

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**UM MÉTODO DE ALOCAÇÃO DE CONTADORES VOLUMÉTRICOS DE  
TRÁFEGO NUMA REDE RODOVIÁRIA PARA ESTIMAR MATRIZES  
ORIGEM - DESTINO**

**Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para  
a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**



0.216.100-1

UFSC-BU

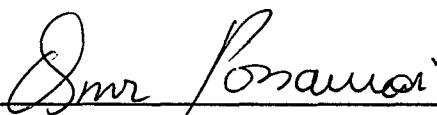
**Diva Marília Flemming**

**Florianópolis, dezembro de 1993**

UM MÉTODO DE ALOCAÇÃO DE CONTADORES VOLUMÉTRICOS DE TRÁFEGO NUMA  
REDE RODOVIÁRIA PARA ESTIMAR MATRIZES ORIGEM-DESTINO

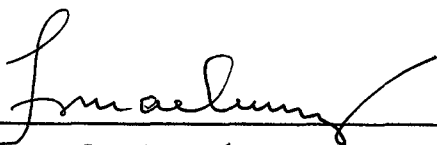
DIVA MARÍLIA FLEMMING

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR  
EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO e aprovada em sua forma final pelo  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.



Prof. Osmar Possamai, Dr. Ing.  
Coordenador do Curso

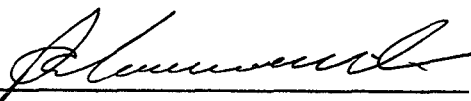
Banca Examinadora:



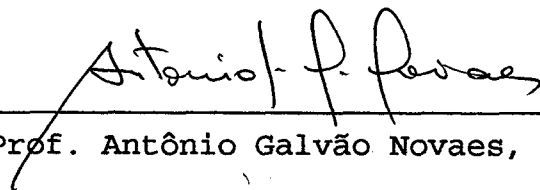
Prof. Ismael Ulysséa Neto, Ph.D.  
ORIENTADOR



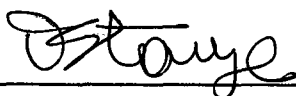
Prof. Licínio da Silva Portugal, Dr.  
EXAMINADOR EXTERNO



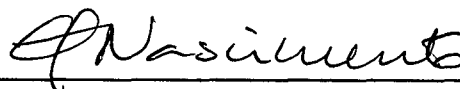
Prof. Paulo Cezar M. Ribeiro, Ph.D.  
EXAMINADOR EXTERNO



Prof. Antônio Galvão Novaes, Dr.



Prof. Plínio Stange, Dr.



Prof. Eunice P. Nascimento, Dra.  
MODERADORA

Para Ovande,  
Elisa,  
Claudia e  
Reinaldo,  
pelos  
laços eternos  
que nos unem.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Ismael Ulysséa Neto pela sua orientação segura, dedicação e apoio durante a elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Plinio Stange, sou grata, pela sua orientação na fase inicial do meu pós-graduação.

Agradeço ao Eng. Luis G. Willumsen, da Steer Davies Gleave, e ao Prof. Antônio Galvão Novaes, da UFSC, pelas sugestões e incentivo na fase conclusiva desta tese.

Aos meus familiares e amigos, agradeço pelos incentivos e estímulos.

A Universidade Federal de Santa Catarina estendo os meus agradecimentos.

## RESUMO

Uma etapa importante dentro de um planejamento de transportes é a previsão da demanda de transporte de passageiros. Os modelos usados para obter essa previsão, podem ser agrupados conforme a sua estrutura. A modelagem seqüencial da demanda é muito usada e é feita através de uma decomposição das decisões de viagens do viajante em vários estágios. Para cada estágio estabelecem-se submodelos. Dentre esses submodelos tem-se os modelos para estimar uma matriz origem-destino (O-D) de viagens.

Este trabalho apresenta dois novos modelos para estimar uma matriz O-D de viagens, cuja função objetivo é uma função entrópica do tipo condicional e cujas restrições envolvem as contagens volumétricas e dados de produção e atração de viagens. Esses modelos são calibrados e testados com exemplos simulados, apresentando boas estimativas.

