

# Gerando modelos de transporte coletivo e individual

CARLOS EDUARDO DE PAIVA CARDOSO\*



A modelagem clássica de transporte e tráfego tem como base uma representação discreta do espaço, em que a área a ser modelada é dividida em zonas. Para a compreensão do espaço contínuo, é comum dividirmos este espaço em partes: bairros, distritos, municípios e assim por diante. Através deste processo, onde temos uma representação discreta do espaço (em partes, em vez de contínua), podemos relacionar informações agregadas, como população, número de matrículas, empregos, viagens geradas, as áreas definidas, entre outros.

Nesta modelagem, os sistemas de

transporte coletivo (ônibus, metrô, trem) e de tráfego (autos, caminhões, ônibus) são representados por uma rede de nós e ligações (links) onde, através de funções matemáticas, buscamos simular o comportamento das linhas de transporte coletivo e do trânsito existente. Os nós são cruzamentos, pontos de interseção de ligações onde o modelo identifica os possíveis movimentos (conversões permitidas) por tipo de veículo a ser modelado. As ligações, por sua vez, são segmentos de reta conectados por nós e representam o sistema viário principal (ruas, avenidas) da área a ser modelada. O processo matemático de modelagem de transporte não necessita da

representação visual da rede que facilita a exposição dos resultados, mas somente das funções matemáticas dos links (tempo de deslocamento x volume x capacidade), dos nós (tempo de conversão) e de uma tabela de sequenciamento de links e nós (que link está conectado a que nó e a que link).

Cada zona de tráfego, representada por um único ponto chamado centróide, funciona como polo de produção e atração de viagens; estes pontos, por sua vez, são ligados à representação da rede viária e do transporte coletivo através de conectores. Os conectores são segmentos de reta que ligam os centróides (nós especiais onde ocorre a produção e atração de viagens da zona) a

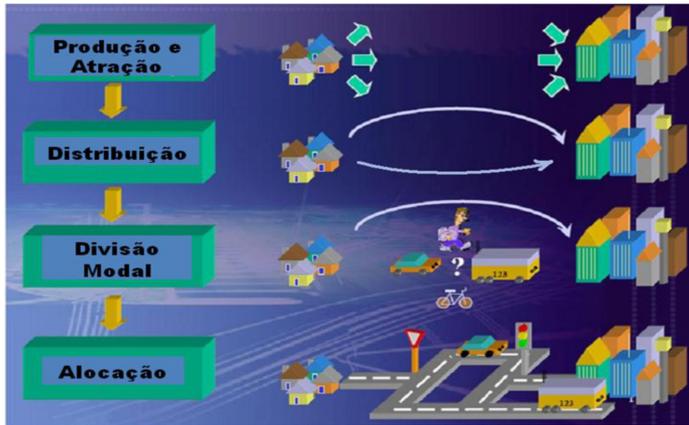


Figura 1 - Metodologia clássica de modelagem

nós da rede viária. Estes conectores (links especiais) representam um conjunto de vias locais existentes em cada zona de viagem que são utilizadas pelos veículos como meio de acesso ao sistema viário principal (representado no modelo).

Na metodologia clássica de modelagem (figura 1) temos quatro etapas distintas e interligadas: geração de viagens, distribuição de viagens, divisão modal e alocação de viagens, descritas a seguir.

1. Produção e atração, que estima as quantidades de viagens produzidas e atraídas em cada zona de tráfego (processo também conhecido como geração de viagens).
2. Distribuição, que é a determinação dos intercâmbios de viagens e dos deslocamentos correspondentes.
3. Divisão modal, que é a determinação do modo de transporte pelo qual as viagens são realizadas.
4. Alocação, que representa a etapa de escolha do caminho, por um dado modo, entre os pares de zonas de tráfego (processo conhecido em alguns lugares como simulação).

Na figura 2 mostramos as possíveis interligações entre as etapas do modelo e a relação com a realidade representada.

Observe, na figura 2, que as etapas de distribuição, divisão modal e alocação podem ser refeitas para obtermos um modelo quatro etapas mais representativo da realidade.

