

Universidade Federal de Santa Catarina
Atividades de Pesquisa
Formulário de Tramitação e Registro

Situação: **Aprovação/Depto Coordenador**
 Protocolo nº: **2013.1401**

Título:	Análise e controle em tempo real de sistemas de tráfego urbano com base no diagrama fundamental macroscópico
Resumo:	Desde a década de 1960 pesquisadores procuram estabelecer teorias que descrevem o comportamento agregado do tráfego em cidades. Como resultado de mais de quatro décadas de estudos surgiu o conceito de Diagrama Fundamental Macroscópico (DFM) que relaciona a produção de uma malha viária urbana com a acumulação de veículos em suas vias. Em 2008 a existência do DFM foi verificada para a região central da cidade de Yokohama no Japão com base em dados de campo. Desde então diversos pesquisadores vêm investigando as condições para a existência e os aspectos que afetam a forma do diagrama: homogeneidade da distribuição do fluxo, posicionamento dos detectores veiculares, tipo de via, etc. Embora alguns estudos tenham avaliado também o efeito do controle de tráfego, eles se limitaram a dados de campo obtidos sob controle a tempos fixos, enquanto estudos envolvendo controle em tempo real basearam-se principalmente em dados de simulação. Este trabalho consiste primeiramente em verificar a existência e estudar o efeito do controle de tráfego no DFM com base nos dados de campo de duas cidades brasileiras, Macaé/RJ e Mauá/SP. Os dados de campo foram coletados tanto com controle a tempos fixos como sob a operação de controle em tempo real. A importância desta análise reside no fato que o DFM vem sendo usado para derivação de leis de controle perimétrico de malhas viárias, porém sem um conhecimento adequado de como o DFM é afetado pelo controle interno à malha. Espera-se que os resultados desta análise deem subsídios para a compreensão do comportamento agregado do tráfego via DFM sujeito ao controle de tráfego, tanto a tempos fixos como em tempo real, e para a derivação de ferramentas de análise e de novas estratégias de controle. Com base nestes resultados e nos dados de campo, pretende-se reproduzir o comportamento em ambiente de microsimulação de tráfego que será usado para o teste e desenvolvimento de estratégias de controle de tráfego urbano. Um estudo de viabilidade dos métodos propostos será realizado para a Baixada Santista onde um sistema de controle de tráfego em tempo real está sendo instalado. Trabalhos recentes mostram que estratégias de controle baseadas no conceito de DFM podem obter melhorias nos atrasos e nas velocidades médias de malhas viárias urbanas em cerca de 30%.
Palavras chave: (máximo 5)	diagrama fundamental macroscópico; tráfego urbano; controle de tráfego
Grande Área do conhecimento:	Engenharias
Área do conhecimento:	Engenharia de Transportes
Nome do Grupo de Pesquisa: (CNPq - Diretório)	Grupo de Pesquisa em Automação e Sistemas - GPAS
Está vinculado a outro projeto de pesquisa?	
Período de realização:	12/01/2013 a 11/30/2016
A atividade receberá algum aporte financeiro?:	Sim
Orçamento Total:	R\$ 15000
Financiador:	CNPQ

Propriedade Intelectual (o resultado do projeto é ou poderá ser protegido por):	
---------------------------------------------------------------------------------------	--

■ ■ ■ **Envolvidos neste projeto de pesquisa**

Coordenador	
Nº do SIAPE:	1953788
Nome do Coordenador:	Rodrigo Castelan Carlson
CPF do Coordenador:	2974396933
Departamento:	CAMPUS DE JOINVILLE
Centro:	CAMPUS DE JOINVILLE
Regime de trabalho:	DE
Fone de contato:	37214883
E-mail:	rodrigo.carlson@ufsc.br
Carga horária semanal nesta atividade:	8 horas
Receberá remuneração nesta atividade de pesquisa?	Não

Você gostaria de participar do guia de fontes da UFSC?	Não
-----------------------------------------------------------	-----

Outros prof. ou servidores da UFSC envolvidos?	Sim
Alunos da UFSC envolvidos?	Sim
Pessoas externas à UFSC envolvidas?	Não

Participantes
Participante: Rodolfo Cesar Costa Flesch CTC-DEPTO DE AUTOMACAO E SISTEMAS
Participante: WERNER KRAUS JUNIOR CTC-DEPTO DE AUTOMACAO E SISTEMAS

Outras Considerações
Projeto aprovado com recursos da CHAMADA UNIVERSAL – MCTI/CNPq Nº 14/2013. ++++++ Notas da CPE: anexar projeto de pesquisa. ++++++

Nº do Processo:	2013.1401
-----------------	-----------

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
CENTRO DE ENGENHARIAS DA MOBILIDADE

ANÁLISE E CONTROLE EM TEMPO REAL DE SISTEMAS DE TRÁFEGO URBANO
COM BASE NO DIAGRAMA FUNDAMENTAL MACROSCÓPICO

Proposta para a Chamada Universal
MCTI/CNPq Nº 14/2013

Rodrigo Castelan Carlson

Joinville, maio de 2013

ANÁLISE E CONTROLE EM TEMPO REAL DE SISTEMAS DE TRÁFEGO URBANO COM BASE NO DIAGRAMA FUNDAMENTAL MACROSCÓPICO

Proposta para a Chamada Universal
MCTI/CNPq N° 14/2013

Rodrigo Castelan Carlson

RESUMO: Desde a década de 1960 pesquisadores procuram estabelecer teorias que descrevem o comportamento agregado do tráfego em cidades. Como resultado de mais de quatro décadas de estudos surgiu o conceito de Diagrama Fundamental Macroscópico (DFM) que relaciona a produção de uma malha viária urbana com a acumulação de veículos em suas vias. Em 2008 a existência do DFM foi verificada para a região central da cidade de Yokohama no Japão com base em dados de campo. Desde então diversos pesquisadores vêm investigando as condições para a existência e os aspectos que afetam a forma do diagrama: homogeneidade da distribuição do fluxo, posicionamento dos detectores veiculares, tipo de via, etc. Embora alguns estudos tenham avaliado também o efeito do controle de tráfego, eles se limitaram a dados de campo obtidos sob controle a tempos fixos, enquanto estudos envolvendo controle em tempo real basearam-se principalmente em dados de simulação. Este trabalho consiste primeiramente em verificar a existência e estudar o efeito do controle de tráfego no DFM com base nos dados de campo de duas cidades brasileiras, Macaé/RJ e Mauá/SP. Os dados de campo foram coletados tanto com controle a tempos fixos como sob a operação de controle em tempo real. A importância desta análise reside no fato que o DFM vem sendo usado para derivação de leis de controle perimétrico de malhas viárias, porém sem um conhecimento adequado de como o DFM é afetado pelo controle interno à malha. Espera-se que os resultados desta análise deem subsídios para a compreensão do comportamento agregado do tráfego via DFM sujeito ao controle de tráfego, tanto a tempos fixos como em tempo real, e para a derivação de ferramentas de análise e de novas estratégias de controle. Com base nestes resultados e nos dados de campo, pretende-se reproduzir o comportamento em ambiente de microsimulação de tráfego que será usado para o teste e desenvolvimento de estratégias de controle de tráfego urbano. Um estudo de viabilidade dos métodos propostos será realizado para a Baixada Santista onde um sistema de controle de tráfego em tempo real está sendo instalado. Trabalhos recentes mostram que estratégias de controle baseadas no conceito de DFM podem obter melhorias nos atrasos e nas velocidades médias de malhas viárias urbanas em cerca de 30%.

