

# Uso de Simuladores de Tráfego e Alocação Dinâmica na Previsão de Tráfego de Curto Prazo

*Olímpio Mendes de Barros*

---

## Resumo

Modelos de Previsão de Tráfego são especialmente úteis para uso em Centrais Operacionais na tomada de decisão e na informação ao público. O uso de Simuladores de Tráfego com Alocação Dinâmica tem se mostrado promissor e o uso conjunto e integrado de dados de ITS e BigData abrem um novo campo de pesquisa e aplicação. Informações sobre o tema vem sendo apresentadas em diversos artigos e congressos. Este artigo se propõe a organizar o conhecimento existente até então de modo que o leitor possa usá-lo como base para futuros estudos sobre o tema. O resultado é um texto de fácil compreensão e com diversas referências bibliográficas importantes que podem também servir de base para os estudos futuros.

**Palavras-chave:** Previsão de Tráfego, Alocação Dinâmica de Tráfego, Modelos de Tráfego, Simuladores de Tráfego

## Introdução

A urbanização ocorrida nas últimas décadas no Brasil e ao redor do mundo implicaram no aumento da população das cidades e conseqüentemente na ampliação da demanda por mobilidade. Os modelos de Simulação de Tráfego vem sendo utilizados nas últimas décadas como ferramenta para planejamento urbano e de análise do tráfego.

Novos Sistemas Inteligentes de Transportes, novas tecnologias computacionais, Internet das Coisas, Smartphones, Redes de Comunicação Sem Fio, Redes Sociais e a Inteligência Artificial, entre outros, permitiram novas soluções voltadas às cidades inteligentes (Smart Cities)

A Previsão de Tráfego de Curto Prazo, direcionada à previsão nos próximos minutos ou horas, se mostra possível, além de ser relevante ferramenta de decisão a ser utilizada nos Centros de Gerenciamento Operacional e no apoio às diversas ferramentas de ITS. Os modelos devem ser utilizados em estudos de gargalos e de obras no sistema viário; de modo ativo como ferramenta para definição de estratégias de gestão de demanda do sistema e do transporte público; como ferramenta para análise em tempo real de incidentes e comparação de cenários futuros [1], [2].

Conforme Vlahogianni et al. [1], dentre os desafios existentes estão a previsão de tráfego em redes urbanas, a inclusão da dependência espaço temporal, a inclusão e consideração do impacto das

intempéries e de incidentes, e a sinergia com os modelos teóricos de tráfego.

O tema de Previsão de Tráfego com o uso de modelos tem recebido muita atenção nos últimos anos. Ermagun e Levinson [3] efetuaram uma revisão sistemática das pesquisas relacionadas à Previsão Espaço-temporal de Tráfego e verificaram o crescimento do tema ao longo da última década:

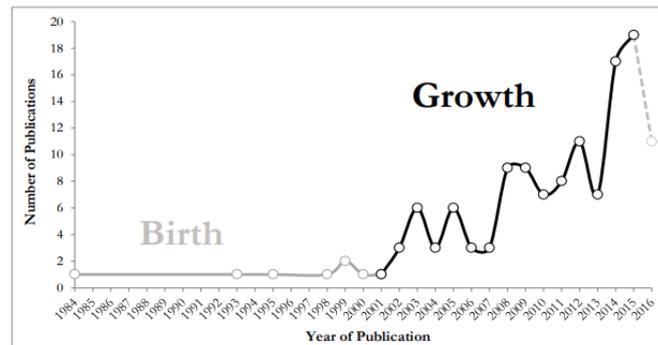


Figura 1 – Evolução das Pesquisas de Previsão Espaço-temporal de Tráfego [3]

Cabe ainda destacar, que na mesma direção, as pesquisas voltadas aos sistemas de apoio aos carros autônomos tem mostrado a necessidade de aprimorar as informações e modelos de tráfego de modo a permitir o melhor desempenho desse novo tipo de veículo. [4]

O objetivo deste artigo é apresentar o tema de modo organizado, apresentando diversas referências bibliográficas importantes e atuais e buscando uma linguagem de fácil entendimento aos que se iniciam nesta área. Com isto pretende-se oferecer ao leitor um entendimento amplo sobre o uso da Alocação Dinâmica em sistemas de Simulação de Tráfego de modo que sirva de base para novas pesquisas e estudos mais específicos, em especial àqueles voltados à Previsão do Fluxo de Tráfego de Curto Prazo.

Este artigo está organizado em 5 seções, sendo iniciado pela Introdução, onde apresentamos a motivação e uma visão geral do tema, na Segunda parte discutimos os Modelos de Simulação de Tráfego em geral, no capítulo 3 são feitas considerações referentes à Previsão de Tráfego de Curto Prazo e na última parte são apresentadas nossas conclusões.

### **Modelos de simulação de tráfego**

Os Modelos de Simulação computacional, de modo geral, consistem em representações matemáticas da realidade e servem para analisar computacionalmente alternativas e comportamentos do sistema modelado.

Os Simuladores de Tráfego começaram a ser desenvolvidos na década de 1950 e buscam representar a utilização das vias pelos veículos e demais usuários a fim de possibilitar o planejamento de situações futuras e análises de novos projetos e soluções de controle de tráfego.

Os simuladores de Tráfego são alimentados com os dados de Oferta (a rede viária e suas características - que definem a capacidade do sistema) e Demanda (desejo de utilização da via normalmente expresso através de matrizes de origem e destino), sendo esta etapa de alimentação do sistema a etapa de maior

esforço pois implica em diversas análises e ajustes das diversas características do modelo a fim de obter uma calibração adequada para representar o sistema que está sendo simulado.

