

## ANÁLISE DE MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DE DEMANDAS VEICULARES

**Sergio Henrique Demarchi**  
**Bruno Vieira Bertoncini**

Universidade Estadual de Maringá  
Departamento de Engenharia Civil  
Grupo de Engenharia de Transportes

### RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise comparativa de dois métodos de determinação de demandas por viagens. No primeiro método, denominado distribuição de viagens, as demandas são consideradas como sendo proporcionais aos totais de viagens gerados em diferentes zonas e inversamente proporcionais a fatores de impedância para se realizar as viagens entre zonas. No segundo método, as demandas são sintetizadas a partir de contagens volumétricas em diversos pontos da rede viária e das prováveis rotas (ou caminhos mínimos) das viagens. O trabalho mostra que, embora o primeiro método ainda seja o mais aceito dentre os planejadores de sistemas urbanos e de transportes, por ser parte do tradicional modelo de 4 etapas, a estimativa de demandas sintéticas vem se tornando cada vez mais uma alternativa de menor custo e maior flexibilidade que o método tradicional. Sua maior aceitação, no entanto, requer tanto a assimilação de uma série de fundamentos teóricos ainda não tão bem conhecidos, assim como a definição de algoritmos e procedimentos que tornem a estimativa de demandas sintéticas um processo mais prático e simples de ser empregado.

### 1. INTRODUÇÃO

As demandas representam as viagens realizadas por veículos que partem de um ponto qualquer de uma cidade ou de uma região com destino a outro ponto qualquer. A partir das demandas, é possível estimar qual será o volume de veículos circulantes pelas vias, que é um dos fatores que influenciam o projeto do sistema viário, além do tipo de estratégia operacional e de controle de tráfego a ser adotado.

As demandas por viagens são também necessárias para a representação da operação do tráfego através de simulação computacional. No entanto, o processo para se estimar demandas é uma das etapas mais complexas no processo de calibração de simuladores de tráfego, constituindo de acordo com Rakha *et al.* (1998) um exercício de calibração isolado, inserido dentro de um processo mais amplo de calibração de todo o sistema viário.

Para estimar as demandas de viagens produzidas e atraídas de e para os nós de origem e destino em uma cidade, existem dois métodos distintos. O primeiro consiste na estimativa do número de viagens através de correlações com o tipo e densidade de ocupação do solo urbano, enquanto que o segundo método consiste na estimativa de demandas sintéticas a partir da contagem volumétrica de veículos.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma análise comparativa dos métodos para estimativa de demandas, utilizando para isso uma rede hipotética para a qual serão estimadas demandas por ambos os métodos. O trabalho é dividido em 5 itens, contando com esta introdução. No item 2 são discutidos aspectos fundamentais sobre demandas por viagem, enfatizando a diferença existente entre demanda e contagem volumétrica. No item 3.1 é apresentado o modelo de 4 etapas, que englo-

ba o modelo de distribuição de viagens e, no item 3.2, é descrito o método para estimativa de demandas sintéticas. No item 4 é apresentada uma análise comparativa de ambos os métodos e, no item 5, são apresentadas as considerações finais do trabalho.

## 2. ASPECTOS FUNDAMENTAIS SOBRE DEMANDAS VEICULARES

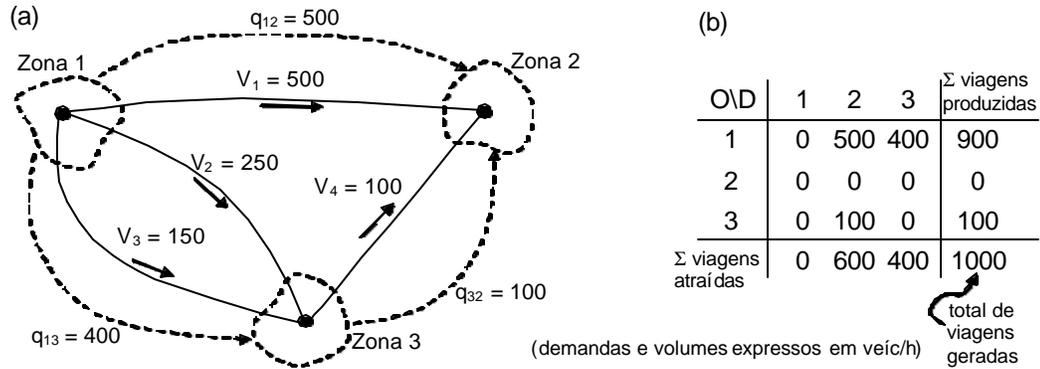
Apesar do conceito de demanda estar nitidamente associado à viagens que ocorrem em uma cidade ou região, uma definição conceitual mais completa é que demanda é a taxa de viagens realizadas por um dado *motivo*, partindo de um ponto de *origem* e dirigindo-se a um ponto de *destino*, dentro de um determinado *período de tempo* pré-definido, ou seja:

- uma viagem pode ser realizada por diferentes motivos, tais como trabalho, estudo ou lazer;
- uma demanda tem como origem, por exemplo, a residência do usuário do sistema de transporte e como destino seu local de trabalho ou de estudo. No entanto, para simplificar a análise, é comum supor que as cidades sejam divididas em zonas e as viagens sejam produzidas em ou atraídas para os *centróides* das zonas, como mostrado na Figura 1a;
- a demanda ocorre num intervalo de tempo específico, que pode referir-se a um período de pico, período fora do pico, ou ao dia todo.