PALAVRAS CHAVE: diagrama fundamental macroscópico, tráfego urbano, controle de tráfego

1. IDENTIFICAÇÃO DA PROPOSTA

Título do projeto: Análise e controle em tempo real de sistemas de tráfego urbano com base no diagrama fundamental macroscópico

Proponente/coordenador: Prof. Rodrigo Castelan Carlson, Dr.

Ano de obtenção do título de doutor: 2011

CPF: 029.743.969-33

Instituição executora: Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Grupo de pesquisa (CNPq): Grupo de Pesquisa em Automação e Sistemas – GPAS – UFSC

Instituições parceiras: Universidade Técnica de Creta

Empresas parceiras: Brascontrol Indústria e Comércio LTDA.

Duração do projeto: 36 meses

Natureza do projeto: Pesquisa tecnológica

Faixa: A

Recurso solicitado: R\$ 29.695,75

2. CARACTERIZAÇÃO

O contínuo crescimento do número de veículos em circulação e a constante expansão das áreas metropolitanas levaram ao aparecimento diário de congestionamentos. As consequências sociais e econômicas dos congestionamentos são enormes: atraso veicular, redução da segurança no tráfego, estresse, desperdício de combustível e poluição ambiental. Nos Estados Unidos, por exemplo, os custos decorrentes de congestionamentos em áreas urbanas em 2009 ultrapassaram os US\$ 115 bilhões (SCHRANK; LOMAX; TURNER, 2010). Já na Europa, estima-se que se medidas drásticas não forem tomadas, os custos decorrentes de congestionamentos aumentarão significativamente, atingindo a cifra de € 200 bilhões por ano em 2050 (EUROPEAN COMMISSION, 2011). No Brasil, cerca de 35 % da população brasileira enfrenta congestionamentos diariamente (IPEA, 2011). No caso do sistema viário, é sabido que a mera expansão da infraestrutura não é a solução definitiva para estes problemas. Por outro lado, é comprovado que medidas de controle adequadas podem gerar melhorias significativas nas condições de tráfego (PAPAGEORGIOU et al., 2003). O desenvolvimento destas estratégias de controle depende da correta modelagem do sistema de tráfego urbano e do uso de ferramentas adequadas da teoria de controle e disciplinas correlatas.

Desde a década de 1960 pesquisadores procuram estabelecer teorias que descrevem o comportamento agregado do tráfego em cidades (GEROLIMINIS; DAGANZO, 2008). Daganzo (2007) propôs o primeiro modelo macroscópico capaz de descrever o comportamento do tráfego nos

horários de pico. De acordo com o modelo de Daganzo a taxa com que veículos deixam a malha viária estava relacionada com o número de veículos na malha viária (acumulação). Posteriormente, Geroliminis e Daganzo (2007) reformularam a teoria e estabeleceram que: (i) regiões homogeneamente congestionadas possuem um Diagrama Fundamental Macroscópico (DFM) que relaciona a produção com a acumulação de uma malha viária, e (ii) a taxa com que veículos deixam a malha viária é proporcional à produção. Em 2008 a existência do DFM foi verificada para a região central da cidade de Yokohama no Japão com base em dados de campo coletados de laços indutivos e complementada com dados coletados de veículos equipados com GPS da frota de táxis (GEROLIMINIS; DAGANZO, 2008).

Desde a publicação do trabalho de Geroliminis e Daganzo (2008) diversos pesquisadores (BUISSON; LADIER, 2009; DAGANZO; GAYAH; GONZALES, 2011; DAGANZO; GEROLIMINIS, 2008; GEROLIMINIS; SUN, 2011; HELBING, 2009; JI et al., 2010; LAVAL, 2010) vêm investigando as condições para a existência e os aspectos que afetam a forma do diagrama: homogeneidade da distribuição do fluxo, posicionamento dos detectores veiculares, tipo de via, etc. Embora alguns estudos tenham avaliado também o efeito do controle de tráfego, eles se limitaram a dados de campo obtidos sob controle a tempos fixos (BUISSON; LADIER, 2009; LAVAL, 2010), enquanto estudos envolvendo controle em tempo real basearam-se principalmente em dados de simulação (JONG, 2012; LAVAL, 2010; ZHANG; GARONI; DE GIER, 2013).

Este trabalho consiste primeiramente em verificar a existência e estudar o efeito do controle de tráfego no DFM com base nos dados de campo de duas cidades brasileiras, Macaé/RJ e Mauá/SP. Os dados de campo foram coletados tanto com controle a tempos fixos como sob a operação de controle em tempo real. A estratégia de controle usada em Macaé foi a TUC, que calcula em tempo real os valores de tempos de verde, de ciclo e de defasagem (KRAUS et al., 2010). Em Mauá foi utilizada uma estratégia híbrida, com os módulos de controle de ciclo e de defasagem da TUC e o controle dos tempos de verdes realizado por uma técnica baseada no método de Webster (PECCIN, 2009).

A importância da análise proposta reside no fato que o DFM vem sendo usado para derivação de leis de controle perimétrico de malhas viárias (ABOUDOLAS; GEROLIMINIS, 2013; GEROLIMINIS; HADDAD; RAMEZANI, 2013; KEYVAN-EKBATANI et al., 2012), porém sem um conhecimento adequado de como o DFM é afetado pelo controle interno à malha. Espera-se que os resultados desta análise deem subsídios para a compreensão do comportamento agregado do tráfego via DFM sujeito ao controle de tráfego, tanto a tempos fixos como em tempo real, e para a derivação de novas ferramentas de análise e de novas estratégias de controle. Será a primeira vez que um estudo envolvendo o DFM é conduzido com dados de cidades brasileiras, que podem também revelar diferenças em relação às cidades de outros países em virtude de diferenças culturais, da frota, legais e da infraestrutura que afetam o comportamento dos motoristas.