As informações contidas nas contagens volumétricas podem ser bem aproveitadas para estimar matrizes O-D de viagens, desde que a localização dos postos de contagens seja otimizada.

Este trabalho apresenta um método heurístico de alocação de contadores volumétricos de tráfego, numa rede rodoviária, com o propósito de levantar informações de fluxo para estimar matrizes O-D de viagens de passageiros. O método sugerido é flexível para que possa atender a necessidade de calibração de diferentes modelos. Este método foi testado em várias redes simuladas. As distribuições geradas foram utilizadas na estimativa de matrizes O-D de viagens, envolvendo três diferentes modelos. As estimativas obtidos foram consideradas boas. Portanto, o método determina uma distribuição de contadores volumétricos que vai nortear a coleta de fluxos, de forma a obter-se uma boa informação.

## ABSTRACT

Passenger travel demand forecasting is an essential step of the transport planning process. Travel demand models with different structures have been widely used in the past. In particular, an emphasis has been placed on the sequential modelling approach and its sub-models and specially on the models used to estimate origin-destination (O-D) trip matrices.

This work presents two new models which estimate an O-D trip matrix. The maximization of a conditional-entropy function subjected to constraints on link traffic counts and trip ends, leads to the models structure. These models have been calibrated and tested for a simulated road network, generating good O-D flow estimates.

The information embedded in the traffic counts, on their turn, can be best used to estimate O-D trip matrices if the counting stations are properly assigned on the road network.

An heuristic method for assigning traffic counting stations on a road network is then developed with the aim at obtaining a proper amount of information to best estimate an O-D trip matrix. The developed method is flexible enough so as to meet the need to calibrate different models. The method has been tested with several simulated road networks and its estimates were performed with three different models. The obtained estimates were considered good ones, leading the author to the conclusion that the proposed traffic counting station assignment method directs the traffic-counts gathering process in a way that the amount of information used to estimate an O-D trip matrix is considered to be more appropriate, when compared to alternative methods.

## SUMÁRIO

### Capítulo I - INTRODUÇÃO

1.1 - O Sistema de Transportes no Contexto da Teoria Geral de Sistemas.....	001
1.2 - Previsão da Demanda de Transportes de Passageiros.....	004
1.2.1 - Modelos disponíveis.....	004
1.2.2 - Modelagem seqüencial da demanda...	006
1.3 - Calibração dos Modelos.....	010
1.4 - Utilização das Informações Obtidas a Partir das Observações de Fluxos de Passageiros no Processo de Previsão de Demanda....	011
1.5 - Objetivos do Trabalho.....	013
1.6 - Estrutura desse Trabalho.....	015

### Capítulo II - USO DAS CONTAGENS VOLUMÉTRICAS DE TRÁFEGO NA ESTIMATIVA DE MATRIZES DE ORIGEM-DESTINO

2.1 - Equação Fundamental.....	018
2.2 - Alocação de Tráfego.....	021
2.2.1 - Alocação tudo ou nada.....	023
2.2.2 - Alocação estocástica.....	025
2.2.3 - Alocação equilibrada.....	025
2.3 - Independência e Inconsistência das Contagens.....	026
2.3.1 - Independência.....	026
2.3.2 - Erros e inconsistências.....	027
2.4 - A Utilização das Contagens Volumétricas no Processo de Modelagem.....	028
2.4.1 - Modelos baseados no modelo gravi-	

tacional.....	029
2.4.2 - Modelos que utilizam alocação equilibrada.....	031
2.4.3 - Modelos baseados na maximização da entropia.....	032
2.4.4 - Análise dos modelos citados.....	036
2.5 - Alocação de Contadores.....	038
2.5.1 - Método proposto por Willumsen.....	038
2.5.2 - Método representativo.....	039
2.6 - Algumas Considerações.....	041

CAPÍTULO III - O USO DA TEORIA DA INFORMAÇÃO NO PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES

3.1 - Introdução.....	043
3.2 - Definições Iniciais.....	044
3.2.1 - Variável aleatória.....	044
3.2.2 - Distribuição de probabilidades de uma variável aleatória.....	046
3.3 - Medidas da Informação.....	046
3.4 - Entropia Conjunta e Entropia Condicional..	048
3.5 - Estado de um Sistema.....	049
3.6 - Utilização da Entropia em Modelos do Planejamento de Transportes.....	050
3.7 - Estabelecimento de um Referencial para Medir Informação Contida nas Contagens Volumétricas.....	052
3.8 - Resumo.....	056