A etapa de geração também conhecida como produção e atração tem como principal fonte de dados as informações socioeconômicas da população (local de moradia, de emprego, de estudo etc.), enquanto na etapa de alocação, os principais dados são o sistema de transporte.

No processo de modelagem, softwares específicos, através de métodos iterativos<sup>1</sup> (repetição de determinada operação até que se atinja um objetivo definido),

são utilizados para simular o comportamento real do trânsito e dos passageiros de transporte coletivo (ônibus, metrô, trem). Como ponto de equilíbrio da etapa de alocação, por exemplo, buscamos o menor tempo de viagem para toda a rede no transporte individual e a escolha das melhores rotas no transporte coletivo.

### ETAPAS DO MODELO

A seguir, explicamos como são desenvolvidas as etapas 1 e 2 deste modelo. A base do processo de modelagem é uma matriz origem-destino<sup>2</sup> obtida de alguma pesquisa origem-destino, em nosso caso da Pesquisa Origem-Destino da Região Metropolitana de São Paulo<sup>3</sup>. Com base nestes dados, através do modelo, procuramos o que segue.

1. Obter uma matriz modelada mais adequada à etapa de alocação (simulação) de transporte e/ou de tráfego na situação atual. Considera-se que a matriz pesquisada não é adequada à etapa de alocação, pois devido a limitações do processo de amostragem existe uma quantidade muito grande de pares origem-destino<sup>4</sup> sem viagens.

2. Gerar matrizes futuras, para dez ou 20 anos, com base em projeções de populações, renda, empregos etc., que permitam análises como a dos impactos de obras viárias previstas para a cidade em situações futuras.

Acreditamos que estas etapas de gera-

ção e distribuição de viagens nos permitem obter modelos simplificados de transporte individual e coletivo independentes entre si, ou seja: matrizes modeladas atuais e matrizes futuras.

A pouca variabilidade da distribuição modal das viagens motorizadas na Região Metropolitana de São Paulo nos últimos 30 anos e a necessidade de utilizar rapidamente os dados da Pesquisa OD 2007 permitem esta simplificação, logicamente com certa diminuição da qualidade.

Quanto à necessidade de desenvolvimento de uma nova rede devido o novo zoneamento da Pesquisa OD 2007 para este modelo simplificado, propomos que os dados da OD 2007 sejam agregados para o zoneamento anterior (OD 1997) e, que o modelo seja desenvolvido para este zoneamento e para as redes de transporte coletivo e individual, já definidas e utilizadas hoje.

Qualitativamente esta pode não ser a melhor proposta, mas é a que, em termos práticos, nos permite utilizar os dados da OD