Com base nestes resultados e nos dados de campo, pretende-se reproduzir o comportamento em um ambiente de microsimulação de tráfego (TRANSPORT SIMULATION SYSTEMS, 2012) que

será usado no projeto para o teste e desenvolvimento de estratégias de controle de tráfego urbano do tipo controle perimétrico, tanto monvariável como multivariável (para múltiplas regiões). Resultados recentes em simulação de uma malha viária real indicam que melhorias significativas podem ser obtidas no desempenho do tráfego, como aumento nas velocidades médias em cerca de 30% (KEYVAN-EKBATANI et al., 2012).

O projeto será concluído com a aplicação das ferramentas de análise desenvolvidas na avaliação de um estratégia de controle que está sendo implantada na Baixada Santista. A viabilidade de utilização das estratégias de controle perimétrico propostas na Baixada Santista também será avaliada.

3. OBJETIVOS E RESULTADOS ESPERADOS

3.1. Objetivo Geral

Desenvolver ferramentas de análise e estratégias de controle de tráfego urbano baseadas no DFM.

3.2. Objetivos Específicos

- Verificar a existência do DFM para as duas malhas viárias estudadas.
- Estudar o efeito do controle de tráfego urbano a tempos fixos no DFM.
- Estudar o efeito do controle de tráfego em tempo real no DFM, em particular isolar os efeitos do controle de ciclo, do controle de defasagem e do controle de tempos de verde.
- Comparar o efeito de cada uma das duas estratégias aplicadas, a TUC e a híbrida; em particular, verificar se a distribuição do tráfego resultante da estratégia TUC tende a diminuir a dispersão de dados do DFM comparada à estratégia híbrida.
- Verificar a possibilidade de partição (JI; GEROLIMINIS, 2012) das malhas viárias estudadas e como o controle de tráfego afeta a partição.
- Construir um modelo de simulação microscópico de uma das malhas viárias que reproduza o comportamento agregado do tráfego como observado em campo.
- Desenvolver e testar estratégias de controle de tráfego urbano para malhas viárias simples (monovariável).
- Desenvolver e testar estratégias de controle de tráfego urbano para malhas viárias particionadas (multivariável).
- Avaliar o desempenho do sistema instalado na Baixada Santista com as ferramentas desenvolvidas.
- Avaliar a viabilidade de utilizar as estratégias de controle desenvolvidas na Baixada Santista.

4. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho são considerados os conjuntos de dados diários para cada malha viária registrados em bancos de dados. Assim, cada dia registrado no banco de dados terá que ser analisado individualmente por meio das séries temporais de fluxo e de ocupação para excluir dias em que houve falha na coleta de dados, dias que apresentam anormalidades, por exemplo em virtude de incidentes ou condições meteorológicas adversas, e não existência de congestionamento (demanda baixa). Os dados também serão classificados conforme o dia da semana em que foram coletados, período (letivo, não letivo), tipo de operação (a tempos fixos, em tempo real). Além das medições também serão extraídos os planos de tráfego que vigoraram no período da coleta.

Após a filtragem dos dados de campo o procedimento adotado será semelhante ao de Geroliminis e Daganzo (2008) baseada na construção dos DFMs, da série temporal de fluxo e da série temporal de ocupação para cada conjunto de dados, e da análise estatística dos dados. Como deseja-se estudar o efeito do controle de tráfego, a variabilidade dos diagramas será estudada com base nas temporizações semaforicas coletadas tanto de tempo fixo como de tempo real. Serão tomadas como base as metodologias de Buisson e Ladier (2009), Laval (2010) e Jong (2012).

A construção do modelo da malha viária no simulador é feita conforme o manual do programa (TRANSPORT SIMULATION SYSTEMS, 2012). Será construído o modelo apenas da malha viária que apresentar os melhores resultados com os dados de campo. Não há método padrão para a calibração e validação, mas será seguida uma coletânea de diretrizes elaboradas por diferentes instituições e disponibilizadas pelo projeto MULTITUDE (<http://www.multitude-project.eu/>).

O desenvolvimento das estratégias de controle seguirá a metodologia tradicional de projeto estabelecida pela engenharia de controle (SEBORG; EDGAR; MELLICHAMP, 1989). Será tomado como base o modelo de tráfego desenvolvido e utilizado por (KEYVAN-EKBATANI et al., 2012), com as devidas modificações resultantes da análise de dados feita neste projeto.

Por fim a metodologia a ser empregada na avaliação do desempenho do sistema de controle de tráfego na Baixada Santista vai depender das ferramentas desenvolvidas na parte inicial deste projeto. Igualmente a avaliação de viabilidade de aplicação das estratégias de controle dependerá da forma de aplicação das estratégias desenvolvidas.

5. CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS E TECNOLÓGICAS

São os principais resultados esperados deste projeto:

- 1) Ferramentas de análise de desempenho de sistemas de controle de tráfego urbano baseados no DFM como resultado da análise de dados de campo.
- 2) Estratégias de controle de tráfego urbano aplicáveis na prática baseadas no DFM, com as quais espera-se obter melhorias significativas de desempenho do tráfego urbano.

3) Modelo de malha viária calibrado e validado em simulador de tráfego microscópico que reproduz o comportamento agregado do tráfego como observado em campo e servirá de base para estudos futuros.

4) Análise de desempenho e viabilidade do controle na Baixada Santista.

Além disso espera-se produzir:

- 1) 2 artigos em conferência nacional;
- 2) 2 artigos em conferência internacional;
- 3) Trabalhos em seminários de iniciação científica;
- 4) 2 artigos em periódicos internacionais;
- 5) 1 relatório de projeto.

6. ORÇAMENTO DETALHADO, OUTRAS FONTES DE RECURSOS E CRONOGRAMA FÍSICO-FINANCEIRO

6.1. Orçamento Detalhado

CUSTEIO			
Item	Quantidade	Valor unitário	Valor final
Passagem para participação em congresso nacional	5	R\$ 800,00	R\$ 4.000,00
Diárias para participação em congresso nacional	25	R\$ 187,83	R\$ 4.695,75
CAPITAL			
Item	Quantidade	Valor unitário	Valor final
Licença de <i>software</i> micros simulador de tráfego AIMSUN. Inclui atualização automática e suporte técnico pela duração do projeto (3 anos).	2	R\$ 10.500,00	R\$ 21.000,00
TOTAL:			R\$ 29.695,75

6.2. Outras Fontes de Recursos

Recursos financeiros adicionais, ainda a serem definidos, serão obtidos por meio de projeto de pesquisa relacionado a este, envolvendo a instalação de sistema de controle de tráfego em tempo real na Baixada Santista do qual a UFSC é detentora da propriedade junto com a Brascontrol Indústria e Comércio LTDA.