CAPÍTULO IV - NOVOS MODELOS PARA ESTIMAR MATRIZES O-D DE VIAGENS QUE UTILIZAM CONTAGENS VOLUMÉTRICAS DE TRÁFEGO

4.1 - Introdução.....	059
4.2 - Matrizes O-D de Valores Máximos.....	059
4.2.1 - Definições básicas.....	060
4.2.2 - Algumas alterações na matriz W2 e	



W3.....	061
4.2.3 - Exemplos.....	062
4.3 - Um Novo Modelo para Estimar uma Matriz O-D de Viagens.....	067
4.4 - O Modelo M2.....	071
4.4.1 - Definição e estruturação.....	071
4.4.2 - Calibração do M2.....	075
4.5 - O Modelo M3.....	077
4.5.1 - Definição e estruturação.....	077
4.5.2 - Calibração.....	079
4.6 - Dedução do M2 e M3 Usando uma Distribuição de Probabilidades.....	081
4.7 - Algumas Observações.....	084

#### CAPÍTULO V - ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS MODELOS M2 E M3 ATRAVÉS DE UM EXEMPLO SIMULADO

5.1 - Introdução.....	086
5.2 - Descrição do Exemplo Simulado.....	087
5.3 - Descrição da Matriz de Valor Máximo.....	088
5.4 - Preparação dos Dados.....	091
5.5 - Estatísticas Usadas para Avaliação do De- sempenho dos Modelos M2 e M3.....	092
5.5.1 - Estatística phi-normalizada.....	093
5.5.2 - Índice de dissimilaridade.....	093
5.6 - Aplicação dos Modelos.....	094
5.6.1 - Aplicação do modelo M2.....	094
5.6.2 - Links não atuantes para o M2.....	096
5.6.3 - Algumas observações sobre o modelo M2.....	097
5.6.4 - Aplicação do modelo M3.....	098
5.6.5 - Links atuantes para o M3.....	102
5.6.6 - Comparação do modelo M3 com o mo- delo M1.....	103
5.6.7 - Outras observações sobre o modelo M3.....	105
5.7 - Alguns Testes Realizados com a Matriz de	

Valores Máximos.....	106
5.7.1 - Valores assumidos pela matriz W...	106
5.7.2 - A matriz W como uma matriz "a priori".....	107
5.8 - Considerações Finais.....	109

**CAPÍTULO VI - UM MÉTODO DE ALOCAÇÃO DE CONTADORES VOLUMÉTRICOS DE TRÁFEGO**

6.1 - Introdução.....	110
6.2 - Desenvolvimento do Novo Método.....	111
6.2.1 - Definição da área de estudo.....	112
6.2.2 - Zoneamento da área de estudo e caracterização da rede viária.....	112
6.2.3 - Definição do número de contadores.	115
6.2.4 - Classificação dos links.....	116
6.2.5 - Eliminação de links.....	123
6.2.6 - Setorização.....	125
6.2.6.1 - Definição da setorização	126
6.2.6.2 - Distribuição setorial...	128
6.2.6.3 - Classificação dos links por setores.....	131
6.2.7 - Escolha dos links para alocação dos contadores.....	132
6.2.7.1 - Alguns critérios de desempates.....	133
6.2.7.2 - Redefinição do número de contadores.....	134
6.3 - Resumo das Etapas do Método.....	135

**CAPÍTULO VII - TESTES PARA VERIFICAR A EFICIÊNCIA DO MÉTODO DE ALOCAÇÃO DE CONTADORES VOLUMÉTRICOS DE TRÁFEGO**

7.1 - Introdução.....	138
7.2 - Modelos Usados nos Testes.....	138
7.3 - Seqüências de Links.....	140