Para ilustrar o conceito de demanda, a Figura 1 mostra um cenário hipotético, com três demandas ( $q_{12}$ ,  $q_{13}$  e  $q_{32}$ ) numa região formada por 3 zonas (1, 2, 3). Supondo que todas as viagens sejam realizadas por motivo trabalho e sejam constantes no período de tempo analisado, podem ser observadas uma demanda com origem no centróide da zona 1 e destino no centróide da zona 2, outra com origem em 1 e destino em 3 e uma terceira com origem em 2 e destino em 3. As respectivas magnitudes dessas demandas são 400, 500 e 100 veículos por hora (valores indicados próximos às setas tracejadas na Figura 1a), sendo que a demanda entre os pontos 1 e 2 divide-se em duas rotas distintas, com 250 viagens/hora no tramo 2 e 150 viagens/hora no tramo 3.

Quando o número de demandas é relativamente pequeno, como no caso apresentado, é relativamente simples representar as demandas por esquemas simplificados como o da Figura 1a. No entanto, quando o número de demandas é maior, como no caso de cidades médias ou grandes, ou quando é necessária a utilização de rotinas computacionais, é recomendável a organização de demandas em matrizes origem-destino (matrizes O–D), como a mostrada na Figura 1b.

Uma simples contagem de viagens pode mostrar os totais de viagens que são produzidas nos locais de origem e os totais atraídos para os pontos de destino. Sendo assim, no centróide da zona 1 são produzidas 900 viagens, enquanto que são atraídas 400 viagens para o ponto 3, por exemplo. No total, são geradas (isto é, produzidas ou atraídas) 1000 viagens/hora no cenário da Figura 1.



**Figura 1:** (a) Representação gráfica de demandas e contagens volumétricas;  
 (b) representação matricial de demandas (matriz O-D)

O exemplo proposto foi elaborado de forma a mostrar que existe uma diferença entre demanda e contagem volumétrica (ou taxa de fluxo observada no tramo). Enquanto a demandas  $q_{ij}$  representa a taxas de viagens entre a origem  $i$  e o destino  $j$ , a contagem volumétrica  $V_a$  consiste no número de veículos que passam por uma seção qualquer de um tramo  $a$ , num determinado intervalo de tempo (normalmente uma hora), sem que exista a preocupação em saber qual a procedência ou o destino dos veículos. No caso da Figura 1, a demanda  $q_{12} = 400$  veíc/h, o que fornece a informação sobre a quantidade de viagens realizadas durante o período de tempo considerado, mas não sobre a rota utilizada pelos veículos para chegar até o nó 2. Pode ser observado ainda que a demanda de 400 veíc/h equivale à soma dos volumes de tráfego  $V_2 = 250$  veíc/h e  $V_3 = 150$  veíc/h contabilizados, respectivamente, nos tramos 2 e 3, que servem como rotas possíveis para viagens realizadas entre os centróides das zonas 1 e 3. No entanto, no caso das viagens realizadas entre os pontos 1 e 2, e entre os pontos 3 e 2, as demandas equivalem aos volumes observados nas vias que conectam esses pontos ( $q_{12} = V_1$  e  $q_{32} = V_4$ ), devido à existência de somente uma rota disponível entre os dois pares O-D mencionados.

### 3. MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DE DEMANDAS

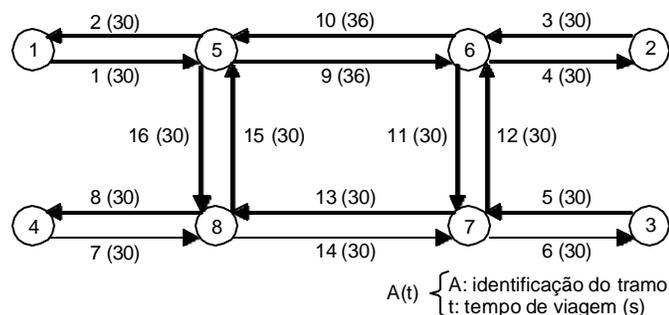
Para estimar as demandas de viagens produzidas e atraídas de e para os nós de origem e destino em uma cidade, existem dois métodos distintos. O primeiro consiste na estimativa do número de viagens através de correlações com o tipo e densidade de ocupação do solo urbano (Khisty, 1990; Ortúzar e Willumsen, 1996; Portugal e Goldner, 2003), enquanto que o segundo método consiste na estimativa de demandas sintéticas a partir de contagens volumétricas de veículos circulando por seções de controle definidas nas vias ou em interseções (Robillard, 1975; Van Zuylen e Willumsen, 1980; Paramahansan, 1999).

O primeiro método, denominado distribuição de viagens, faz parte do tradicional modelo de quatro etapas, sendo mais indicado para situações de planejamento ou projeto do sistema viário ainda inexistente, onde o nível de detalhamento exigido é menor em função da própria inexistência de várias informações que devem ser adotadas ou extrapoladas a partir de tendências de crescimento populacional, distribuição de atividades e mudanças nos padrões de trabalho, estudo e lazer por parte da população.

