seguida de perto pela variável controlada.

4.5. Controlador com Tabela de Ligação

Nesta seção o Controlador em Cascata é substituído pelo Controlador com Tabela de Ligação. Os arcos onde LVV são utilizados são os mesmos que na seção anterior e a razão LVV fornecida pela tabela de ligação (Figura 4(b)) também é aplicada no arco L11. A referência permanece a mesma. A medição de densidade é feita onde indicado na Figura 5, enquanto que

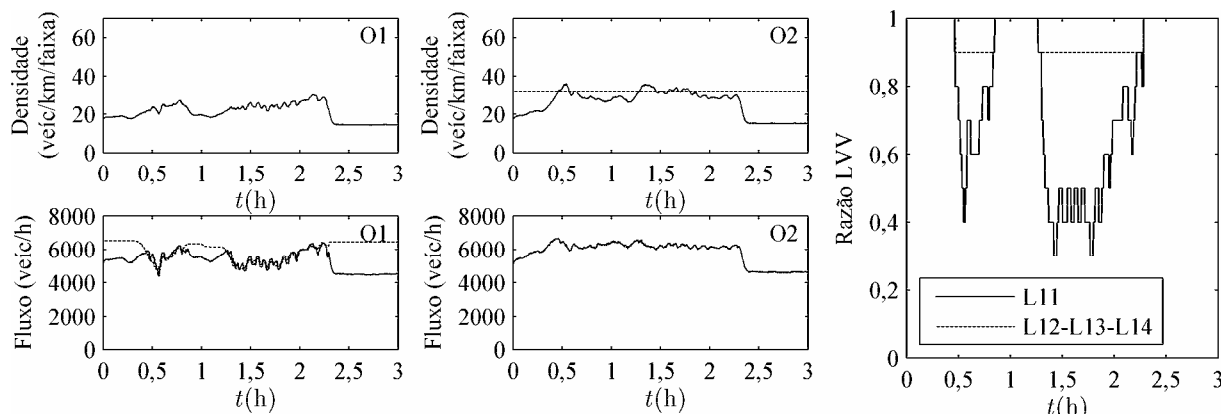


Figura 9: Controlador em Cascata: condições de tráfego nas áreas de entrelaçamento e razões LRV

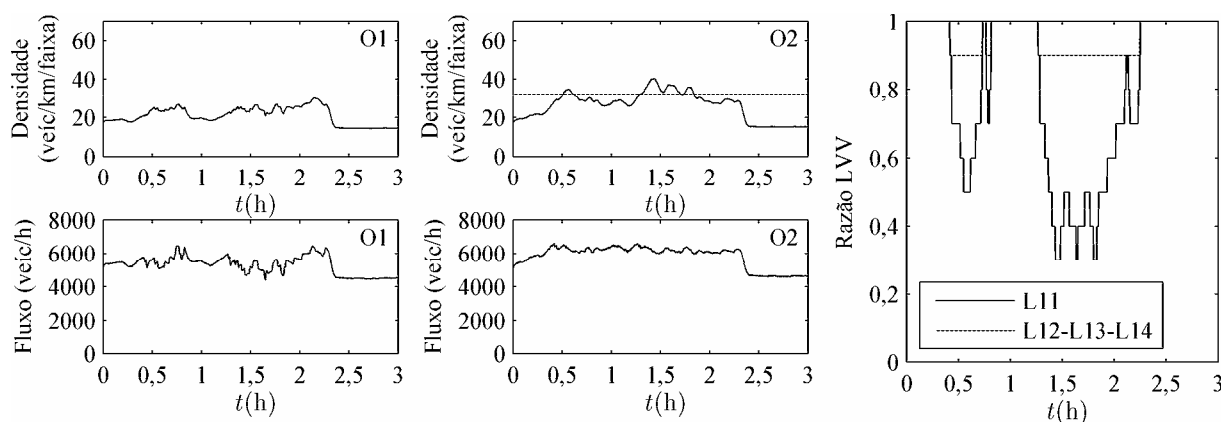


Figura 10: Controlador com Tabela de Ligação: condições de tráfego nas áreas de entrelaçamento e razões LRV

a medição de fluxo não é necessária. O TTV resultante é 3376 veic·h, o que corresponde a uma melhoria de 19,5 % em relação ao cenário sem controle e muito próximo do cenário com Controlador em Cascata. A densidade, fluxo e razões LRV resultantes são apresentados na Figura 10. Neste cenário, a densidade na área de entrelaçamento O2 ultrapassa um pouco mais a referência $\hat{\rho}_{out}$ e apresenta variações um pouco maiores em torno da referência.