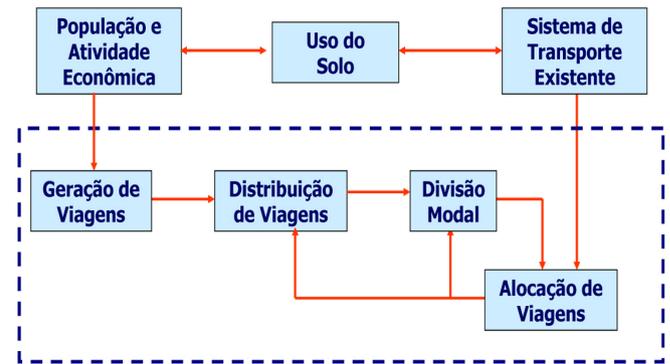


Figura 2 - Possíveis interligações



Terminal de Campinas - Plataformas

DIVULGAÇÃO

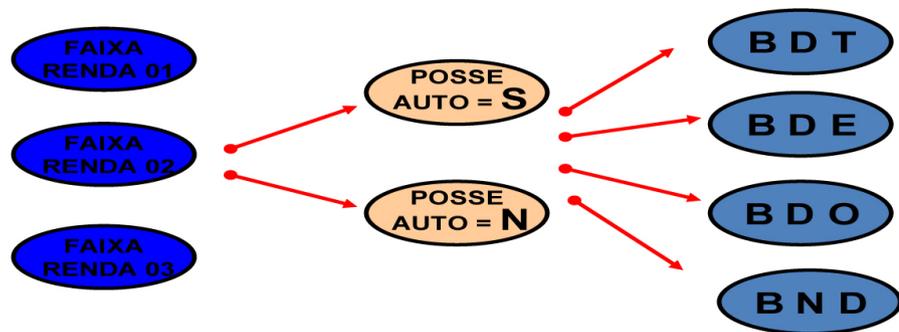


Figura 3 - Modelo de produção e atração

2007 em um menor intervalo de tempo.

**MODELO DE PRODUÇÃO E ATRAÇÃO**

Na primeira etapa da modelagem – produção e atração (também conhecida como geração de viagens) – procuramos obter através de regressões lineares, equações que vinculem o número de viagens produzidas e atraídas em cada zona com dados socioeconômicos desta mesma zona, tais como população, renda média, número de empregos e matrículas, entre outros. Em geral, desagregamos o modelo por faixa de renda, famílias com posse ou não de auto, viagens de base domiciliar<sup>5</sup> ou não e, pelos principais motivos da viagem: trabalho,

educação e outros (figura 3).

O resultado deste processo são equações do tipo:

Atração de Viagens Motivo Escola =  $869 - 0,0235 * \text{População} + 0,538 * \text{Matrículas}$ .

Produção de Viagens Outros Motivos =  $-12 + 0,0353 * \text{População} + 0,0032 * \text{Empregos}$ .

Para cada conjunto de dados definidos – renda, posse ou não de auto e motivo de viagem – devemos ter uma equação de Atração e uma de Produção de Viagens. No total teremos, no exemplo, 48 equações, sendo 24 de produção de viagens e 24 de atração de viagens. A soma das viagens de cada equação nos permite obter para cada zona o total de viagens geradas e atraídas.

Os valores estimados pelos modelos devem ser sempre consistidos (comparados) com os dados originais da pesquisa (figura 4). Devemos comparar os valores parciais (viagens produzidas e atraídas por faixa de renda, motivo da viagem etc.) e também os totais de viagens produzidas e atraídas obtidos na pesquisa origem-destino, que foram a base para a obtenção do modelo.

O resultado desta etapa de modelagem é o número de viagens produzidas e atraídas em cada zona, duas tabelas, sendo uma com: o número da zona e o número de viagens produzidas (vetor de produção) ou outra com: o número da zona e o número de viagens atraídas (vetor de atração).

É costume realizarmos a modelagem do pico da manhã em 3 horas com o objetivo de se aumentar o número de pares origem-destino<sup>6</sup> envolvidos, o que facilita etapas posteriores do trabalho. Como é comum realizarmos a etapa de alocação com uma matriz de viagens correspondente à uma hora de viagem, devemos, antes desta etapa, utilizar fatores de hora-pico<sup>7</sup> por modo de transporte para redução dos resultados obtidos nas 3 horas para a hora-pico.

Observe-se, como já citado, que a partir da definição de um cenário futuro baseado em projeções de variáveis socioeconômicas como população, renda e empregos podemos obter, através das equações do modelo, o número de viagens geradas e atraídas em cada uma das zonas e os pares origem-destino, para o período desejado.

**MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE VIAGEM**

A segunda etapa da modelagem – Distribuição das Viagens – consiste em distribuir os chamados vetores de produção e atração de viagens, obtidos na etapa anterior, entre si, ou seja, quantas viagens saem, por exemplo, da zona 1 e vão para as zonas 2, 3, ..., 459 e 460. Este processo deve ser realizado sempre de todas as zonas para todas as zonas. O modelo gravitacional, que é uma analogia com a lei da gravidade de Newton, é o mais usado para este procedimento. Este modelo se baseia na suposição de que as viagens entre zonas são diretamente proporcionais à produção e atração das viagens em cada zona e inversamente proporcional a uma função de separação espacial entre elas. É comum a utilização do tempo médio de viagem entre zonas como função de sepa-