Por outro lado, as demandas sintéticas, por serem obtidas a partir de simples contagens volumétri-

cas, produzem resultados que podem ser desagregados em intervalos de tempo menores (até 15 min, por exemplo), ao contrário das demandas estimadas pelo método tradicional, que normalmente referem-se ao dia inteiro (Paramahansan, 1999). Como a calibração de simuladores de tráfego exige, em alguns casos, o conhecimento da variação da demanda de uma forma bem detalhada, a estimativa de demandas sintéticas é o procedimento mais indicado nesse caso.

Os dois métodos serão descritos nos itens 3.1 e 3.2, respectivamente, tomando como base a rede da Figura 2, formada por quatro zonas de produção e atração de viagens (nós 1 a 4). Conectando as zonas, existem 16 tramos, cujo sentido de tráfego é indicado por setas. Os tramos 1, 3, 5 e 7 conectam as zonas de origem à rede, enquanto que os tramos 2, 4, 6 e 8 conectam a rede às zonas de destino. Os demais tramos (9 a 16) são tramos intermediários, utilizados como rota para a realização das viagens. Próximos aos tramos são mostrados seus números identificadores, acompanhados dos tempos de viagem (entre parênteses), expressos em segundos.



**Figura 2:** Rede hipotética escolhida como exemplo

### 3.1. Distribuição de Viagens

A distribuição de viagens, conforme foi mencionado, é uma das etapas de um modelo mais amplo de planejamento de transportes, denominado *modelo de quatro etapas*, listadas a seguir:

- geração de viagens;
- distribuição de viagens;
- divisão modal; e
- alocação do tráfego.

A aplicação do modelo de 4 etapas depende dos resultados obtidos através do uso de modelos de uso do solo (Khisty, 1979; Khisty, 1981), que fornecem a distribuição espacial de atividades em uma cidade ou região. Em função dessa distribuição, pode-se estimar qual é o total de viagens produzidas em e atraídas para cada uma das zonas consideradas. Em seguida, utilizando modelos de distribuição de viagens, tais como Fratar ou Gravitacional, são definidas as demandas entre zonas. As demandas obtidas são então estratificadas por modo (automóvel, ônibus, a pé) e, em seguida alocadas à rede viária, obtendo-se assim os prováveis volumes de tráfego que circularão pela rede.

Os próximos itens apresentam uma descrição das 4 etapas, dando mais ênfase às etapas de distribuição e alocação, para que seja possível fazer uma analogia entre elas e o método para estimativa de demandas sintéticas.

### 3.1.1. Geração de viagens

A fase de estimativa das viagens geradas consiste em determinar os totais de viagem produzidos em e atraídos para cada uma das zonas de uma cidade. Uma das formas de determinar as viagens produzidas na rede da Figura 2 seria através de entrevistas domiciliares nas zonas 1, 2, 3 e 4. Dessa maneira, pode-se determinar o número de viagens a partir do número de pessoas em cada residência, da posse ou não de um certo número de automóveis e da faixa de renda familiar e, em seguida, calcular taxas médias de viagem por cada categoria de família (por exemplo, famílias com 3 pessoas, 1 automóvel e renda maior que R\$ 3000,00).

Com esse processo, denominado análise de categorias, é possível em seguida determinar as viagens produzidas a partir dos locais de moradia, considerando que as taxas de viagens são constantes para famílias de uma mesma categoria, e supondo ainda que a distribuição das categorias familiares em cada zona seja conhecida.

Para estimar as viagens atraídas para locais de trabalho ou estudo, utilizam-se taxas de atração de viagens em função da atividade, definidas por área de ocupação. Por exemplo, se considerarmos uma zona comercial de 1000 m<sup>2</sup> na qual existem lojas de eletrodomésticos que atraem 7,5 viagens/m<sup>2</sup>, o número total de viagens atraídas para essa zona seria 7500.

O processo de atração de viagens está intimamente relacionado com a atividade que é desenvolvida na região, ou seja, é necessário saber se a região é industrial, comercial, habitacional, se há escolas e universidades, pois tais fatores irão influir de maneira considerável na taxa de atração da zona.

### 3.1.2. Distribuição de viagens

No processo de geração de viagens, são determinados somente os totais de viagens produzidas e atraídas de e para cada uma das zonas. Entretanto, o total de viagens produzidas em uma zona distribui-se por várias outras zonas, de forma que para determinar a demanda de viagens entre zonas é necessário fazer uma distribuição destas viagens, determinando qual parcela de veículos que saem de uma zona e vão para uma outra zona especificada. Para isto, existem métodos como Fratar e o modelo gravitacional, que será explicado a seguir.