O processo de implementação de um modelo de simulação de tráfego para uso em tempo real, implica em diversas etapas de trabalho. De modo resumido podemos indicar a seguinte sequência proposta por [2]:

- i. Escopo - definir os parâmetros básicos de projeto, e as possíveis utilizações do modelo. Nesta etapa são definidos o tamanho do modelo e sua resolução. e os critérios de performance.
- ii. Coleta de Dados – verificar a disponibilidade dos dados, definir quais informações e a divisão/desagregação temporal pretendida (diária, horária, a cada “x” minutos) e efetuar a coleta dos dados
- iii. Construção do modelo base – elaboração e codificação da rede viária (oferta) e determinação e desagregação das matrizes OD iniciais (demanda).
- iv. Checagem de erros – verificação de erros no código do modelo, testes de estresse do modelo e preparo do modelo para a calibração
- v. Calibração – identificação dos critérios de performance qual o(s) principal(is) critério(s) a ser(em) atendido(s) e os locais que serão calibrados, desenvolver a estratégia de calibração e selecionar a metodologia estatística
- vi. Validar o modelo com dados que não foram utilizados na calibração

#### *Classificação dos Modelos de Simulação*

- i. Os Modelos de Simulação de Tráfego podem ser classificados de diversas formas. A principal classificação está relacionada com sua abordagem e resolução. Quanto maior a resolução maior a complexidade do modelo. [2], [5], [6]
- ii. Macro modelo –O fluxo é tratado como fluido e o modelo segue a base das leis da hidrodinâmica e as equações usadas descrevem o fenômeno das ondas de choque do tráfego. O fluxo é tratado de modo indivisível. Assim os modelos são mais simples e seu processamento mais rápido. São utilizados nos estudos de planejamento de longo prazo e em grandes redes.
- iii. Meso modelo – Modelos de resolução intermediária, onde os usuários podem ser identificados individualmente, mas a dinâmica do tráfego é estudada de modo agregado, onde os pelotões possuem velocidade e comportamento uniforme. Trabalham com base na Teoria da Dispersão de Tráfego. Estes modelos tem recebido grande atenção nas pesquisas dos últimos anos, e tem servido de base para diversos modelos de simulação que trabalham integrados com sistemas em tempo real.
- iv. Micro modelo – De resolução detalhada, tanto quanto necessário à análise pretendida, baseia-se no comportamento individual dos usuários, especialmente no tocante à interação entre os mesmos (carro seguidor e mudança de faixas). Utilizado nas análises de trechos de via e pequenas áreas simulando o comportamento dos usuários com relação às alterações nos sistemas de controle

como semáforos e rotatórias.

- v. Multi-Resolução – Tem sido usado mais recentemente e consiste na utilização conjunta e integrada das 3 abordagens anteriores. De modo geral a manipulação dos padrões de viagens é feita em nível macroscópico, o comportamento do usuário é analisado no modelo mesoscópico e em resolução microscópica são verificados os impactos das estratégias de controle de intersecções.

### *Oferta*

A Oferta é caracterizada pela rede viária disponível. Os simuladores utilizam-se de mapas digitais que representam essa rede, com seus links e nós. Os links são os trechos de via e devem ser caracterizados a fim de possibilitar a definição de sua capacidade e das características que definem a relação entre fluxo, velocidade e densidade, possibilitando assim análises de tempo de percurso e outros custos associados. Os nós, são os encontros de dois ou mais links e podem ser dotados de sistema de controle como placas “Pare” e “Dê a Preferência” ou semáforos. Normalmente é nos nós onde se verificam atrasos que impactam a fluidez causando filas e eventuais congestionamentos, seja em decorrência da forma de controle do tráfego, seja em decorrência da redução da capacidade dos links que recebem o tráfego de saída.

Os micro e em sua maioria os meso modelos são dependentes de informações relativas à programação semafórica e de outros tipos de controle da via. No caso dos cruzamentos semaforizados, o impacto na capacidade de saída de cada link é definida pela temporização e composição dos estágios e também pela sincronização com cruzamentos próximos. No caso dos estudos com alocação dinâmica (onde a evolução natural do tráfego ao longo do tempo impacta na Alocação da Demanda na rede viária fazendo com que esta também varie ao longo do tempo) é importante considerar a variação temporal da programação a fim de manter a coerência com o restante do sistema. Para os semáforos que trabalham de modo atuado e adaptativo, as informações de flutuação da programação devem ser repassadas aos modelos através de integração dos dados. Esta pode ser uma questão complexa especialmente nos casos de sistemas que operam com dados em tempo real, de modo que deve ser avaliada a forma de efetuar esta atualização, já que podem ocorrer variações na programação em períodos de tempo menores do que aqueles para os quais o modelo está programado. Assim, eventualmente devem ser considerados valores médios do período de análise, mantendo-se a coerência com a desagregação temporal dos dados de demanda.

Também devem ser inseridas no modelo outras variações temporais da capacidade como a ativação de faixas reversíveis nos horários de pico, o bloqueio operacional de acessos, a proibição de movimentos de conversão em determinados horários e a proibição de circulação de determinada classe de veículos em horários e locais específicos.