7.4 - Estatísticas Usadas.....	142
7.5 - Testes para Avaliar a Etapa de Classificação dos Links.....	143
7.5.1 - Descrição dos testes 1 e 2.....	143
7.5.2 - Conclusões.....	146
7.6 - Testes para Avaliar a Etapa de Setorização	147
7.6.1 - Descrição do teste 3.....	147
7.6.2 - Análise de dispersão .....	150
7.6.3 - Conclusões.....	154
7.7 - Observações Finais.....	155
<b>CAPÍTULO VIII - CONCLUSÕES</b>	
8.1 - Contribuições Oriundas dos Novos Modelos..	156
8.2 - Novas Pesquisas Baseadas nas Novas Contribuições.....	159
8.3 - Contribuições Oriundas do Novo método.....	160
8.4 - Novas Pesquisas Baseadas nas Contribuições do Novo Método.....	162
8.5 - Outras Sugestões.....	163
ANEXO I - DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS .....	164
ANEXO II - TABELAS.....	182
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	194

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - Etapas Metodológicas.....	015
FIGURA 2.1 - Parte de uma rede viária.....	027
FIGURA 3.1 - Rede viária simulada.....	045
FIGURA 3.2 - Variável aleatória.....	045
FIGURA 3.3 - Rede de um exemplo simulado.....	052
FIGURA 3.4 - Rede simulada.....	054
FIGURA 4.1 (A) - Matriz observada versus matriz W1..	066
FIGURA 4.1 (B) - Matriz observada versus matriz W2..	066
FIGURA 4.1 (C) - Matriz observada versus matriz W3..	067
FIGURA 4.2 - Espaço Amostral.....	068
FIGURA 5.1 - Rede do exemplo simulado.....	088
FIGURA 5.2 - Fluxos estimados versus fluxos observa- dos usando o modelo M2 e 8 links.....	096
FIGURA 5.3 - Volumes estimados versus volumes obser- vados do modelo M3.....	099
FIGURA 5.4 - % de links usados versus estatística $\phi$ usando o modelo M3.....	106
FIGURA 6.1 - Grafo simplificado da rede do ex. 1....	113
FIGURA 6.2 - Grafo simplificado da rede do ex. 2....	114
FIGURA 6.3 - Grafo simplificado da rede do ex. 3....	114
FIGURA 6.4 - Grafo simplificado da rede do ex. 4....	115
FIGURA 6.5 - Grafo simplificado da rede do ex. 5....	115
FIGURA 7.1 - Representação do exemplo 2 num sistema de coordenadas cartesianas.....	151
FIGURA 7.2 - Diagrama de dispersão dos links do ex.2	152
FIGURA A.1 - Ligação entre os programas auxiliares..	165
FIGURA A.2 - Fluxograma do programa COB.....	181
FIGURA A.3 - Seqüência do programa SOFT.....	175

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 - O Sistema de Transportes no Contexto da Teoria Geral de Sistemas.

Muitos pesquisadores têm apresentado propostas, nos últimos anos, para o desenvolvimento de uma "teoria geral de sistemas" (ver Simon, 1981). Em princípio esta teoria poderia ser aplicada a sistemas físicos, biológicos ou sociais. Neste contexto, surgem os sistemas simples e os sistemas complexos. Na maioria das vezes é útil o conhecimento de propriedades comuns, entre os diversos tipos de sistemas complexos.

O conceito de sistema complexo é relativo, isto é, um sistema  $S$  pode ser complexo no ponto de vista de um indivíduo  $I_1$  e ser um sistema simples no ponto de vista de um indivíduo  $I_2$ .

Este trabalho insere-se dentro do contexto de um sistema que é considerado pela grande maioria dos planejadores e pesquisadores da área de transportes, como um sistema complexo. Trata-se do Sistema de Transportes.

O reconhecimento da complexidade do sistema de transportes ajuda o planejador e/ou pesquisador a compreender, descrever, estruturar e modelar os diversos subsistemas.

Devido a sua complexidade, a implantação de um sistema de transportes deve ser baseada em um plano que racionalize a aplicação dos recursos disponíveis, otimizando os investimentos.

Durante os últimos 25 anos, um grande número de estudos de planejamento de transportes foram realizados em diversas áreas urbanas. A maioria dos planejadores reconhece falhas nos processos adotados, muitas decorrentes das dificuldades encontradas no tratamento da complexidade. Por exemplo, as incertezas são focos de complexidade que não tiveram um tratamento adequado em muitos processos de planejamento. Khan (1971 e 1972) discute a aplicação da Teoria Estatística da Decisão nestes casos.