O modelo gravitacional tem este nome devido ao fato dele ter sido elaborado a partir de uma analogia com o modelo gravitacional de Newton. Para estimar a distribuição de viagens a partir deste modelo, considera-se que a demanda  $q_{ij}$  entre as zonas  $i$  e  $j$  é proporcional ao número de viagens produzidas em  $i$  ( $P_i$ ), ao número de viagens atraídas para  $j$  ( $A_j$ ) e inversamente proporcional ao custo generalizado da viagem  $c_{ij}$  entre as duas zonas:

$$q_{ij} = P_i B_i A_j C_j f(c_{ij}) \quad (1)$$

sendo  $f(c_{ij})$  uma função do custo generalizado, tal como  $c_{ij}^{-2}$ ,  $c_{ij}^{-1}$ ,  $\exp(c_{ij})$ , etc, e  $B_i$  e  $C_j$  fatores para balanceamento da equação. Esses fatores são calculados iterativamente através das equações:

$$B_i = \frac{1}{\sum_j A_j C_j f(c_{ij})}, \quad C_j = \frac{1}{\sum_i P_i B_i f(c_{ij})} \quad (2)$$

sendo que os totais de viagens devem satisfazer as seguintes restrições:

$$\sum_j q_{ij} = P_i, \quad \sum_i q_{ij} = A_j \quad (3)$$

Supondo no caso que somente os totais de viagens produzidos e atraídos nas zonas 1 a 4 são conhecidos (Figura 3), as demandas são determinadas a partir da implementação das equações do modelo gravitacional em uma planilha eletrônica, tal como o Excel.

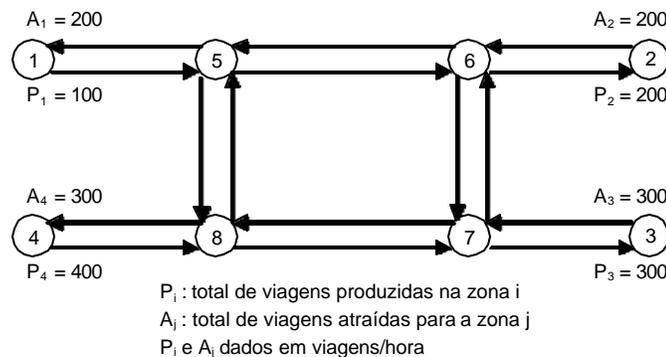
Considerando que todos os tramos possuem 500 m de comprimento e velocidade de fluxo livre igual a 60 Km/h (exceto nos tramos 11 e 12, nos quais a velocidade de fluxo livre é 50 Km/h), podem ser determinados tempos de viagem entre nós  $i$  e  $j$  da seguinte forma:

$$t_{ij} = \begin{cases} 0, & i = j \\ 3,6 \frac{S}{v}, & i \neq j \end{cases} \quad (4)$$

sendo  $S = 500$  m e  $v$  a velocidade dos veículos no tramo (60 ou 50 km/h). Para viagens intrazonais, o tempo é considerado igual a zero por conveniência, pois como será visto toda a formulação foi elaborada de forma a evitar que existam viagens intrazonais.

Para determinar o tempo de viagem para cada demanda, é necessário verificar quais são as rotas possíveis, identificar quais são os tramos que compõem as rotas, somar os tempos de viagem em cada tramo, obtendo assim os tempos de viagem em cada rota. Por exemplo, as viagens entre os nós 4 e 2 podem utilizar duas rotas possíveis:

- $7 \rightarrow 15 \rightarrow 9 \rightarrow 4$ , com um tempo de viagem igual a  $30 + 30 + 36 + 30 = 126$  s; ou
- $7 \rightarrow 14 \rightarrow 12 \rightarrow 4$ , com um tempo de viagem igual a  $30 + 30 + 30 + 30 = 120$  s.



**Figura 3:** Totais de viagens produzidos ( $P_i$ ) ou atraídos ( $A_j$ ) nas zonas

Por simplicidade, pode ser considerado que todas as viagens são realizadas pela rota de menor custo, ou seja, de menor tempo de viagem. Assim, todas as viagens de 4 para 2 utilizam a rota  $7 \rightarrow 14 \rightarrow 12 \rightarrow 4$ , que passa a ser chamada de *caminho mínimo* para a demanda  $q_{42}$ . Utilizando o mesmo procedimento para todos os pares O-D, são obtidos os caminhos mínimos para toda a rede. O conjunto de caminhos mínimos que tem como origem um mesmo nó é então denominado *árvore de caminhos mínimos*. As árvores para os nós 1 a 4 são mostradas na Figura 4, sendo que os nós coloridos em cinza representam os nós de origem das viagens e os números próximos aos nós são mostrados no formato X(Y), em que X é o nó precedente e Y o tempo acumulado de viagem, deste o nó de origem até o nó em questão. Por exemplo, próximo ao nó 7 da árvore do nó 4, é mostrado 8(60), o que significa que o nó anterior da rota das viagens  $4 \rightarrow 2$  (ou  $4 \rightarrow 3$ ) é o nó 8, e a duração

da viagem entre os nós 4 e 7 é 60 s.