### *A Rede Viária*

A Rede utilizada no processo de simulação deve ser preparada e validada antes do início do processo de

alocação das demandas a fim de evitar que erros na sua configuração causem erros na própria alocação e na calibração do modelo.

Os atributos do mapa base utilizado devem ser revisados de modo detalhado, garantindo a correta conexão dos links e nós, indicando as possibilidades de conversão a partir de um link, a capacidade nominal do link, e características outras que possam influenciar o processo de calibração e o uso do modelo quando em produção. Vias que se cruzam mas não se conectam, como pontes e túneis devem ser avaliadas.

Após a análise da geometria geral do modelo devem ser avaliadas as características físicas de cada link, incluindo ao menos a extensão, quantidade de faixas, existência de estacionamento ao longo da via, tipo de pavimento e capacidade de fluxo. Na mesma direção podem ser indicadas outras características como o posicionamento de paradas de ônibus, polos geradores de tráfego e outras características que possam impactar no “custo generalizado” do link e, conseqüentemente, na alocação do tráfego e na calibração do modelo.

A rede de transportes, tanto transporte público como de cargas, deve ser devidamente apropriada no modelo para possibilitar a análise de uso dos diversos modais e da interação entre os mesmos.

#### *Demanda*

A Demanda é caracterizada pela necessidade de utilização do sistema viário para a mobilidade de pessoas e mercadorias. As Matrizes de Origem e Destino (Matriz OD) são largamente estudadas e utilizadas no planejamento da mobilidade a diversas décadas. Por exemplo, a Companhia do Metropolitano de São Paulo [7] efetua a cada 10 anos, desde 1967, uma pesquisa de Origem e Destino da Região Metropolitana de São Paulo com base em entrevistas domiciliares. Os resultados desta pesquisa são utilizados no planejamento das redes de Metrô e do transporte metropolitano em geral, além de também servir de base para estudos e planejamento de diversos outros órgãos e prefeituras da região metropolitana. A pesquisa OD consiste numa “investigação sobre o padrão de viagens que as pessoas fazem diariamente numa região. Além da informação de origens e destinos, a pesquisa também levanta os motivos e os modos de transporte dessas viagens” [7]

As matrizes obtidas com base em pesquisas OD domiciliar, como as elaboradas pelo Metrô, geralmente produzem dados de demanda de mobilidade para os dias úteis, e com maior qualidade para o período diurno. Como veremos mais adiante, para que os modelos de previsão de tráfego sejam utilizados de forma ampla, será necessário determinar a demanda também para os demais dias e horários.

Em 2015 a CET (Companhia de Engenharia de Tráfego) junto com a ANTP (Associação Nacional de Transportes Públicos) elaboraram e desenvolveram uma pesquisa OD relativa à demanda de movimentação de Cargas [8]. Esta pesquisa indica a necessidade e possibilita a inserção de dados deste tipo de demanda nos modelos de simulação.

Atualmente, diversos estudos têm sido realizados a fim de permitir a utilização de “Big Data” como base

para a inferência das Matrizes de Origem e Destino. [9]–[11]. Estes dados, provenientes de redes de celulares, rastreadores veiculares e outros sistemas ITS permitem a localização de indivíduos (veículos, usuários de transportes, ciclistas, pedestres, etc.), seus trajetos e velocidade pontual, de modo que é possível efetuar inferências relativas a:

- Demanda de mobilidade nos diversos modos de transporte,
- Matriz OD temporal – considerando o horário de início de cada viagem, o local de saída e o destino
- As rotas escolhidas pelos usuários
- O tempo de percurso em cada trecho/link
- O tempo perdido em cada nó
- Alterações bruscas na velocidade que podem indicar a ocorrência de eventos inesperados como acidentes
- Estado do Tráfego – velocidade, fluxo, densidade

As inferências acima podem ser tratadas em tempo real e também podem ser armazenadas de modo a criar um banco de dados histórico com informações de variação temporal e que permite a obtenção de dados médios das características avaliadas, relativas à rotas, velocidade, tempo de percurso

#### *Alocação da Demanda*

A alocação da Demanda nos modelos de simulação de tráfego consiste em distribuir pela rede viária a demanda obtida nas pesquisas OD, eventualmente acrescidas de outras informações relacionadas a demandas localizadas e sazonais como, por exemplo, aquelas causadas por eventos públicos de grande porte.

Com base na disponibilidade de dados e na necessidade específica do estudo, a alocação pode ocorrer de modo a representar a Variação Temporal da demanda, ou seja, considerando a variação que ocorre ao longo do período de estudo. A maior parte dos modelos atualmente disponíveis pode trabalhar tanto com análises Estáticas como Dinâmicas:

- i. Estática – Utilizadas quando a dimensão “tempo” não é relevante. Neste caso a simulação se passa com base em uma matriz de demanda específica e que não varia ao longo do tempo. Em diversos modelos a capacidade de um link é ilimitada de modo que o fluxo pode superar a capacidade (diverge da realidade).
- ii. Dinâmica – A Alocação Dinâmica do Tráfego (*DTA – Dynamic Traffic Assignment*) tem sido aplicada de modo mais amplo nas últimas décadas e consiste em considerar o impacto do tempo no sistema. Em outras palavras, consiste em verificar o impacto causado pelos usuários ao longo do tempo de modo que usuários que ingressam na rede num momento posterior são afetados pelos seus antecessores. Este tipo de alocação será melhor discutido a seguir, uma vez que servem de base aos Modelos de Previsão de Tráfego de Curto Prazo.