Estudos sobre as falhas nas atividades de planejamento de transportes, podem ser encontrados em diversos trabalhos. Hutchinson (1974) discute falhas em diversas classes de impactos (p.ex., impactos ambientais negativos das auto-estradas sobre as atividades da comunidade). Batty (1978) apresenta falhas em modelos (p.ex., falhas quanto a conceituação mais precisa de objetivos). Ulysséa Neto (1990a e 1992) discute as deficiências decorrentes da incompatibilidade entre as metodologias de planejamento de transporte de passageiros adotadas e o contexto sócio-econômico vigente. Em todos esses trabalhos citados, como exemplo, encontram-se sugestões de melhorias.

O enfoque de sistema fornece uma estrutura apropriada à organização das atividades desenvolvidas em termos de planejamento. Espera-se que o planejamento de transporte urbano se desenvolva como um processo contínuo que envolva interação entre governo e comunidade urbana. As etapas:

- (a) definição do problema;
- (b) geração da solução;
- (c) análise da solução;
- (d) avaliação e escolha e

(e) implementação,

citados em Hutchinson (1974) e baseadas nos princípios de Hall (1962), constituem-se num procedimento para a organização do processo de interação comunidade-governo.

Considerando o alto grau de complexidade dos sistemas de transportes, torna-se necessário levar em conta o binômio sistema - meio ambiente, para planejar. O meio ambiente (conjunto de fatores exteriores ao sistema) influencia o comportamento do sistema e também é influenciado por este. Daí surge um grande desafio ao planejador - a definição de um problema ou a definição da interface sistema - meio ambiente. Após a definição do problema, o planejador percorre um caminho, através das etapas citadas, a fim de conseguir uma integração máxima entre o sistema e o meio-ambiente.

Desde a definição de um problema até a implantação de uma solução, o planejador usa muitas ferramentas. Uma ferramenta muito usada é a modelagem.

Um modelo, segundo Chorley (1968) e Lee (1973), é um instrumento útil e simplificador de um fenômeno que está sendo estudado no mundo real. Segundo Ben-Akiva (1975), através de um modelo entende-se um fenômeno do mundo real, e baseando-se neste entendimento podem-se tomar as decisões.

Quando solicita-se, por exemplo, um modelo para um determinado sistema complexo  $S$ , a três indivíduos  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$ , considerados capazes de modelar, provavelmente ficar-se-á diante de três modelos  $M_1$ ,  $M_2$  e  $M_3$ , diferentes entre si. Isto justifica os diversos tipos de modelos em planejamento urbano, regional e de transporte, encontrados na literatura. Cada indivíduo reduz a complexidade conforme a sua visão. Assim, é possível que exista mais de um "bom" e "útil" modelo que possa ser usado para estudar a previsão de demanda de transporte. Entende-se por um "bom" modelo, aquele que possui algumas características que não são conflitantes e que

principalmente levem em conta os custos associados a coleta, e o processamento dos dados, necessários à sua calibração (ver Stopher e Meyburg, 1975). Um modelo é "útil" quando propicia uma formulação simplificada, acessível, observável e controlável do fenômeno que está sendo estudado (ver Chorley, 1968).

Neste trabalho serão abordados vários modelos para previsão da demanda de transporte, especificamente transporte de passageiros.

## **1.2 - Previsão da Demanda de Transporte de Passageiros.**

Nesta secção, baseada em Ulysséa Neto (1988), será dada uma visão da modelagem da previsão da demanda de transporte de passageiros.

### **1.2.1 - Modelos disponíveis.**

Quanto a estrutura do sistema de interesse em relação ao qual estuda-se o perfil da demanda de transporte, pode-se dividir os métodos de modelagem desta demanda em dois grandes grupos:

- (a) Métodos que se baseiam numa rede viária.
- (b) Métodos que não se baseiam em redes.

Os métodos que se baseiam numa rede viária levam em consideração a localização espacial das unidades espaciais (zonas de tráfego ou localidades), para medir as suas interações. Aqui estão enquadrados os modelos de interação espacial.