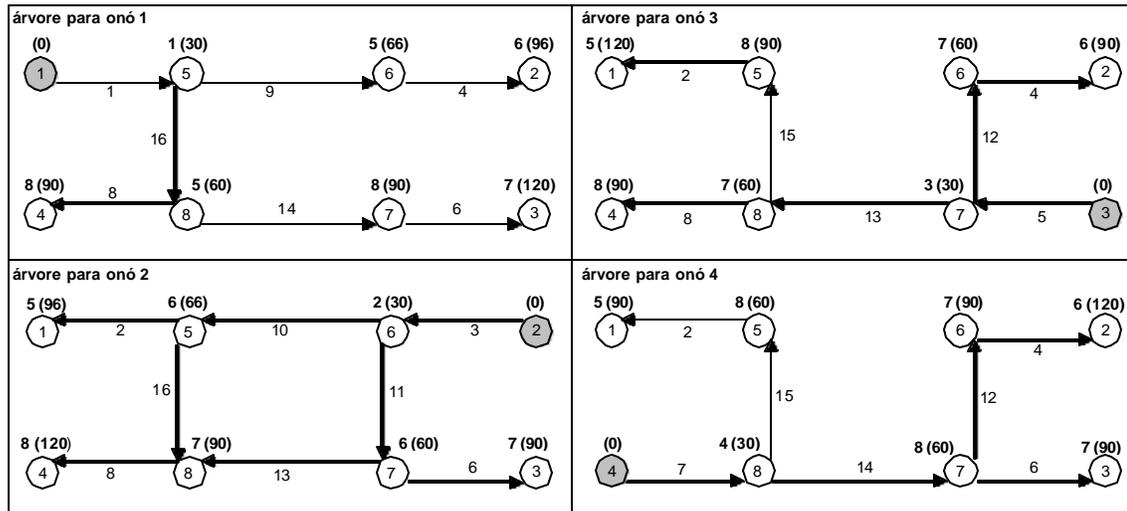


Figura 4: Representação gráfica das árvores de caminhos mínimos

Outra forma de representar as rotas de caminhos mínimos, mais indicada para implementação computacional, é o formato de lista (Tabela 1a), na qual são mostradas as seqüências de tramos das rotas, ao invés da seqüência de nós adotada na representação gráfica.

Tabela 1: (a) Caminhos mínimos e (b) tempos de viagens entre zonas

(a) Caminhos mínimos				(b) tempos de viagens entre zonas (s)				
Demanda	Rota (tramos)	Demanda	Rota (tramos)	O-D	1	2	3	4
q <sub>12</sub>	1→9→4	q <sub>31</sub>	5→13→15→2	1	0	96	120	90
q <sub>13</sub>	1→16→14→6	q <sub>32</sub>	5→12→4	2	96	0	90	120
q <sub>14</sub>	1→16→8	q <sub>34</sub>	5→13→8	3	120	90	0	90
q <sub>21</sub>	3→10→2	q <sub>41</sub>	7→15→2	4	90	120	90	0
q <sub>23</sub>	3→11→6	q <sub>42</sub>	7→14→12→4					
q <sub>24</sub>	3→11→13→8	q <sub>43</sub>	7→14→6					

O passo seguinte é calcular os tempos de viagens para as rotas ótimas mostradas na Tabela 1a ou retirar da Figura 4 os tempos acumulados nos nós de destino. Com esses valores, é elaborada uma matriz de tempos de viagem (Tabela 1b). Em seguida, é definida uma função de custo generalizado, que no caso foi adotada, por conveniência como sendo função unicamente do tempo de viagem e de um parâmetro ( $\beta = -3,5$ ), que deve ser calibrado na prática, mas para o exemplo em questão foi adotado arbitrariamente:

$$f(c_{ij}) = \begin{cases} 0, & i = j \\ \left(\frac{t}{60}\right)^{-3,5}, & i \neq j \end{cases} \quad (5)$$

Dessa maneira, os elementos da matriz de custos generalizados mostrada na Tabela 2 são calculados a partir dos tempos de viagens determinados na Tabela 1b.

**Tabela 2:** Matriz de custos generalizados de viagem  $f(c_{ij})$ 

O-D	1	2	3	4
1	0,0000	0,1930	0,0884	0,2419
2	0,1930	0,0000	0,2419	0,0884
3	0,0884	0,2419	0,0000	0,2419
4	0,2419	0,0884	0,2419	0,0000

Para resolver o problema de distribuição de demandas, adotam-se inicialmente valores de  $C_j$  como sendo 1,0 e então são calculados valores de  $B_i$  em função de  $C_j$ ,  $A_j$  e  $f(c_{ij})$ . Em seguida, os valores de  $B_i$  são utilizados no cálculo de  $n$  novos valores de  $C_j$ , juntamente com os totais produzidos  $P_i$  e os valores de  $f(c_{ij})$ . O processo é repetido de forma iterativa, até que os valores de  $B_i$  e  $C_j$  não se alterem significativamente de uma iteração para outra, permitindo assim o cálculo das demandas por viagens entre zonas  $i$  e  $j$  através da equação (3). A Tabela 3 apresenta assim a matriz de distribuição de viagens para o exemplo em questão.

### 3.1.3. Divisão Modal

Após o processo de distribuição de viagens, é realizada a divisão modal, ou seja, estimados os percentuais de viagem realizados por automóveis, ônibus ou trem, por exemplo. Por simplicidade, no exemplo em questão será considerado que todas as viagens são realizadas pelo mesmo modo, de forma que a proporção de viagens realizadas por esse modo é 100%.