Ainda com relação à Alocação da Demanda, o método consiste em processo iterativo em busca de convergência e estabilidade do sistema. As viagens previstas na matriz OD são alocadas na rede de modo a buscar o trajeto de menor custo. Tendo em vista as limitações de capacidade da rede ocorre o acúmulo de usuários em determinados trechos causando congestionamentos, o que implica em maior tempo de trajeto naqueles trechos. Por consequência rotas alternativas podem passar a ter custo/tempo menor, de modo que o modelo ajusta o trajeto de parte dos usuários para as rotas alternativas a cada interação até que o equilíbrio do sistema seja alcançado. Os modelos de simulação trabalham com o chamado Equilíbrio do Usuário, conforme poderemos verificar no próximo tópico.

Outra consideração importante neste ponto é relativa ao cálculo do custo/tempo de uma rota. Como o tempo de percurso, calculado no momento da partida do usuário, considera a soma dos tempos gastos para percorrer cada trecho da rota é necessário definir se serão considerados os tempos de percurso existentes no momento do cálculo (tempo de percurso Instantâneo - característico de alocações estáticas) ou os tempos de percurso previstos quando da chegada em cada trecho/link (tempo de percurso Experimentado - possível nas alocações dinâmicas). [2]

A diferença na apropriação do custo/tempo é significativa nos cálculos de escolha de rota e equilíbrio do modelo, uma vez que nos casos de alocação dinâmica é possível estabelecer o tempo de percurso de cada link nos diversos momentos, em decorrência da mudança do estado do tráfego na rede e no próprio link. Com base nessa variação do tempo de percurso dos links que compõem a rota é possível considerar o tempo de percurso que será “experimentado” quando do início do trajeto em cada link, já que este pode ser diferente do tempo de trajeto quando do início da viagem do usuário.

De outro lado como o modelo estático não considera a variação do tempo de percurso de um link ao longo do tempo o cálculo do tempo de percurso “instantâneo” é obtido com os tempos fixados no modelo após sua calibração.

Pelos motivos apresentados e considerando que nosso objetivo é previsão de tráfego em tempo real, incluindo a possibilidade de análises de cenários e do impacto de eventos inesperados na via, nosso trabalho foca de modo mais intensivo as aplicações com alocação dinâmica.

### *Equilíbrio do Modelo*

O roteamento básico do modelo é definido de acordo com as regras de Equilíbrio de Usuário (UE – User Equilibrium) definidas Wardrop em 1952 apud [2]:

*“Num modelo de rede com muitas rotas possíveis para cada par OD, todas as rotas usadas tem igual e o menor tempo de viagem (custo generalizado). Nenhum usuário terá tempo menor de viagem (custo generalizado) através da mudança unilateral para uma rota diferente.”*

A definição do custo generalizado pode variar, sendo que o tempo de percurso costuma ser um dos principais itens. Apesar disto itens como tarifação (pedágio), conforto, paisagem, número de cruzamento,

topografia e pavimento podem ser incluídos de modo direto no modelo, uma vez que as escolhas do usuário podem estar relacionadas aos mesmos. Assim, o conceito de custo/tempo é definido de acordo com o modelo/ferramenta de simulação adotado.

O equilíbrio dinâmico (DUE) [12] ou Equilíbrio Dinâmico Temporal (TDUE) [2], que é utilizado nas aplicações com alocação dinâmica, e leva em conta a que o equilíbrio deve se manter ao longo do tempo, de modo que a definição de Equilíbrio do Usuário pode ser reescrita como [2]:

*“Numa rede com muitas zonas OD e num específico período de tempo, para cada par OD e incremento de tempo de partida, todas as rotas tem igual e o menor tempo de viagem (custo generalizado) e nenhum usuário terá tempo menor de viagem (custo generalizado) através de uma ação unilateral.”*

Esta é uma área pujante de pesquisa, com muitos artigos publicados, sugerindo várias abordagens e metodologias na análise do Equilíbrio do Usuário. Como exemplos temos: Equilíbrio Estocástico (SUE) [13], Equilíbrio Linear do Custo do Usuário (LUCE) [14],.

Assim, o roteamento utilizado nos modelos de tráfego busca priorizar as rotas utilizadas pelos usuários, uma vez que pressupõe que os usuários sempre buscam as rotas de menor custo para seu deslocamento. O roteamento ajustado através de modelos de equilíbrio, conforme apontado no item anterior, é utilizado na calibração de modelos estáticos e dinâmicos e pressupõe que os usuários são bem informados e tomam decisões racionais. [12]

Métodos diferentes produzem resultados diferentes além de diferirem quanto à velocidade de convergência e à necessidade de processamento computacional.

### *O Não Equilíbrio*

Em direção semelhante à proposta em relação ao Equilíbrio do Usuário surgiu uma linha de pesquisa relacionada ao Não Equilíbrio ou Desequilíbrio do Usuário. Esta linha de pesquisa que já tem sido aplicada para modelos dinâmicos é focada no processo de aprendizagem dos usuários e nas experiências vividas, ou seja, considera que o usuário não tem informações completas do sistema em tempo real e assim seu processo de decisão é apoiado também na expectativa do que acontecerá nos próximos instantes [12]. Em outras palavras poderíamos dizer que o usuário que vivencia um forte congestionamento num dia tem maior tendência em buscar rotas alternativas no dia seguinte. Eventualmente, através do acúmulo do aprendizado diário, um usuário que utiliza constantemente um trajeto pode acabar convergindo para uma situação de equilíbrio.