Um plano de atividades relacionado a este projeto foi submetido para a chamada do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Pesquisa Científica (PIBIC/CNPq – PIBIC-Af/CNPq – BIPI/UFSC) 2013/2014.

6.3. Cronograma Físico-Financeiro

Atividade	Mês																																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
Coleta, Filtragem e preparação de dados	■	■	■	■	■	■	■	■																														
Análise de dados						■	■	■	■	■	■	■	■	■																								
Modelagem, calibração e validação											■	■	■	■	■	■																						
Análise, projeto e teste de controle monovariável															■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■											
Análise, projeto e teste de controle multivariável															■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■											
Análise de desempenho da Baixada Santista																										■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Viabilidade de controle perimétrico na Baixada Santista																										■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Redação de artigo ou relatório												■	■						■	■						■	■						■	■	■	■	■	
Desembolso	Mês 1																	Mês 18-20					Mês 28-30															
	R\$ 21.000,00																	R\$ 5217,45					R\$ 3478,30															

7. EQUIPE E INFRAESTRUTURA

7.1. Equipe

A equipe será formada por alunos de graduação e de pós-graduação, e por professores pesquisadores do Centro de Engenharias da Mobilidade (Campus Joinville), e do Departamento de Automação e Sistemas e do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Automação e Sistemas (Campus Florianópolis) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Nome	Cargo
Rodrigo Castelan Carlson (coordenador)	Professor Adjunto
Werner Kraus Junior	Professor Associado
Rodolfo César Costa Flesch	Professor Adjunto
Eduardo Rauh Müller	Doutorando
Aluno de pós-graduação	Mestrando
Aluno de graduação	Iniciação científica

O projeto será realizado com cooperação do Laboratório de Sistemas Dinâmicos e Simulação (DSSL) do Departamento de Engenharia de Produção e Gerência da Universidade Técnica de Creta (TUC). A UFSC possui parceria com o DSSL/TUC desde 2004 que resultou no sistema de controle de tráfego instalado nas cidades de Macaé/RJ e Mauá/SP, e a ser instalado na Baixada Santista.

Nome	Cargo
Markos Papageorgiou	<i>Professor</i> (equivalente a Professor Titular)
Mehdi Keyvan-Ekbatani	Doutorando

Um outro projeto de pesquisa relacionado a este está sendo estabelecido entre a UFSC e Brascontrol Indústria e Comércio LTDA envolvendo a instalação de sistema de controle de tráfego em tempo real na Baixada Santista do qual a UFSC é detentora da propriedade junto com a empresa. O coordenador do projeto será o professor Werner Kraus Junior.

Nome	Cargo
Tiago Corrêa	Engenheiro de Pesquisa e Desenvolvimento

7.2. Infraestrutura

As instalações do Centro de Engenharias da Mobilidade do Campus Joinville, do Departamento de Automação e Sistemas de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Automação e Sistemas oferecem laboratórios de informática com condições de trabalho para os pesquisadores e alunos envolvidos no projeto.

Além disso a execução deste projeto depende de:

- 1) **Dados de campo das cidades de Macaé/RJ e Mauá/SP:** os dados de campo da cidade de Macaé já estão disponíveis em uma cópia do banco de dados do período de meados de

2008 a meados de 2010. Como a central de controle de tráfego foi desligada, não há disponibilidade de novos dados. Temos acesso direto ao banco de dados da central de controle de tráfego de Mauá. Uma cópia do banco de dados pode ser feita a qualquer momento para se trabalhar *offline*.

- 2) **Sistema de banco de dados MySQL:** o MySQL é usado nas centrais de controle de tráfego de Macaé e Mauá, e é necessário para manipular as cópias dos bancos de dados das centrais. Trata-se de *software* de código aberto que pode ser obtido gratuitamente pela internet: <http://www.mysql.com>.
- 3) **Simulador de tráfego AIMSUN:** duas licenças de software e respectivas chaves de *hardware* serão adquiridas com recursos do projeto.
- 4) **Material bibliográfico:** o material necessário pode ser acessado pela rede UFSC ou em alguns casos adquirido pelo serviço de comutação bibliográfica.
- 5) **Dados da Baixada Santista:** serão disponibilizados pela empresa parceira Brascontrol Indústria e Comércio LTDA também envolvida em projeto correlato dedicado exclusivamente à Baixada Santista.

REFERÊNCIAS

ABOUDOLAS, K.; GEROLIMINIS, N. **Feedback perimeter control for multiregion and heterogeneous congested cities.** In: TRB 92nd annual meeting. Washington, D.C., USA: 2013.

BUISSON, C.; LADIER, C. Exploring the impact of homogeneity of traffic measurements on the existence of macroscopic fundamental diagrams. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2124, p. 127–136, 2009.

DAGANZO, C. F. Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 41, n. 1, p. 49–62, 2007.

DAGANZO, C. F.; GAYAH, V. V.; GONZALES, E. J. Macroscopic relations of urban traffic variables: bifurcations, multivaluedness and instability. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 45, n. 1, p. 278–288, 2011.

DAGANZO, C. F.; GEROLIMINIS, N. An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 42, n. 9, p. 771–781, 2008.

EUROPEAN COMMISSION. **Roadmap to a single European transport area – towards a competitive and resource efficient transport system.** Brussels, Belgium: European Commission, 2011.

GEROLIMINIS, N.; DAGANZO, C. F. **Macroscopic Modeling of Traffic in Cities.** In: TRB 86th Annual Meeting Compendium of Papers CD-ROM. Washington, D.C., USA: 2007.

GEROLIMINIS, N.; DAGANZO, C. F. Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: some experimental findings. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 42, n. 9, p. 759–770, 2008.

GEROLIMINIS, N.; HADDAD, J.; RAMEZANI, M. Optimal perimeter control for two urban regions with macroscopic fundamental diagrams: a model predictive approach. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 14, n. 1, p. 348–359, 2013.

GEROLIMINIS, N.; SUN, J. Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 45, n. 3, p. 605–617, 2011.