Os métodos que não se baseiam em redes não levam em conta, via de regra, a localização das unidades espaciais. Os



relacionamentos que ocorrem entre os componentes do sistema são medidos através de técnicas tais como análise de "feedback", análise tipo "pulse" dentre outras (ver Roberts, 1975). Aqui estão enquadrados os modelos estruturais baseados nos métodos da Teoria dos Grafos.

Neste trabalho tem-se interesse em modelos que possam ser utilizados em termos de planejamento, portanto, destaca-se os modelos baseados em redes de transporte, pois estes, podem ser utilizados para quantificar e alocar os problemas de transporte no espaço.

Os modelos baseados em redes de transporte são classificados por Manheim (1973) em dois grandes grupos:

- (a) modelos de demanda diretos e
- (b) modelos de demanda seqüenciais.

A identificação do ponto de equilíbrio entre a demanda e a oferta de viagens numa rede de transporte é um objetivo comum a esses dois grupos.

A distinção entre os modelos diretos e os seqüenciais está no processo de modelagem.

Os modelos diretos são explícitos com relação às variáveis que explicam o perfil da demanda de viagens. Exemplos típicos destes modelos são: o modelo do modo abstrato (ver Quandt e Baumol, 1970) e o modelo geral de partilha (ver Manheim, 1973).

Os modelos seqüenciais são constituídos de submodelos que implicam no seccionamento da modelagem da demanda de viagens em vários estágios sucessivos.

A modelagem seqüencial apresenta a vantagem de reduzirem-se os problemas de multicolinearidades, que normalmente surgem entre as variáveis explicativas durante o processo de estimativa dos parâmetros dos submodelos.

Comparando os modelos diretos com os seqüenciais pode-se preferir os seqüenciais, pelo fato destes apresentarem uma estrutura hierarquizada, portanto adequada a um sistema complexo-hierárquico (ver Simon, 1981).

Ulysséa Neto (1990b) afirma que o método seqüencial é de grande valia para os países em desenvolvimento, pois suas vantagens operacionais podem ser exploradas.

Na secção seguinte, será feita uma descrição dos submodelos que compõem o método da modelagem seqüencial da demanda de transportes.

### **1.2.2 - Modelagem seqüencial da demanda.**

A modelagem seqüencial da demanda é feita através de uma decomposição das decisões de viagem do viajante em vários estágios. As decisões do viajante de realizar uma viagem, partindo de uma certa origem; de escolher um certo destino; de usar uma certa modalidade de transporte e de escolher uma rota, são modeladas de maneira seqüencial.

Considera-se que os viajantes adotam uma determinada seqüência de decisões, sem que haja, "a priori", uma razão que justifique tal escolha dentre as seqüências alternativas (ver Ben-Akiva, 1975).

O método seqüencial de modelagem é conhecido como o "método das quatro fases". Sua estrutura não prevê "feedbacks".

Um exemplo que pode ser citado é o "Urban Transportation Model System" (UTMS). Originalmente a idéia era aplicar este modelo em áreas urbanas. No entanto, ele tem sido aplicado, sem muito critério, fora do meio urbano. O UTMS é subdividido em 4 submodelos que são associados às decisões do viajante.

Os submodelos da modelagem seqüencial são:

- (a) modelos de geração de viagens;
- (b) modelos de distribuição de viagens;
- (c) modelos de escolha modal e
- (d) modelos de alocação de viagens à rede.

Segue um resumo sobre cada um desses modelos.

**(a) Modelos de geração de viagens.**

Os modelos de geração de viagens estão associados à decisão do viajante de realizar uma viagem. Eles estimam o número total de viagens que se originam (ou se destinam) em uma certa zona de tráfego "i".

A demanda de viagem é uma demanda derivada, pois as viagens estão sempre associadas a fins específicos, tais como trabalho, educação, recreação, compras, etc...

Os modelos de geração de viagens levam em conta somente as variáveis explicativas que estão associadas às atividades existentes no interior da zona. Dessa forma considera-se que a decisão de viajar é tomada sem levar em conta os possíveis destinos alternativos e sem considerar os serviços de transporte ao alcance do viajante.