A abordagem com base no Desequilíbrio é desejável nas análises de situações envolvendo situações inesperadas como incidentes e acidentes, evacuações e também nos casos de usuários possuírem informações da situação do tráfego antes ou durante o trajeto [2]. No caso de incidentes, acidentes ou condições meteorológicas adversas, o usuário precisa reagir à situação inesperada no momento em que ocorre e cada usuário pode reagir de modo diferente. Aqueles que possuem informações provenientes de

sistemas de roteamento (que se tornam cada dia mais comuns e presentes nos veículos e smartphones) podem optar por buscar rotas de menor custo/tempo, ainda que considerando sua experiência como usuário na avaliação e escolha de rotas semelhantes. Assim, devemos considerar ainda que um usuário frequente e conhecedor de uma região, pode passar a escolher rotas preferidas ou habituais de acordo com a confiabilidade, ainda que resultem em custo ligeiramente maior. O modelo de equilíbrio proposto por Shao et al e que considera o peso da confiabilidade no processo de escolha de rota por parte do usuário foi chamado de Demand Driven User Equilibrium (DRUE) [15]. Já o modelo proposto por Site [16] considera os diferentes tipos de usuários e foi denominado de Mixed User Equilibrium (MUE).

Dessa forma, os modelos de simulação devem considerar o impacto comportamental dos usuários, principalmente quanto ao seu conhecimento relativo à situação do tráfego, incidentes e eventos. Para tal, os usuários podem ser classificados de acordo com seu conhecimento das condições do tráfego antes do início ou durante o trajeto e, em tendo conhecimento, em que grau de impacto no seu custo de percurso os mesmos reagem alterando a rota.

### Aferição

Antes de iniciar a Calibração do Modelo, recomenda-se efetuar a aferição do modelo incluindo:

Rede Viária - garantindo os quesitos de conectividade e capacidade adequada de cada link e a configuração correta dos nós e sistemas de controle de tráfego;

Demanda – quanto à coerência das desagregações e agregações efetuadas

Do modelo – efetuando-se cargas de dados controladas a fim de verificar eventuais inconsistências.

### Calibração

O processo de calibração de um modelo dotado de Alocação Dinâmica de Tráfego é efetuado em etapas [2] e busca verificar e propiciar a aderência dos dados de saída do modelo com os dados reais obtidos em medições de campo. A Figura 2 indica o fluxo de calibração.

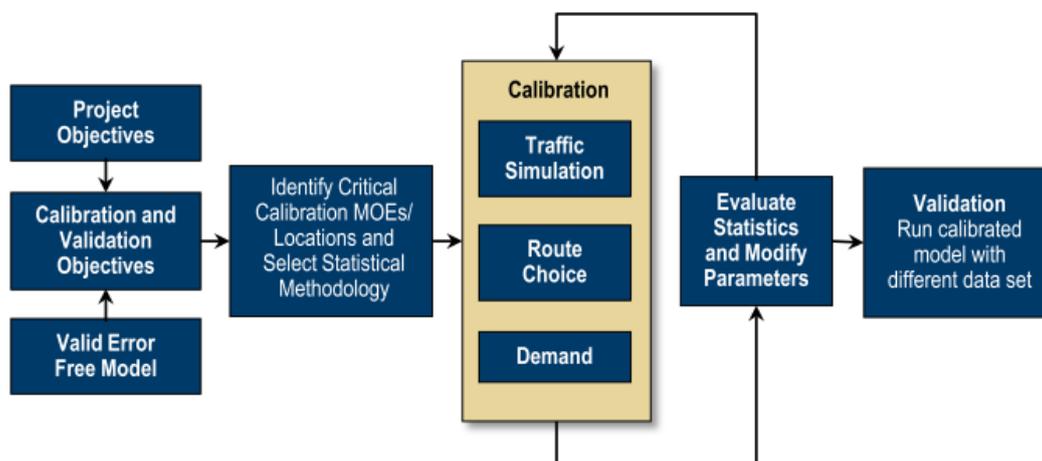


Figura 2 – fluxo de Calibração – Cambridge Systematics, Inc apud [2]

A calibração deve estar direcionada ao objetivo do projeto. Assim, de início deve ser estabelecido quais os aspectos mais importantes para a calibração, o que consiste em definir se é mais importante calibrar o modelo para definição das velocidades de trajeto ou visando definir os volumes em cada trecho. Certamente o ideal seria obter um modelo que possui aderência de 100% com todos os critérios de avaliação, todavia isto não é possível na prática. Na mesma direção deve ser monitorada a aderência aos demais critérios de avaliação a fim de garantir que sua modelagem também seja adequada, ainda que com algum grau de desvio. Todos os critérios podem ser avaliados, cabendo à equipe de trabalho a decisão de qual o melhor calibragem a fim de atender os objetivos do projeto.

Para a avaliação da calibração deve ser utilizada metodologia estatística na comparação dos dados de daída com os dados de controle obtidos em campo. O projeto deve definir qual o nível de aderência aceitável para o modelo. Através do método estatístico também deve ser possível acompanhar a evolução das interações do modelo durante o processo de alocação das viagens.

A Validação do modelo já calibrado é importante a fim de garantir que as simulações futuras propiciem dados corretos. A validação é efetuada com o uso de dados não utilizados nos processos anteriores e busca confirmar se a qualidade da modelagem se mantém próxima à qualidade obtida ao final do processo de calibração.