Estação Pinheiros, Linha 4 - Amarela do Metrô de São Paulo

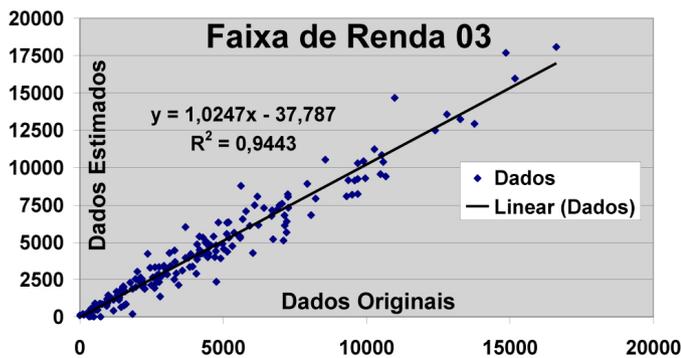


Figura 4 - Valores estimados

ração entre zonas (impedância).

Uma das funções que melhor se ajusta ao modelo gravitacional é a função gama, que possui a seguinte formulação matemática:  $F = t^a * e^{-(b + ct)}$  onde,  $t$  é o tempo e,  $a$ ,  $b$  e  $c$  são parâmetros a serem calibrados.

Muitas vezes é utilizada a forma mais simples desta função onde  $a$  e  $b$  são iguais a zero, obtendo-se a seguinte formulação:  $F = e^{ct}$  onde,  $c$  é o parâmetro a ser calibrado.

Na prática, para desenvolvimento desta etapa, devemos ter:

1. Uma matriz de tempos de viagem que identifique para cada par origem-destino o tempo médio de viagem entre zonas, que pode ser obtida, por exemplo, a partir de uma alocação (simulação) da matriz pesquisada, em um software tipo EMME, em rede (centróides, conectores, nós e links) já definida.
2. Vetores modelados de produção e atração de viagens que nos fornecem o número de viagens produzidas e atraídas em cada zona (primeira etapa do modelo).
3. Um software que tenha procedimentos de balanceamento de matrizes. Softwares de alocação como EMME, em geral, possuem módulos que permitem este procedimento.

No módulo de balanceamento de matrizes, através de procedimentos iterativos, devemos obter um valor para a constante  $c$  da função  $F = e^{ct}$  que gere uma matriz modelada com distribuição de tempos de viagem próxima à da matriz pesquisada. Para isso, os seguintes passos são necessários:

#### 1. Entradas:

- a. Vetores de Produção e Atração de Viagens.
- b. Matriz na forma:

$$e^{c*} \begin{bmatrix} \dots & \dots \\ \vdots & \vdots \\ \dots & \dots \end{bmatrix} \rightarrow \text{Matriz de Tempos de Viagem}$$

c. O valor de  $c$  pode ser inicialmente definido em  $-1/50$ .

#### 2. Resultado: Matriz Modelada

3. Análise do Resultado (Matriz Modelada): Devemos comparar o histograma do número

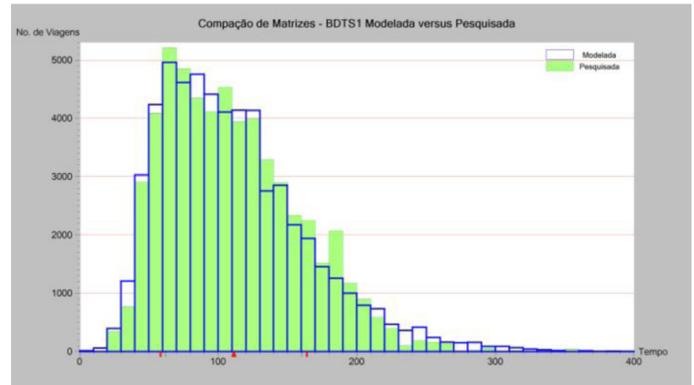


Figura 5 - Histograma do número de viagens

de viagens por faixa

de tempo (a cada 15 minutos, por exemplo) da matriz modelada com o da matriz pesquisada (figura 5: azul – matriz modelada e verde – matriz pesquisada).