HELBING, D. Derivation of a fundamental diagram for urban traffic flow. **The European Physical Journal B**, v. 70, n. 2, p. 229–241, 2009.

IPEA. **Sistema de Indicadores de Percepção Social - Mobilidade Urbana**. IPEA, 2011.

JI, Y. et al. Investigating the shape of the macroscopic fundamental diagram using simulation data. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2161, p. 40–48, 2010.

JI, Y.; GEROLIMINIS, N. On the spatial partitioning of urban transportation networks. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 46, n. 10, p. 1639–1656, 2012.

JONG, D. DE. **The effect of network structure and signal settings on the macroscopic fundamental diagram**. MSc Thesis—Delft, The Netherlands: Delft University of Technology, 2012.

KEYVAN-EKBATANI, M. et al. Exploiting the fundamental diagram of urban networks for feedback-based gating. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 46, n. 10, p. 1393–1403, 2012.

KRAUS, W. et al. Cost Effective Real-Time Traffic Signal Control Using the TUC Strategy. **IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine**, v. 2, n. 4, p. 6–17, 2010.

LAVAL, J. A. **The effect of signal timing and network irregularities in the macroscopic fundamental diagram**. In: Traffic Flow Theory and Characteristics Committee (Ahh45) Summer Meeting of the Transportation Research Board. Annecy: 2010.

PAPAGEORGIU, M. et al. Review of road traffic control strategies. **Proceedings of the IEEE**, v. 91, n. 12, p. 2043–2067, 2003.

PECCIN, V. B. **Implantação de Sistema de Controle de Tráfego em Tempo Real de Cruzamentos Isolados**. Diploma—Florianópolis, SC, Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

SCHRANK, D.; LOMAX, T.; TURNER, S. **Urban Mobility Report 2010**. Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, 2010. Disponível em: <<http://mobility.tamu.edu>>. Acesso em: 22 maio 2011.

SEBORG, D.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. **Process Dynamics and Control**. New York: Wiley, 1989.

TRANSPORT SIMULATION SYSTEMS. **AIMSUN Dynamic Simulator Users Manual v. 7**, 2012.

ZHANG, L.; GARONI, T. M.; DE GIER, J. A comparative study of macroscopic fundamental diagrams of arterial road networks governed by adaptive traffic signal systems. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 49, p. 1–23, 2013.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
CENTRO DE ENGENHARIAS DA MOBILIDADE

ANÁLISE E CONTROLE EM TEMPO REAL DE SISTEMAS DE TRÁFEGO URBANO
COM BASE NO DIAGRAMA FUNDAMENTAL MACROSCÓPICO

Proposta para a Chamada Universal
MCTI/CNPq Nº 14/2013

Rodrigo Castelan Carlson

Joinville, maio de 2013

ANÁLISE E CONTROLE EM TEMPO REAL DE SISTEMAS DE TRÁFEGO URBANO COM BASE NO DIAGRAMA FUNDAMENTAL MACROSCÓPICO

Proposta para a Chamada Universal
MCTI/CNPq N° 14/2013

Rodrigo Castelan Carlson

RESUMO: Desde a década de 1960 pesquisadores procuram estabelecer teorias que descrevem o comportamento agregado do tráfego em cidades. Como resultado de mais de quatro décadas de estudos surgiu o conceito de Diagrama Fundamental Macroscópico (DFM) que relaciona a produção de uma malha viária urbana com a acumulação de veículos em suas vias. Em 2008 a existência do DFM foi verificada para a região central da cidade de Yokohama no Japão com base em dados de campo. Desde então diversos pesquisadores vêm investigando as condições para a existência e os aspectos que afetam a forma do diagrama: homogeneidade da distribuição do fluxo, posicionamento dos detectores veiculares, tipo de via, etc. Embora alguns estudos tenham avaliado também o efeito do controle de tráfego, eles se limitaram a dados de campo obtidos sob controle a tempos fixos, enquanto estudos envolvendo controle em tempo real basearam-se principalmente em dados de simulação. Este trabalho consiste primeiramente em verificar a existência e estudar o efeito do controle de tráfego no DFM com base nos dados de campo de duas cidades brasileiras, Macaé/RJ e Mauá/SP. Os dados de campo foram coletados tanto com controle a tempos fixos como sob a operação de controle em tempo real. A importância desta análise reside no fato que o DFM vem sendo usado para derivação de leis de controle perimétrico de malhas viárias, porém sem um conhecimento adequado de como o DFM é afetado pelo controle interno à malha. Espera-se que os resultados desta análise deem subsídios para a compreensão do comportamento agregado do tráfego via DFM sujeito ao controle de tráfego, tanto a tempos fixos como em tempo real, e para a derivação de ferramentas de análise e de novas estratégias de controle. Com base nestes resultados e nos dados de campo, pretende-se reproduzir o comportamento em ambiente de microsimulação de tráfego que será usado para o teste e desenvolvimento de estratégias de controle de tráfego urbano. Um estudo de viabilidade dos métodos propostos será realizado para a Baixada Santista onde um sistema de controle de tráfego em tempo real está sendo instalado. Trabalhos recentes mostram que estratégias de controle baseadas no conceito de DFM podem obter melhorias nos atrasos e nas velocidades médias de malhas viárias urbanas em cerca de 30%.

PALAVRAS CHAVE: diagrama fundamental macroscópico, tráfego urbano, controle de tráfego

1. IDENTIFICAÇÃO DA PROPOSTA

Título do projeto: Análise e controle em tempo real de sistemas de tráfego urbano com base no diagrama fundamental macroscópico

Proponente/coordenador: Prof. Rodrigo Castelan Carlson, Dr.

Ano de obtenção do título de doutor: 2011

CPF: 029.743.969-33

Instituição executora: Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Grupo de pesquisa (CNPq): Grupo de Pesquisa em Automação e Sistemas – GPAS – UFSC

Instituições parceiras: Universidade Técnica de Creta

Empresas parceiras: Brascontrol Indústria e Comércio LTDA.