### **Previsão de tráfego em tempo real**

A Previsão de Tráfego em Tempo Real, se baseia na utilização de modelos de tráfego preparados e calibrados através da Alocação Dinâmica do Tráfego e atualizados em tempo real com base em dados de sensores de ITS e “Big Data”.

Com base no modelo atualizado, os simuladores de tráfego podem efetuar a previsão inserindo informações da variação da demanda e da oferta para o próximo período e assim determinar qual o novo estado da rede previsto. Simuladores mais recentes tem incluído meios para a inserção também em tempo real de informações sobre incidentes, meteorologia e outros variáveis intervenientes (vide o item Ajustes para previsão em tempo real).

Embora não tenhamos a intensão listar todos Simuladores de Tráfego que já possuem interface para Previsão de Tráfego de curto prazo e nem tampouco avalia-los ou compará-los de modo detalhado, dentre os simuladores disponíveis para a Previsão de Tráfego de Curto Prazo podemos destacar: Optima [17], Mezzo [6], Renaissance [18], Adarules [19], Dynasmart [20] e Dyrbusrt [21]

A previsão efetuada pelos simuladores varia, mas em geral abrange de 5 a 60 minutos. Como exemplo verificamos na Figura 3 mostra a linha do tempo do processo de previsão do tráfego adotada pelo sistema Optima da PTV [17]. Assim podemos notar que o sistema trabalha com uma agregação dos dados medidos em campo de 5 minutos, na sequência leva outros 5 minutos para efetuar o processamento e indicar o resultado para os próximos 15 e 30 minutos. Ao final do processamento (10 minutos após o início da

coleta de dados) o sistema deve ser capaz de apresentar informações atualizadas e que já incluem eventualmente ajustes estatísticos relativos ao tempo decorrido.

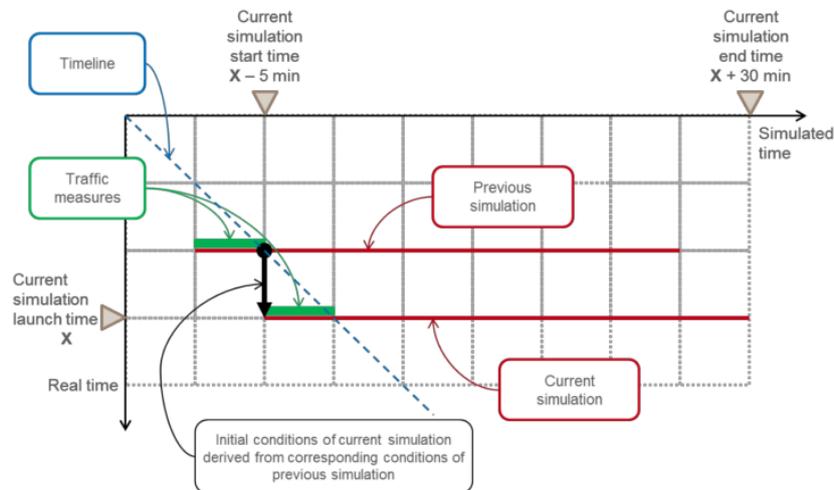


Figura 3 – Linha do Tempo para previsão de tráfego [17]

Conforme Gentile [22], existem duas abordagens para a Previsão de Tráfego:

- i. Reconhecimento de padrão – baseado na interpolação de valores dos sensores alocados na via através da aplicação de inferência estatística, mineração de dados e/ou métodos de inteligência artificial, com base nos dados históricos. As análises não explicitam as relações de tráfego entre velocidade, densidade e fluxo.

Este tipo de abordagem tipicamente busca identificar o padrão de tráfego atual de um dado link da rede e então estima a evolução futura com base na projeção de novas demandas. Nas previsões de tráfego de curto prazo esta abordagem implica na disponibilidade contínua de dados em tempo real. Gentile também afirma que este tipo de abordagem não é capaz de tratar situações inesperadas e não previstas e eventos atípicos, como acidentes, uma vez que os mesmos ocorrem de modo aleatório na rede e não são previamente registrados em quantidade suficiente para que o modelo possa se adaptar.

- ii. Interpretação Física do fenômeno de Tráfego – baseada na modelagem explícita da interação entre demanda de viagem e a rede viária através da alocação do tráfego. Esta abordagem permite que através da propagação do fluxo na rede as informações dos links não monitorados sejam completadas de modo coerente com o que ocorre na realidade.

Os dados de tráfego atualizados em tempo real são utilizados no ajuste da base do modelo para o momento atual, de modo que com base na rede já calibrada o modelo é capaz de efetuar previsões de impacto de situações atípicas não ocorridas anteriormente, pois considera a alteração da capacidade (oferta), causada por uma ocorrência inesperada, ou na demanda e redistribui as viagens pelo restante da rede de acordo com a situação atualizada do tráfego.

Na mesma direção, Seo et ali [23] indicam que a estimativa da situação do tráfego em tempo real pode

modelos de reconhecimento de padrão (voltados aos dados e não à abordagem teórica dos modelos de tráfego) são mais simples e mais leves em termos de processamento dos dados em tempo real, todavia o processamento dos dados no treinamento do modelo é bastante pesado, além disto eles falham no caso de eventos inesperados e, por serem considerados “caixa preta”, tornam difícil a análise intuitiva dos dados. Modelos físicos conseguem inferir o estado do tráfego em trechos sem monitoramento com acurácia mesmo com menos dados coletados e indicam como ponto de atenção a necessidade de uma ótima calibração do modelo, pois caso contrário os dados podem ser menos precisos.