**Tabela 3:** Matriz de distribuição de viagens

O-D	1	2	3	4	$\Sigma P_i$
1	0	27	12	61	100
2	48	0	91	61	200
3	23	99	0	178	300
4	129	74	197	0	400
$\Sigma A_j$	200	200	300	300	1000

### 3.1.4. Alocação de tráfego

A etapa seguinte à divisão modal é a alocação de tráfego, que consiste em distribuir as viagens da Tabela 3 pelas rotas disponíveis entre cada par O-D. Existem diversos métodos de alocação de tráfego mas, em geral, todos eles baseiam-se em determinar os caminhos de menor custo ou determinar distribuições veiculares que façam com que o custo de viagem seja o mesmo em todas as possíveis rotas (o que é denominado *equilíbrio de Wardrop*). Isto é feito determinando uma equação de custo, sendo este representado pelo tempo, distância, ou uma combinação desses fatores, ou ainda outros fatores que são levados em consideração antes de se tomar a decisão sobre a escolha de uma determinada rota.

No exemplo em questão, foi adotada uma alocação do tipo *tudo ou nada*, em que todas as viagens são alocadas às rotas de menor tempo de viagem, definidas na Figura 4 ou na Tabela 1a, e que os volumes de tráfego que circularão pelas rotas escolhidas não provocam aumento significativo nos tempos de viagem da rota escolhida, o que poderia motivar alguns dos veículos a escolher uma rota

alternativa. Utilizando o critério do caminho mínimo, as demandas  $q_{13}$ ,  $q_{42}$  e  $q_{43}$  são alocadas ao tramo 14, de forma que o volume total que circula por esse tramo é  $V_{14} = 12 + 74 + 197 = 283$  veíc/h. Adotando o mesmo raciocínio para os tramos restantes, são obtidos os volumes de tráfego mostrados na Figura 5.

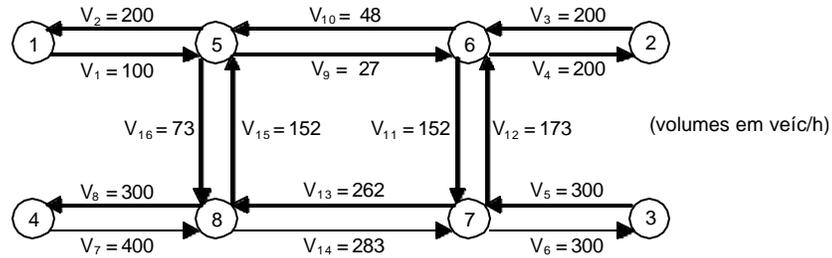


Figura 5: Volumes de tráfego alocados à rede

### 3.2. Demandas Sintéticas

Um dos inconvenientes do processo tradicional de estimativa de demandas é a necessidade de se realizar pesquisas O-D através de entrevistas ou contagens em pontos de controle, que envolvem uma grande quantidade de pessoas e consomem tempo e recursos financeiros consideráveis. Devido à restrições de orçamento, tempo e pessoal, alguns pesquisadores começaram a investigar, a partir da década de 1970, meios alternativos de se estimar demandas a partir de contagens volumétricas em diversos pontos da rede de tráfego (Paramahansan, 1999). As demandas obtidas através desse método alternativo são chamadas de demandas sintéticas e o processo de sua obtenção pode ser considerado, de certa forma, como sendo o inverso ao método tradicional, pois neste último os volumes de tráfego são alocados à rede após a determinação das demandas, enquanto que as demandas sintéticas são determinadas a partir dos volumes observados.

Para determinar as demandas sintéticas, é necessário realizar contagens volumétricas nos tramos ou interseções da rede e determinar os caminhos mínimos para cada uma das demandas. Para o caso específico da rede adotada como exemplo, as informações necessárias para a estimativa de demandas sintéticas seriam os volumes de tráfego mostrados na Figura 5 e os caminhos mínimos definidos na Figura 4 ou Tabela 1a. Dessa maneira, a relação entre as demandas que utilizam um dado tramo  $a$  e o volume observado neste tramo é dado por:

$$V^a = \sum_{ij} p_{ij}^a q_{ij} \quad (6)$$

em que:

$V^a$  : volume observado no tramo  $a$  [veíc/h];

$q_{ij}$  : demanda cuja origem é o nó  $i$  e tem como destino o nó  $j$  [veíc/h]; e

$p^a$  : porcentagem de viagens da demanda  $q_{ij}$  que utiliza o tramo  $a$ .

Adotando este mesmo raciocínio para os  $n_a$  tramos da rede, é obtido um sistema com  $n_a$  equações que pode ser expresso na forma matricial, como mostra a Figura 6. Nesta figura, a matriz composta pelos números “0” e “1” representa os percentuais de viagens de cada uma das demandas que utiliza um determinado tramo. Cada uma das linhas da matriz corresponde a um dos tramos da rede, e cada coluna da matriz identifica uma demanda. Por exemplo, o número “1” na célula da terceira linha e quinta coluna da matriz (tramo 3, demanda  $q_{23}$ ) indica que 100% da demanda  $q_{23}$  utiliza o

tramo 4 como rota de viagem. Da mesma forma, um valor 0 na célula da linha 14, coluna 1, indica que a demanda  $q_{12}$  não utiliza o tramo 14.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \\ V_7 \\ V_8 \\ V_9 \\ V_{10} \\ V_{11} \\ V_{12} \\ V_{13} \\ V_{14} \\ V_{15} \\ V_{16} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} q_{12} \\ q_{13} \\ q_{14} \\ q_{21} \\ q_{23} \\ q_{24} \\ q_{31} \\ q_{32} \\ q_{34} \\ q_{41} \\ q_{42} \\ q_{43} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 100 \\ 200 \\ 200 \\ 200 \\ 300 \\ 300 \\ 400 \\ 300 \\ 27 \\ 48 \\ 152 \\ 173 \\ 262 \\ 283 \\ 152 \\ 73 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} q_{12} = 27 \\ q_{13} = 12 \\ q_{14} = 61 \\ q_{21} = 48 \\ q_{23} = 91 \\ q_{24} = 61 \\ q_{31} = 23 \\ q_{32} = 99 \\ q_{34} = 178 \\ q_{41} = 129 \\ q_{42} = 74 \\ q_{43} = 197 \end{bmatrix}$$