4.6. Controlador PI

Nesta seção o Controlador PI é empregado. A configuração do sistema não é modificada em relação à configuração do Controlador com Tabela de Ligação, sendo a única diferença o próprio controlador. Os ganhos do controlador devem ser, grosso modo, os mesmos ganhos usados para o Controlador com Tabela de Ligação, multiplicados pela inclinação da reta utilizada para aproximar a curva de capacidade induzida por LRV (linha pontilhada na Figura 4(a)), aproximadamente 0,0007. Um ajuste fino por tentativa e erro foi realizado sobre estes valores e os ganhos finais obtidos são: $\hat{K}_I = 0,003$ km/veic/faixa e $\hat{K}_P = 0,04$ km/veic/faixa. O TTV resultante é 3410 veic·h, o que corresponde a uma melhoria de 18,7 % em relação ao cenário sem controle e ligeiramente pior que os outros dois controladores realimentados. A densidade, fluxo e razões LRV são apresentados na Figura 11. Neste caso, a densidade na área de entrelaçamento O2 ultrapassa a referência $\hat{\rho}_{out}$ ainda mais do que o Controlador com Tabela de Ligação. Na segunda ação de controle LRV, o controlador leva mais tempo para atingir e permanecer na vizinhança da referência. A reação da razão LRV do Controlador PI é

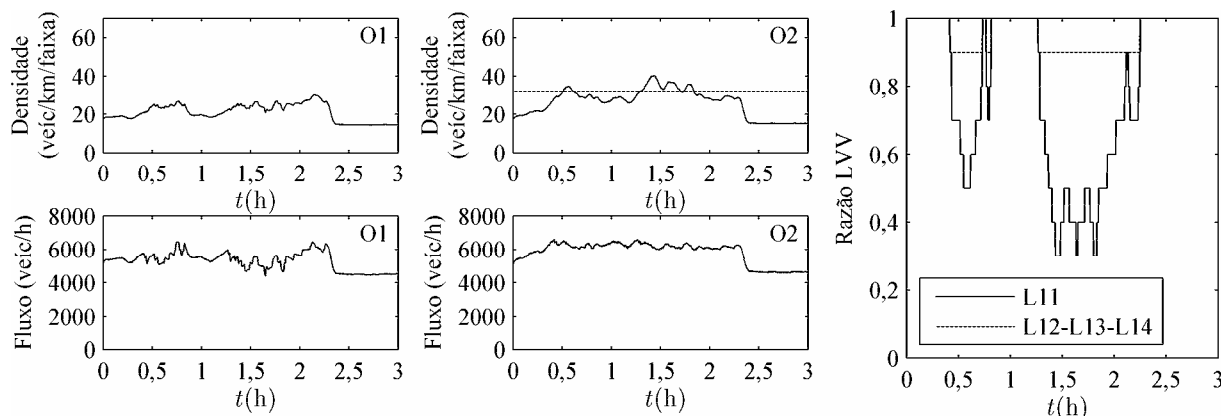


Figura 11: Controlador PI: condições de tráfego nas áreas de entrelaçamento e razões LVV

ligeiramente mais lenta do que para os outros dois controladores realimentados.

4.7. Comentários e observações

Os Controladores com Tabela de Ligação e PI possuem um parâmetro a menos a ser sintonizado. Isto pode ser visto como uma vantagem potencial destes controladores, uma vez que o ajuste do controlador deve ser feito com cuidado para evitar um desempenho ruim ou até mesmo instabilidade do sistema. Investigações adicionais, não apresentadas, mostraram que o Controlador com Tabela de Ligação é robusto à erros nos valores da tabela de ligação.

Os Controladores com Tabela de Ligação e PI não precisam de medição do fluxo. Em alguns casos, porém, a medição do fluxo pode ajudar na detecção e rejeição de perturbações no tráfego, o que é uma vantagem para o Controlador em Cascata. Note-se que no local da medição do fluxo na Figura 5 já houve o entrelaçamento do fluxo que entra pela rampa de acesso com o fluxo controlado que deixa a área de aplicação. Isto permite que a malha secundária do Controlador em Cascata rejeite mais rapidamente esta perturbação proveniente da rampa de acesso. Se o detector fosse colocado a montante da rampa de acesso, a perturbação seria rejeitada somente depois de atingir a área de entrelaçamento O1, como acontece com os Controladores com Tabela de Ligação e PI. Se não há um detector de fluxo a jusante da rampa de acesso, mas há um detector que mede o fluxo de saída desta rampa, esta medida pode ser apropriadamente adicionada ao fluxo medido a montante da rampa de acesso antes deste ser fornecido para o Controlador em Cascata. Raciocínio análogo se aplica no caso de uma rampa de saída. No entanto, a colocação do detector ainda mais a jusante do que imediatamente após a área de aplicação deve ser considerada com muito cuidado para não mover a dinâmica entre q_c e q_{out} (Figura 3(a)) para dentro da malha secundária, o que invalidaria o projeto do Controlador em Cascata.