#### *Atualização em tempo real*

Segundo Gentile [24], para ser útil um sistema de previsão de tráfego deve estar baseado em informações distribuídas pela rede, de modo a prover informações relativas às diversas rotas e suas alternativas, devendo ser obtidas o mais próximo possível do tempo real. As informações obtidas em tempo real são repassadas aos simuladores que são ajustados de modo a melhor representar a situação atual do tráfego na rede. Essa atualização permite que os modelos se

Como fonte de dados destacam-se historicamente os sensores dos equipamentos de ITS (semáforos, radares, contadores, etc.), as câmeras de monitoramento e segurança e mais recentemente o uso dos dados de posicionamento de celulares obtidos por GPS ou por vinculação com a rede de antenas de celular [25]–[27].

Muitos estudos têm sido apresentados visando a previsão e estimação de tráfego em rodovias [23]. Os estudos em áreas urbanas verificam-se em menor número na literatura [28]–[30] todavia novos estudos estão sendo apresentados tendo em vista a necessidade de determinar a situação do tráfego em regiões urbanas e considerando a impossibilidade de instalação de sensores em toda a rede.

Seo et ali [23] indicam a estimativa da situação do tráfego com o uso de “Streaming” de dados baseado em Big Data. Esta abordagem serve apenas para a estimação em tempo real da situação, todavia não é apropriada para a previsão de tráfego futuro. Assim, podemos considerar que ela pode ser utilizada como forma de atualizar a base para o tempo real, servindo de fundo para os processos de previsão. As vantagens deste tipo de uso é que os dados estão distribuídos por toda a rede e são atualizados em grande volume e em pequenos espaços de tempo. Análise dos dados pode indicar alterações de velocidade ocorridas num trecho da via sem o uso de sensores ou câmeras e de modo indireto efetuar a detecção de incidentes.

Como já citado, os modelos de Previsão de Tráfego necessitam ser constantemente atualizados dos dados de sistemas de controle como semáforos.

Em áreas urbanas durante os horários de pico, e até mesmo fora deles, ocorre a formação de congestionamentos causados por gargalos de capacidade em determinados pontos do sistema. Acidentes, obras na via e outros eventos também podem causar pontos de formação de congestionamentos. O acompanhamento da evolução dos congestionamentos é primordial pois as filas formadas podem

impactar em nós e links próximos restringindo sua capacidade de saída de veículos. A formação e dissolução das filas devem fazer parte do modelo de previsão.

Dados relativos à meteorologia, previsão e em tempo real descritos espacialmente permitem a atualização do modelo indicando por exemplo regiões com chuvas fortes e que impactam na relação fluxo x capacidade.

Eventos de grande porte programados como shows e jogos, podem ser inseridos nos modelos através do uso de matrizes dinâmicas [31] onde a demanda gerada pelo evento pode ser inserida gerando novos cálculos de alocação do fluxo.

Manifestações que ocorrem nas vias públicas e outros eventos inesperados como acidentes também devem ser considerados assim que detectados e, além de prever o impacto causado pela própria situação, é desejável verificar o resultado de cenários que possam representar alternativas de gestão do problema através da ação operacional em campo ou de ajustes nos sistemas de controle e informação.

## **Conclusão**

Ao longo deste artigo foram apresentadas diversas informações sobre o uso de Simuladores de Tráfego na Previsão de Tráfego de Curto Prazo.

Os processos para preparação do modelo, incluindo considerações sobre o preparo da rede viária e dos dados de demanda foram apresentados de modo a permitir o preparo da base a ser utilizada nos modelo de simulação.

A alocação de dados foi discutida tendo sido evidenciada a necessidade de utilização da Alocação Dinâmica de Tráfego.

Considerações relativas ao uso de simuladores, seus resultados e possibilidades de usos em diversas facetas da gestão e operação do tráfego foram abordadas, apresentando-se indicações de cuidados a serem adotados na sua implementação.

O objetivo de apresentar ao leitor um embasamento teórico devidamente organizado e suficiente para servir de base a estudos futuros foi alcançado.

## **Bibliografia**

- [1] E. I. Vlahogianni, M. G. Karlaftis, e J. C. Golias, “Short-term traffic forecasting: Where we are and where we’re going”, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, 2014.
- [2] J. Sloboden, J. Lewis, V. Alexiadis, Y.-C. Chiu, e E. Nava, “Guidebook on the Utilization of Dynamic Traffic Assignment in Modeling”, 2012.
- [3] A. Ermagun e D. Levinson, “Spatiotemporal Traffic Forecasting: Review and Proposed Directions”, in *96th Annual Transportation Research Board Meeting*, 2017, p. 29.
- [4] L. Conceição e R. J. F. Rossetti, “Multivariate modelling for autonomous vehicles: Research trends in perspective”, in *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, 2016, p. 83–87.