**Figura 6:** Equacionamento na forma matricial e resolução do sistema de equações

A matriz das porcentagens de utilização dos tramos, multiplicada pelo vetor de demandas, fornece como resultado o vetor dos volumes observados. Dessa forma, as demandas são estimadas a partir da resolução do sistema de equações, sendo os resultados obtidos também apresentados na Figura 6. Estes resultados são equivalentes às demandas mostradas na Tabela 3.

#### 4. ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS

Considerando a existência de dois métodos alternativos para a determinação de demandas, é natural que sejam formuladas as seguintes questões: *i*) quando utilizar um ou outro método? *ii*) quais as vantagens e desvantagens de ambos os métodos? Esta parte do trabalho procura apresentar alguns argumentos que respondem tais perguntas.

Ambos os métodos possuem suas vantagens e desvantagens e a aplicação de um ou outro depende do contexto e dos dados disponíveis. A distribuição de viagens é relativamente simples, podendo ser feita em planilhas eletrônicas ou utilizando rotinas específicas para tal. No entanto, os dados necessários para execução do modelo, tais como os totais de viagens gerados e a função de custo generalizado (tal como o modelo gravitacional), não são tão simples de se obter, especialmente no caso da análise de cenários ainda inexistentes, em que as viagens geradas são previstas a partir de expectativas do uso do solo. Mesmo no caso de cenários existentes, as demandas entre zonas só podem ser obtidas a partir de pesquisas origem-destino (entrevistas domiciliares ou contagens em pontos de controle que constituem a única rota de viagem), o que exige uma grande quantidade de recursos humanos e financeiros, além de tempo para a realização das pesquisas.

Em função destes aspectos, é comum que a matriz O-D de uma cidade seja determinada num dado

período e, no futuro, atualizada a partir de fatores de crescimento populacional. Entretanto, nada garante que a proporção de viagens da matriz original mantenha-se inalterada, em função de eventuais modificações no comportamento dos usuários do sistema de transporte no futuro. Por exemplo, um tempo de viagem entre duas zonas pode ser considerado excessivo num dado momento mas, no futuro, ser considerado razoável em função do aumento global do volume de tráfego em toda a rede.

A determinação de demandas sintéticas requer, por outro lado, menos recursos físicos e financeiros, pois se baseia apenas nos volumes de tráfego e tempos (ou distâncias) de viagens. Com a utilização cada vez mais expressiva de contadores automáticos e sistemas de monitoramento do tráfego em algumas cidades, torna-se cada vez mais simples obter os dados mencionados. Assim, as matrizes O-D sintéticas podem ser estimadas de forma rápida, para intervalos de tempo menores que os normalmente adotados no processo tradicional. Deve ser observado que, para simular adequadamente a operação do tráfego e capturar o impacto da variação da demanda na operação é desejável trabalhar com demandas desagregadas no tempo. É fato conhecido que oscilações na demanda que ocorrem em intervalos de 15 minutos, por exemplo, podem produzir congestionamentos que se propagam além do intervalo de tempo em questão. Caso o intervalo de tempo considerado fosse 1 hora, tal impacto poderia não ser representado de forma adequada.

Outro ponto positivo a ser considerado é que o problema de distribuição de viagens é um caso particular do problema de estimativa de demandas sintéticas, no qual só são conhecidos os volumes nos tramos que conectam as zonas de origem e destino à rede (Van Aerde *et al.*, 2002). Portanto, a estimativa de demandas sintéticas permite a utilização de uma maior quantidade de informações do que o método tradicional.

Entretanto, o método para determinação de demandas sintéticas apresenta duas dificuldades não encontradas no método tradicional. A primeira dificuldade refere-se à falta de continuidade de fluxos em tramos contíguos, o que ocorre quando a soma dos volumes observados em um ou mais tramos não é igual à soma dos volumes nos tramos seguintes, seja por eventuais erros de contagem ou em função da agregação de dados em intervalos de tempo (Bertoncini, 2003). Ou seja, ocorre “perda” ou “criação” de veículos sem motivo aparente, contrariando o princípio básico de continuidade de fluxos em redes.