Os controladores realimentados podem ser usados como um elemento em outros sistemas de controle como o proposto por Carlson *et al.* (2011b) para CFP aplicado simultaneamente em duas rodovias com um gargalo em comum ou ser integrado com outras medidas de controle.

5. CONCLUSÕES

Dois controladores realimentados para o fluxo principal de rodovias realizados via LVV foram desenvolvidos, examinados e comparados a um controlador projetado anteriormente baseado em uma estrutura em cascata, e a uma abordagem de controle ótimo. Os controladores realimentados se mostraram estáveis, robustos e os resultados de simulação se

aproximaram aos da abordagem de controle ótimo. Graças à sua simplicidade, os controladores realimentados são adequados para a implantação em campo. Algumas recomendações para a escolha e operação dos controladores foram fornecidas. Pesquisa em andamento está investigando a integração desses controladores com outras medidas de controle rodoviário, como controle de acesso, para aplicação local e global. Um teste de campo das estratégias apresentadas deve ser tentado em um futuro próximo.

Agradecimentos

O primeiro autor foi financiado pela CAPES com bolsa de doutorado pleno no exterior.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carlson, R. C.; I. Papamichail e M. Papageorgiou (2010a) Controle Realimentado Local do Fluxo Principal em Rodovias com o Uso de Limites de Velocidade Variáveis. *Anais do XXIV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*. Salvador, Bahia, Brasil.
- Carlson, R. C.; I. Papamichail e M. Papageorgiou (2011a) Local Feedback-based Mainstream Traffic Flow Control on Motorways Using Variable Speed Limits. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. DOI: 10.1109/TITS.2011.2156792
- Carlson, R. C.; I. Papamichail; M. Papageorgiou e A. Messmer (2010b) Optimal Motorway Traffic Flow Control Involving Variable Speed Limits and Ramp Metering. *Transportation Science*, v. 44, n. 2, p. 238-253.
- Carlson, R. C.; I. Papamichail; M. Papageorgiou e A. Messmer (2010c) Optimal Mainstream Traffic Flow Control of Large-scale Motorway Networks. *Transportation Research Part C*, v. 18, n. 2, p. 193-212.
- Carlson, R. C.; A. Ragias; I. Papamichail e M. Papageorgiou (2011b) Mainstream Traffic Flow Control of Merging Motorways Using Variable Speed Limits. *Proceedings of The 19th Mediterranean Conference on Control and Automation*. Corfu, Greece, p. 674-681.
- Gazis, D. C. e R. S. Foote (1969) Surveillance and Control of Tunnel Traffic by an On-line Digital Computer. *Transportation Science*, v. 3, n. 3, p. 255-275.
- Greenberg, H. e A. Daou (1960) The Control of Traffic Flow to Increase Flow. *Operations Research*, v. 8, n. 4, p. 524-532.
- Haboyan, K. A. (1995) A Case for Freeway Mainline Metering. *Transp. Research Record*, n. 1494, p. 11-20.
- Hegyi, A. (2004) *Model Predictive Control for Integrating Traffic Control Measures*. PhD Thesis, TRAIL Thesis Series T2004/2. Delft University of Technology, The Netherlands.
- Hegyi, A. e S. P. Hoogendoorn (2010) Dynamic Speed Limit Control to Resolve Shock Waves on Freeways - Field Test Results of the SPECIALIST Algorithm. *Proceedings of The 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. Funchal, Madeira Island, Portugal, p. 519-524.
- Jacobson, E. e J. Landsman (1994) Case Studies of US Freeway-to-freeway Ramp and Mainline Metering and Suggested Policies for Washington State. *Transportation Research Record*, n. 1446, p. 48-55.
- Kotsialos, A.; M. Papageorgiou; M. Mangeas e H. Haj-Salem (2002) Coordinated and Integrated Control of Motorway Networks via Non-linear Optimal Control. *Transp. Research Part C*, v. 10, n. 1, p. 65-84.
- McCalden Jr., M. S. (1984) A Traffic Management System for the San Francisco-Oakland Bay Bridge. *ITE Journal*, v. 54, n. 5, p. 46-51.
- 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.
- Popov, A.; R. Babuska, A. Hegyi e H. Werner (2008) Distributed Controller Design for Dynamic Speed Limit Control Against Shock Waves on Freeways. *Proceedings of The 17th IFAC World Congress*. Seoul, Korea, p. 14060-14065.
- Seborg, D.; T. F. Edgar e D. A. Mellichamp (1989) *Process Dynamics and Control*. Wiley, New York.
- Zhang, J.; H. Chang e P. A. Ioannou (2006) A Simple Roadway Control System for Freeway Traffic. *Proceedings of The 2006 American Control Conference*. Minneapolis, MN, USA, p. 4900-4905.

Rodrigo Castelan Carlson (rcarlson@dssl.tuc.gr)

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