Duração do projeto: 36 meses

Natureza do projeto: Pesquisa tecnológica

Faixa: A

Recurso solicitado: R\$ 29.695,75

2. CARACTERIZAÇÃO

O contínuo crescimento do número de veículos em circulação e a constante expansão das áreas metropolitanas levaram ao aparecimento diário de congestionamentos. As consequências sociais e econômicas dos congestionamentos são enormes: atraso veicular, redução da segurança no tráfego, estresse, desperdício de combustível e poluição ambiental. Nos Estados Unidos, por exemplo, os custos decorrentes de congestionamentos em áreas urbanas em 2009 ultrapassaram os US\$ 115 bilhões (SCHRANK; LOMAX; TURNER, 2010). Já na Europa, estima-se que se medidas drásticas não forem tomadas, os custos decorrentes de congestionamentos aumentarão significativamente, atingindo a cifra de € 200 bilhões por ano em 2050 (EUROPEAN COMMISSION, 2011). No Brasil, cerca de 35 % da população brasileira enfrenta congestionamentos diariamente (IPEA, 2011). No caso do sistema viário, é sabido que a mera expansão da infraestrutura não é a solução definitiva para estes problemas. Por outro lado, é comprovado que medidas de controle adequadas podem gerar melhorias significativas nas condições de tráfego (PAPAGEORGIOU et al., 2003). O desenvolvimento destas estratégias de controle depende da correta modelagem do sistema de tráfego urbano e do uso de ferramentas adequadas da teoria de controle e disciplinas correlatas.

Desde a década de 1960 pesquisadores procuram estabelecer teorias que descrevem o comportamento agregado do tráfego em cidades (GEROLIMINIS; DAGANZO, 2008). Daganzo (2007) propôs o primeiro modelo macroscópico capaz de descrever o comportamento do tráfego nos

horários de pico. De acordo com o modelo de Daganzo a taxa com que veículos deixam a malha viária estava relacionada com o número de veículos na malha viária (acumulação). Posteriormente, Geroliminis e Daganzo (2007) reformularam a teoria e estabeleceram que: (i) regiões homogeneamente congestionadas possuem um Diagrama Fundamental Macroscópico (DFM) que relaciona a produção com a acumulação de uma malha viária, e (ii) a taxa com que veículos deixam a malha viária é proporcional à produção. Em 2008 a existência do DFM foi verificada para a região central da cidade de Yokohama no Japão com base em dados de campo coletados de laços indutivos e complementada com dados coletados de veículos equipados com GPS da frota de táxis (GEROLIMINIS; DAGANZO, 2008).

Desde a publicação do trabalho de Geroliminis e Daganzo (2008) diversos pesquisadores (BUISSON; LADIER, 2009; DAGANZO; GAYAH; GONZALES, 2011; DAGANZO; GEROLIMINIS, 2008; GEROLIMINIS; SUN, 2011; HELBING, 2009; JI et al., 2010; LAVAL, 2010) vêm investigando as condições para a existência e os aspectos que afetam a forma do diagrama: homogeneidade da distribuição do fluxo, posicionamento dos detectores veiculares, tipo de via, etc. Embora alguns estudos tenham avaliado também o efeito do controle de tráfego, eles se limitaram a dados de campo obtidos sob controle a tempos fixos (BUISSON; LADIER, 2009; LAVAL, 2010), enquanto estudos envolvendo controle em tempo real basearam-se principalmente em dados de simulação (JONG, 2012; LAVAL, 2010; ZHANG; GARONI; DE GIER, 2013).

Este trabalho consiste primeiramente em verificar a existência e estudar o efeito do controle de tráfego no DFM com base nos dados de campo de duas cidades brasileiras, Macaé/RJ e Mauá/SP. Os dados de campo foram coletados tanto com controle a tempos fixos como sob a operação de controle em tempo real. A estratégia de controle usada em Macaé foi a TUC, que calcula em tempo real os valores de tempos de verde, de ciclo e de defasagem (KRAUS et al., 2010). Em Mauá foi utilizada uma estratégia híbrida, com os módulos de controle de ciclo e de defasagem da TUC e o controle dos tempos de verdes realizado por uma técnica baseada no método de Webster (PECCIN, 2009).

A importância da análise proposta reside no fato que o DFM vem sendo usado para derivação de leis de controle perimétrico de malhas viárias (ABOUDOLAS; GEROLIMINIS, 2013; GEROLIMINIS; HADDAD; RAMEZANI, 2013; KEYVAN-EKBATANI et al., 2012), porém sem um conhecimento adequado de como o DFM é afetado pelo controle interno à malha. Espera-se que os resultados desta análise deem subsídios para a compreensão do comportamento agregado do tráfego via DFM sujeito ao controle de tráfego, tanto a tempos fixos como em tempo real, e para a derivação de novas ferramentas de análise e de novas estratégias de controle. Será a primeira vez que um estudo envolvendo o DFM é conduzido com dados de cidades brasileiras, que podem também revelar diferenças em relação às cidades de outros países em virtude de diferenças culturais, da frota, legais e da infraestrutura que afetam o comportamento dos motoristas.

Com base nestes resultados e nos dados de campo, pretende-se reproduzir o comportamento em um ambiente de microsimulação de tráfego (TRANSPORT SIMULATION SYSTEMS, 2012) que

será usado no projeto para o teste e desenvolvimento de estratégias de controle de tráfego urbano do tipo controle perimétrico, tanto monvariável como multivariável (para múltiplas regiões). Resultados recentes em simulação de uma malha viária real indicam que melhorias significativas podem ser obtidas no desempenho do tráfego, como aumento nas velocidades médias em cerca de 30% (KEYVAN-EKBATANI et al., 2012).

O projeto será concluído com a aplicação das ferramentas de análise desenvolvidas na avaliação de um estratégia de controle que está sendo implantada na Baixada Santista. A viabilidade de utilização das estratégias de controle perimétrico propostas na Baixada Santista também será avaliada.

3. OBJETIVOS E RESULTADOS ESPERADOS

3.1. Objetivo Geral

Desenvolver ferramentas de análise e estratégias de controle de tráfego urbano baseadas no DFM.

3.2. Objetivos Específicos

- Verificar a existência do DFM para as duas malhas viárias estudadas.
- Estudar o efeito do controle de tráfego urbano a tempos fixos no DFM.
- Estudar o efeito do controle de tráfego em tempo real no DFM, em particular isolar os efeitos do controle de ciclo, do controle de defasagem e do controle de tempos de verde.
- Comparar o efeito de cada uma das duas estratégias aplicadas, a TUC e a híbrida; em particular, verificar se a distribuição do tráfego resultante da estratégia TUC tende a diminuir a dispersão de dados do DFM comparada à estratégia híbrida.
- Verificar a possibilidade de partição (JI; GEROLIMINIS, 2012) das malhas viárias estudadas e como o controle de tráfego afeta a partição.
- Construir um modelo de simulação microscópico de uma das malhas viárias que reproduza o comportamento agregado do tráfego como observado em campo.
- Desenvolver e testar estratégias de controle de tráfego urbano para malhas viárias simples (monovariável).
- Desenvolver e testar estratégias de controle de tráfego urbano para malhas viárias particionadas (multivariável).
- Avaliar o desempenho do sistema instalado na Baixada Santista com as ferramentas desenvolvidas.
- Avaliar a viabilidade de utilizar as estratégias de controle desenvolvidas na Baixada Santista.

4. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho são considerados os conjuntos de dados diários para cada malha viária registrados em bancos de dados. Assim, cada dia registrado no banco de dados terá que ser analisado individualmente por meio das séries temporais de fluxo e de ocupação para excluir dias em que houve falha na coleta de dados, dias que apresentam anormalidades, por exemplo em virtude de incidentes ou condições meteorológicas adversas, e não existência de congestionamento (demanda baixa). Os dados também serão classificados conforme o dia da semana em que foram coletados, período (letivo, não letivo), tipo de operação (a tempos fixos, em tempo real). Além das medições também serão extraídos os planos de tráfego que vigoraram no período da coleta.

Após a filtragem dos dados de campo o procedimento adotado será semelhante ao de Geroliminis e Daganzo (2008) baseada na construção dos DFMs, da série temporal de fluxo e da série temporal de ocupação para cada conjunto de dados, e da análise estatística dos dados. Como deseja-se estudar o efeito do controle de tráfego, a variabilidade dos diagramas será estudada com base nas temporizações semaforicas coletadas tanto de tempo fixo como de tempo real. Serão tomadas como base as metodologias de Buisson e Ladier (2009), Laval (2010) e Jong (2012).

A construção do modelo da malha viária no simulador é feita conforme o manual do programa (TRANSPORT SIMULATION SYSTEMS, 2012). Será construído o modelo apenas da malha viária que apresentar os melhores resultados com os dados de campo. Não há método padrão para a calibração e validação, mas será seguida uma coletânea de diretrizes elaboradas por diferentes instituições e disponibilizadas pelo projeto MULTITUDE (<http://www.multitude-project.eu/>).

O desenvolvimento das estratégias de controle seguirá a metodologia tradicional de projeto estabelecida pela engenharia de controle (SEBORG; EDGAR; MELLICHAMP, 1989). Será tomado como base o modelo de tráfego desenvolvido e utilizado por (KEYVAN-EKBATANI et al., 2012), com as devidas modificações resultantes da análise de dados feita neste projeto.

Por fim a metodologia a ser empregada na avaliação do desempenho do sistema de controle de tráfego na Baixada Santista vai depender das ferramentas desenvolvidas na parte inicial deste projeto. Igualmente a avaliação de viabilidade de aplicação das estratégias de controle dependerá da forma de aplicação das estratégias desenvolvidas.

5. CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS E TECNOLÓGICAS

São os principais resultados esperados deste projeto:

- 1) Ferramentas de análise de desempenho de sistemas de controle de tráfego urbano baseados no DFM como resultado da análise de dados de campo.
- 2) Estratégias de controle de tráfego urbano aplicáveis na prática baseadas no DFM, com as quais espera-se obter melhorias significativas de desempenho do tráfego urbano.

3) Modelo de malha viária calibrado e validado em simulador de tráfego microscópico que reproduz o comportamento agregado do tráfego como observado em campo e servirá de base para estudos futuros.

4) Análise de desempenho e viabilidade do controle na Baixada Santista.

Além disso espera-se produzir:

- 1) 2 artigos em conferência nacional;
- 2) 2 artigos em conferência internacional;
- 3) Trabalhos em seminários de iniciação científica;
- 4) 2 artigos em periódicos internacionais;
- 5) 1 relatório de projeto.

6. ORÇAMENTO DETALHADO, OUTRAS FONTES DE RECURSOS E CRONOGRAMA FÍSICO-FINANCEIRO

6.1. Orçamento Detalhado

CUSTEIO			
Item	Quantidade	Valor unitário	Valor final
Passagem para participação em congresso nacional	5	R\$ 800,00	R\$ 4.000,00
Diárias para participação em congresso nacional	25	R\$ 187,83	R\$ 4.695,75
CAPITAL			
Item	Quantidade	Valor unitário	Valor final
Licença de <i>software</i> micros simulador de tráfego AIMSUN. Inclui atualização automática e suporte técnico pela duração do projeto (3 anos).	2	R\$ 10.500,00	R\$ 21.000,00
TOTAL:			R\$ 29.695,75

6.2. Outras Fontes de Recursos

Recursos financeiros adicionais, ainda a serem definidos, serão obtidos por meio de projeto de pesquisa relacionado a este, envolvendo a instalação de sistema de controle de tráfego em tempo real na Baixada Santista do qual a UFSC é detentora da propriedade junto com a Brascontrol Indústria e Comércio LTDA.

Um plano de atividades relacionado a este projeto foi submetido para a chamada do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Pesquisa Científica (PIBIC/CNPq – PIBIC-Af/CNPq – BIPI/UFSC) 2013/2014.

6.3. Cronograma Físico-Financeiro

Atividade	Mês																																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
Coleta, Filtragem e preparação de dados	■	■	■	■	■	■	■	■																														
Análise de dados						■	■	■	■	■	■	■	■	■																								
Modelagem, calibração e validação											■	■	■	■	■	■																						
Análise, projeto e teste de controle monovariável															■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■											
Análise, projeto e teste de controle multivariável															■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■											
Análise de desempenho da Baixada Santista																										■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Viabilidade de controle perimétrico na Baixada Santista																										■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Redação de artigo ou relatório												■	■						■	■						■	■						■	■	■	■	■	
Desembolso	Mês 1																	Mês 18-20					Mês 28-30															
	R\$ 21.000,00																	R\$ 5217,45					R\$ 3478,30															

7. EQUIPE E INFRAESTRUTURA

7.1. Equipe

A equipe será formada por alunos de graduação e de pós-graduação, e por professores pesquisadores do Centro de Engenharias da Mobilidade (Campus Joinville), e do Departamento de Automação e Sistemas e do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Automação e Sistemas (Campus Florianópolis) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Nome	Cargo
Rodrigo Castelan Carlson (coordenador)	Professor Adjunto
Werner Kraus Junior	Professor Associado
Rodolfo César Costa Flesch	Professor Adjunto
Eduardo Rauh Müller	Doutorando
Aluno de pós-graduação	Mestrando
Aluno de graduação	Iniciação científica

O projeto será realizado com cooperação do Laboratório de Sistemas Dinâmicos e Simulação (DSSL) do Departamento de Engenharia de Produção e Gerência da Universidade Técnica de Creta (TUC). A UFSC possui parceria com o DSSL/TUC desde 2004 que resultou no sistema de controle de tráfego instalado nas cidades de Macaé/RJ e Mauá/SP, e a ser instalado na Baixada Santista.