A segunda dificuldade existente no processo de estimativa de demandas sintéticas é que o sistema de equações que relaciona volumes observados e demandas normalmente não tem uma única solução. Por exemplo, o sistema apresentado na Figura 6 apresenta como resultado as mesmas demandas apresentadas na Tabela 3, visando estabelecer uma analogia entre os métodos de distribuição de viagens e de demandas sintéticas. No entanto, o sistema de equações apresentado na Figura 6 apresenta equações que são redundantes (equivalentes a outras equações), o que faz com que o número de demandas ou incógnitas a serem determinadas seja maior que o número de equações não redundantes e o sistema tenha múltiplas soluções além da apresentada na Figura 6. Para resolver este tipo de problema, torna-se necessária a estimativa da matriz O-D mais provável utilizando fundamentos de análise combinatória, como é descrito por Paramahansan (1999) e Bertoncini (2003), e implementação computacional em programas como o QUEENSOD (Van Aerde, 1998).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram descritos dois métodos para estimativa de demandas por viagens entre as zo-

nas (ou pontos) de uma região, tal como uma cidade ou mesmo um conjunto de cidades. O primeiro método, denominado distribuição de viagens, é parte integrante do modelo de 4 etapas e permite a estimativa do número de viagens entre zonas a partir dos totais de viagens geradas em cada uma das zonas. A partir das demandas, são estimados os prováveis volumes de tráfego que utilizarão a rede de tráfego através da alocação das viagens estimadas na etapa anterior.

Por outro lado, a estimativa de demandas sintéticas é praticamente o processo inverso do primeiro. Os volumes de tráfego, que são o resultado final da aplicação do modelo de 4 etapas, constituem no segundo método os dados necessários para estimativa das demandas sintéticas, a partir da resolução de sistemas de equações que relacionam os volumes observados às demandas.

Considerando as dificuldades relativas ao método de estimativas de demandas sintéticas e que a fundamentação teórica relacionada ao assunto é mais recente que a teoria dos modelos de distribuição de viagens – os primeiros trabalhos sobre demandas sintéticas são da década de 1970 – é natural que este método ainda não tenha sido bem assimilado e compreendido pelos profissionais envolvidos no planejamento e operação de sistemas de transportes. Torna-se necessário então uma divulgação mais efetiva das vantagens deste método em relação ao método tradicional, através de sua aplicação a exemplos hipotéticos ou mesmo reais, o que já vem sendo feito em alguns trabalhos (Paramahamsan, 1999; Bertoncini, 2003). Também é desejável a definição de algoritmos e procedimentos que tornem a estimativa de demandas sintéticas um processo mais prático e simples de ser empregado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERTONCINI, B. V. (2003) *Estimativa de Demandas Sintéticas utilizando o QUEENSOD*. Relatório de projeto de iniciação científica (PIBIC). Departamento de Engenharia Civil, UEM, Maringá, PR, 21 p.
- KHISTY, C. J. (1979) "Land-Use Allocation Model for Small And Medium-Sized Cities". *Transportation Research Record 730*, p. 34-38.
- KHISTY, C. J. (1981) "Evaluation of Two Residential Models for Land Use Allocation". *Transportation Research Record 820*, p. 29-33.
- KHISTY, C. J. (1990). *Transport Engineering - an Introduction*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J.
- ORTÚZAR, J. D.; WILLUMSEN, L. G. (1990). *Modeling Transport*. John Wiley & Sons, Chichester.
- PARAMAHAMSAN, H. (1999) *Fundamental Properties of Synthetic O-D Generation Formulations and Solutions*. Dissertação (Mestrado), Department of Civil and Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA. 133 p.
- PORTUGAL, L. S; GOLDNER, L. G. (2003) *Estudo de Pólos Geradores de Tráfego e de seus Impactos nos Sistemas Viários e de Transportes*. 1ª. ed, Edgard Blücher, 322 p.
- RAKHA, H. VAN AERDE, M.; BLOOMBERG, L.; HUANG, X (1998) "Construction and Calibration of a Large-Scale Microsimulation Model of the Salt Lake Area". *Transportation Research Record 1644*, p. 93-102.
- ROBILLARD, P. (1975) "Estimating the O-D Matrix from Observed Link Volumes" *Transportation Research*, v. 9, p. 123-128.
- VAN AERDE, M. (1998) QueensOD – Release 2.10 – User's Guide: Estimating Origin Destination Traffic Demands from Link Flow Counts. M. Van Aerde and Associates, EUA.
- VAN AERDE, M.; RAKHA, H.; PARAMAHAMSAN, H. (2002) "Estimation of OD Matrices: the Relationship between Practical and Theoretical Considerations". não publicado.
- VAN ZUYLEN, H. J.; WILLUMSEN, L. G. (1980) "The Most Likely Trip Matrix Estimated from Traffic Counts". *Transportation Research*, v. 14B, p. 281-293.

**Agradecimentos:** os autores deste trabalho agradecem ao CNPq, pela concessão de bolsas de produtividade e de iniciação científica. Também agradecem aos revisores anônimos deste trabalho, pelos seus comentários e sugestões que foram úteis para a elaboração da versão definitiva do artigo.

**Endereço dos autores:**

Sergio Henrique Demarchi (shdm@terra.com.br)

Professor Adjunto, Depto. de Engenharia Civil,

Grupo de Engenharia de Transportes

Bruno Vieira Bertoncini (bruviber@irapida.com.br)

Aluno de iniciação científica, curso de Engenharia Civil

Universidade Estadual de Maringá – UEM

Av. Colombo, 5790 - Bloco C67

87020 - 900 – Maringá, PR, Brasil

fone: (044) 261-4322

fax: (044) 261-4322