- [5] L. da S. Portugal, *Simulação de Tráfego: Conceitos e Técnicas de Modelagem*. Editora Interciência Ltda., 2005.
- [6] W. Burghout, H. N. Koutsopoulos, e I. Andreasson, “A Discrete-Event Mesoscopic Traffic Simulation Model for Hybrid Traffic simulation”, *Proc. IEEE Intell. Transp. Syst. Conf.*, n° September 2014, p. 1102–1107, 2006.
- [7] Metrô SP, “Metrô São Paulo | Pesquisa Origem Destino - 50 anos”, 2017. [Online]. Available at: <http://www.metro.sp.gov.br/pesquisa-od/pesquisa-od.aspx>. [Acessado: 04-fev-2018].
- [8] ANTP - Associação Nacional de Transportes Públicos e CET - Companhia de Engenharia de Tráfego - SP, “Planejamento da pesquisa de origem/destino de cargas no município de São Paulo”, *Cad. Técnicos - ANTP*, vol. 22, p. 92, 2015.
- [9] G. Fusco, C. Colombaroni, e N. Isaenko, “Short-term speed predictions exploiting big data on large urban road networks”, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 73, p. 183–201, dez. 2016.
- [10] S. A. Wadoo, A. H. Syed, V. Sood, e S. Ali, “Prediction of traffic density from wireless cellular data”, in *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2016, p. 575–580.
- [11] A. Attanasi, E. Silvestri, P. Meschini, e G. Gentile, “Real World Applications Using Parallel Computing Techniques in Dynamic Traffic Assignment and Shortest Path Search”, *2015 IEEE 18th Int. Conf. Intell. Transp. Syst.*, p. 316–321, 2015.
- [12] Y.-C. CHIU, J. BOTTOM, M. MAHUT, A. PAZ, R. Balakrishna, T. WALLER, e J. HICKS, “Dynamic Traffic Assignment: A Primer”, 2011.
- [13] R. Balakrishna, “Off-line Calibration of Dynamic Traffic Assignment Models”, MIT - MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2006.
- [14] G. Gentile e K. Noekel, “LINEAR USER COST EQUILIBRIUM: THE NEW ALGORITHM FOR TRAFFIC ASSIGNMENT IN VISUM”, in *Association for European Transport and contributors*, 2009, p. 1–34.
- [15] H. Shao, W. H. K. Lam, Q. Meng, e M. L. Tam, “Demand-Driven Traffic Assignment Problem Based on Travel Time Reliability”, *Transp. Res.*, vol. 2, p. 220–230.
- [16] P. D. Site, “A mixed-behaviour equilibrium model under predictive and static Advanced Traveller Information Systems (ATIS) and state- dependent route choice”, *Transp. Res. Part C*, vol. 86, p. 549–562, 2018.
- [17] PTV group, “PTV OPTIMA PRODUCT DESCRIPTION”, 2017.
- [18] Y. Wang, M. Papageorgiou, e A. Messmer, “RENAISSANCE – A unified macroscopic model-based approach to real-time freeway network traffic surveillance”, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 14, n° 3, p. 190–212, jun. 2006.
- [19] R. Mena-Yedra, R. Gavalda, e J. Casas, “Adarules: Learning rules for real-time road-traffic prediction”, *Transp. Res. Procedia*, vol. 27, p. 11–18, jan. 2017.
- [20] W. Burghout, H. N. Koutsopoulos, e I. Andreasson, “Incident Management and Traffic Information Tools and Methods for Simulation-Based Traffic Prediction”, *Transp. Res. Rec.*, n° 2161, p. 20–28,

- 2010.
- [21] A. Nuzzolo, U. Crisalli, A. Comi, e L. Rosati, “A mesoscopic transit assignment model including real-time predictive information on crowding”, *J. Intell. Transp. Syst. Technol. Planning, Oper.*, vol. 20, n° 4, 2016.
  - [22] G. Gentile e L. Meschini, “Using dynamic assignment models for real-time traffic forecast on large urban networks”, *Proc. 2nd Int. Conf. Model. Technol. Intell. Transp. Syst.*, n° May 2014, p. 1–4, 2011.
  - [23] Toru Seo, Alexandre M. Bayenb, Takahiko Kusakabec, e Yasuo Asakuraa, “Traffic state estimation on highway: A comprehensive survey”, *Annu. Rev. Control*, vol. 43, p. 128–151, 2017.
  - [24] M. Gentili e P. Mirchandani, “Survey of Models to Locate Sensors to Estimate Traffic Flows”, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2243, n° 2243, p. 108–116, 2011.
  - [25] M. Shahadat Iqbal, C. F. Choudhury, P. Wang, e M. C. González, “Development of origin–destination matrices using mobile phone call data”, *Transp. Res. PART C*, vol. 40, p. 63–74, 2014.
  - [26] F. Calabrese, F. C. Pereira, G. Di Lorenzo, L. Liu, e C. Ratti, “The Geography of Taste: Analyzing Cell-Phone Mobility and Social Events”, in *Pervasive Computing*, 2010, p. 22–37.
  - [27] V. D. Blondel, A. Decuyper, e G. Krings, “A survey of results on mobile phone datasets analysis”, *EPJ Data Sci.*, vol. 4, n° 10, 2015.
  - [28] G. Mariotte, L. Leclercq, e J. A. Laval, “Macroscopic urban dynamics: Analytical and numerical comparisons of existing models”, *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 101, p. 245–267, 2017.
  - [29] G. Fusco, C. Colombaroni, e N. Isaenko, “Short-term speed predictions exploiting big data on large urban road networks”, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 73, 2016.
  - [30] H. S. Mahmassani, M. Saberi, e A. Zockaie, “Urban network gridlock: Theory, characteristics, and dynamics”, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 36, p. 480–497, 2013.
  - [31] R. Kucharski, B. Kostic, e G. Gentile, “Real-time traffic forecasting with recent DTA methods”, in *2017 5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, 2017, p. 474–479.