O valor do parâmetro  $c$  da função que está sendo modelada (item  $b$ ) e a matriz modelada, que se deseja, é aquela em que os histogramas de tempos de viagem são bastante semelhantes, se possível iguais.

Na prática devemos variar o valor do parâmetro  $c$ , na função  $F = e^{ct}$  e então compararmos o histograma obtido a partir da matriz modelada com o da matriz pesquisada até obtermos um bom resultado

(histogramas “iguais”).

**Observação:** Este procedimento deve ser realizado para cada conjunto de dados definidos – renda, posse ou não de auto e motivo de viagem – na etapa anterior, Produção e Atração de Viagens. 

\* **Carlos Eduardo de Paiva Cardoso** é engenheiro, mestre em Engenharia de Transporte pela EPUSP, doutor em Serviço Social pela PUC-SP. Atuou durante 20 anos na CET-SP, como especialista nas áreas de planejamento, tecnologia e geoprocessamento. Atualmente é especialista em Planejamento e Modelagem de Tráfego e Transportes no Grupo CCR e membro da ANTP. E-mail: paivacardoso@yahoo.com.br

#### Notas

1. Em um processo iterativo ocorre repetição de determinada operação até que se atinja um objetivo definido. Na modelagem, o processo iterativo ocorre principalmente e, não só, na alocação de viagens onde o software busca um equilíbrio em que determinada oscilação é aceitável.
2. Matriz origem-destino identifica dentro de um período de tempo (todo o dia, hora pico manhã etc.) as viagens existentes entre todos os pares de zonas, representadas no modelo por centróides, em um ou mais modos de transporte (auto, ônibus, metrô etc.). Cada possível troca de viagens entre zonas origem e destino é conhecido como par origem-destino (par OD) e identifica uma troca de viagens entre duas regiões (zonas): por exemplo, quantas viagens de auto que saem da zona 30 e vão para a zona 420.
3. A Pesquisa Origem-Destino de São Paulo é o resultado de duas pesquisas distintas e complementares denominadas Pesquisa Domiciliar e Pesquisa na Linha de Contorno. A primeira levanta dados sobre as viagens internas à área de pesquisa; a segunda, dados das viagens externas com origem ou destino no interior da área de pesquisa e, de viagens que simplesmente atravessam a área de pesquisa.

A Pesquisa Domiciliar é realizada em domicílios escolhidos por amostragem, submetendo todos os seus moradores a um questionário onde se procu-

ra levantar as características dos deslocamentos realizados no dia anterior ao da entrevista. Através das entrevistas com os moradores do domicílio sorteado temos uma amostra aleatória do perfil socioeconômico dos indivíduos e das viagens por eles realizadas.

A Pesquisa na Linha de Contorno é realizada nos principais pontos de entrada e saída da área pesquisada, ou seja, nos cruzamentos dessa linha imaginária com as grandes vias de circulação (estradas de ferro e de rodagem). Essa pesquisa obtém informações sobre a origem e o destino dos deslocamentos que cruzam a referida linha.

4. Par origem-destino (par OD) identifica uma troca de viagens entre duas regiões (zonas): por exemplo, quantas viagens de auto que saem da zona 30 e vão para a zona 420.
5. Entendem-se como viagens de base domiciliar, viagens que tem origem ou destino no domicílio.
6. Cada possível troca de viagens entre zonas origem e destino é conhecido como par origem destino (par OD) e identifica uma troca de viagens entre duas regiões (zonas): por exemplo, quantas viagens de auto que saem da zona 30 e vão para a zona 420.
7. Fatores de hora pico são valores (médios para toda área em estudo) que relacionam o total de viagens da matriz de 3 horas com o total de viagens da matriz de uma hora (hora pico) que pode ser obtido através de dados da pesquisa origem-destino.