Nome	Cargo
Markos Papageorgiou	<i>Professor</i> (equivalente a Professor Titular)
Mehdi Keyvan-Ekbatani	Doutorando

Um outro projeto de pesquisa relacionado a este está sendo estabelecido entre a UFSC e Brascontrol Indústria e Comércio LTDA envolvendo a instalação de sistema de controle de tráfego em tempo real na Baixada Santista do qual a UFSC é detentora da propriedade junto com a empresa. O coordenador do projeto será o professor Werner Kraus Junior.

Nome	Cargo
Tiago Corrêa	Engenheiro de Pesquisa e Desenvolvimento

7.2. Infraestrutura

As instalações do Centro de Engenharias da Mobilidade do Campus Joinville, do Departamento de Automação e Sistemas de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Automação e Sistemas oferecem laboratórios de informática com condições de trabalho para os pesquisadores e alunos envolvidos no projeto.

Além disso a execução deste projeto depende de:

- 1) **Dados de campo das cidades de Macaé/RJ e Mauá/SP:** os dados de campo da cidade de Macaé já estão disponíveis em uma cópia do banco de dados do período de meados de

2008 a meados de 2010. Como a central de controle de tráfego foi desligada, não há disponibilidade de novos dados. Temos acesso direto ao banco de dados da central de controle de tráfego de Mauá. Uma cópia do banco de dados pode ser feita a qualquer momento para se trabalhar *offline*.

- 2) **Sistema de banco de dados MySQL:** o MySQL é usado nas centrais de controle de tráfego de Macaé e Mauá, e é necessário para manipular as cópias dos bancos de dados das centrais. Trata-se de *software* de código aberto que pode ser obtido gratuitamente pela internet: <http://www.mysql.com>.
- 3) **Simulador de tráfego AIMSUN:** duas licenças de software e respectivas chaves de *hardware* serão adquiridas com recursos do projeto.
- 4) **Material bibliográfico:** o material necessário pode ser acessado pela rede UFSC ou em alguns casos adquirido pelo serviço de comutação bibliográfica.
- 5) **Dados da Baixada Santista:** serão disponibilizados pela empresa parceira Brascontrol Indústria e Comércio LTDA também envolvida em projeto correlato dedicado exclusivamente à Baixada Santista.

REFERÊNCIAS

ABOUDOLAS, K.; GEROLIMINIS, N. **Feedback perimeter control for multiregion and heterogeneous congested cities.** In: TRB 92nd annual meeting. Washington, D.C., USA: 2013.

BUISSON, C.; LADIER, C. Exploring the impact of homogeneity of traffic measurements on the existence of macroscopic fundamental diagrams. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2124, p. 127–136, 2009.

DAGANZO, C. F. Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 41, n. 1, p. 49–62, 2007.

DAGANZO, C. F.; GAYAH, V. V.; GONZALES, E. J. Macroscopic relations of urban traffic variables: bifurcations, multivaluedness and instability. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 45, n. 1, p. 278–288, 2011.

DAGANZO, C. F.; GEROLIMINIS, N. An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 42, n. 9, p. 771–781, 2008.

EUROPEAN COMMISSION. **Roadmap to a single European transport area – towards a competitive and resource efficient transport system.** Brussels, Belgium: European Commission, 2011.

GEROLIMINIS, N.; DAGANZO, C. F. **Macroscopic Modeling of Traffic in Cities.** In: TRB 86th Annual Meeting Compendium of Papers CD-ROM. Washington, D.C., USA: 2007.

GEROLIMINIS, N.; DAGANZO, C. F. Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: some experimental findings. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 42, n. 9, p. 759–770, 2008.

GEROLIMINIS, N.; HADDAD, J.; RAMEZANI, M. Optimal perimeter control for two urban regions with macroscopic fundamental diagrams: a model predictive approach. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 14, n. 1, p. 348–359, 2013.

GEROLIMINIS, N.; SUN, J. Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 45, n. 3, p. 605–617, 2011.

HELBING, D. Derivation of a fundamental diagram for urban traffic flow. **The European Physical Journal B**, v. 70, n. 2, p. 229–241, 2009.

IPEA. **Sistema de Indicadores de Percepção Social - Mobilidade Urbana**. IPEA, 2011.

JI, Y. et al. Investigating the shape of the macroscopic fundamental diagram using simulation data. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2161, p. 40–48, 2010.

JI, Y.; GEROLIMINIS, N. On the spatial partitioning of urban transportation networks. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 46, n. 10, p. 1639–1656, 2012.

JONG, D. DE. **The effect of network structure and signal settings on the macroscopic fundamental diagram**. MSc Thesis—Delft, The Netherlands: Delft University of Technology, 2012.

KEYVAN-EKBATANI, M. et al. Exploiting the fundamental diagram of urban networks for feedback-based gating. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 46, n. 10, p. 1393–1403, 2012.

KRAUS, W. et al. Cost Effective Real-Time Traffic Signal Control Using the TUC Strategy. **IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine**, v. 2, n. 4, p. 6–17, 2010.

LAVAL, J. A. **The effect of signal timing and network irregularities in the macroscopic fundamental diagram**. In: Traffic Flow Theory and Characteristics Committee (Ahh45) Summer Meeting of the Transportation Research Board. Annecy: 2010.

PAPAGEORGIOU, M. et al. Review of road traffic control strategies. **Proceedings of the IEEE**, v. 91, n. 12, p. 2043–2067, 2003.

PECCIN, V. B. **Implantação de Sistema de Controle de Tráfego em Tempo Real de Cruzamentos Isolados**. Diploma—Florianópolis, SC, Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

SCHRANK, D.; LOMAX, T.; TURNER, S. **Urban Mobility Report 2010**. Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, 2010. Disponível em: <<http://mobility.tamu.edu>>. Acesso em: 22 maio 2011.

SEBORG, D.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. **Process Dynamics and Control**. New York: Wiley, 1989.

TRANSPORT SIMULATION SYSTEMS. **AIMSUN Dynamic Simulator Users Manual v. 7**, 2012.

ZHANG, L.; GARONI, T. M.; DE GIER, J. A comparative study of macroscopic fundamental diagrams of arterial road networks governed by adaptive traffic signal systems. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 49, p. 1–23, 2013.