Matematicamente escreve-se

$$O_i = f(\text{demografia, uso do solo e características sócio-econômicas em "i", status sócio-econômico do viajante}),$$

onde

$$O_i = \text{número total de viagens geradas em "i"}.$$

**(b) Modelos de distribuição de viagens.**

Os modelos de distribuição de viagens estão associados

à decisão de ir até um destino "j". Assim, esses modelos tem como objetivo, distribuir o total de viagens geradas em "i", entre os vários destinos alternativos "j". Esta distribuição é feita levando-se em conta as atratividades dos possíveis destinos e os custos generalizados de transporte associados a cada par de origem-destino. Os efeitos de impedância existentes entre as zonas são analisados nesta fase. As variáveis explicativas desses modelos são as variáveis sócio-econômicas, que representam a propensão de interação entre as zonas, e as medidas da impedância.

Matematicamente tem-se

$$T_{ij} = f(\text{variáveis sócio-econômicas em "i" e "j";} \\ \text{medida da impedância entre "i" e "j"}),$$

onde

$$T_{ij} = \text{número de viagens entre "i" e "j"}.$$

### (c) Modelos de escolha modal.

Os modelos de escolha modal estão associados a decisão de usar uma certa modalidade de transporte "k". É importante determinar quantas viagens serão realizadas através de cada modo disponível. A divisão modal pode ser expressa numericamente como uma fração, razão ou percentagem do número total de viagens. Os vários métodos desenvolvidos têm como base o fato de que, de uma dada demanda total de viagens, a proporção absorvida por uma determinada modalidade (ônibus, carro particular, trem, etc...) dependerá do padrão de qualidade do serviço oferecido por cada uma em relação às outras.

Encontra-se uma medida de competitividade através da análise de diversos fatores, que podem ser agrupados em três conjuntos:

(i) Fatores que definem as características da viagem a

ser feita (p.ex. distância a ser percorrida, hora do dia em que a viagem é feita, propósito da viagem).

(ii) Fatores que definem as características do viajante (p.ex. nível social, renda, propriedade de veículo).

(iii) Fatores que definem as características do sistema de transporte (p.ex. tempo de viagem, custo, acessibilidade).

A escolha modal pode ser feita antes ou depois da distribuição de viagens. Os modelos mais usados são os que fazem a repartição modal após a distribuição de viagem.

Tem-se usado três tipos de conceitos matemáticos para construir funções estocásticas de repartição modal: as análises discriminante, probit e logit. A mais usada é a logit.

Wilson (1970) mostra um modelo que combina a distribuição de viagem com a escolha modal, usando métodos de maximização da entropia.

#### **(d) Modelos de alocação de viagens à rede.**

Os modelos de alocação de viagens à rede estão associados a decisão do viajante de ir por uma determinada rota "p".

Na alocação de tráfego atribui-se um dado número de viagens a uma determinada rede de transporte.

A alocação de tráfego requer como "input" uma descrição completa das redes de transporte existentes e futuras, além de uma matriz de viagens interzonais. Uma vez definida a parte do tráfego que utilizará uma determinada rede de transporte (p.ex. rede rodoviária), deve-se proceder a alocação destes fluxos à rede existente ou a ser projetada.

Assim, basicamente o "output" é uma estimativa do volume de tráfego em cada "link" da rede.

### 1.3 - Calibração dos Modelos.

Na elaboração de modelos de transporte segue-se as seguintes etapas:

- Escolha de um enfoque teórico ( p. ex. enfoque funcionalista adotado por Alonso (1964)).
- Escolha de uma abordagem científica que alicerçará o modelo (p.ex. abordagem macroanalítica adotada no modelo de Wilson, 1975).
- Estruturação e derivação do modelo.
- Levantamento de dados.
- Calibração.
- Verificação da validade do modelo frente as teorias adotadas.
- Utilização do modelo calibrado para a previsão de situações futuras.

As etapas acima não devem ser analisadas isoladamente pois estão interligadas. As duas primeiras etapas ajudam o planejador e/ou pesquisador a ter apoio teórico indispensável na modelagem. Na estruturação do modelo deve-se ter em mente quais os tipos de dados disponíveis. As duas últimas etapas estão interligadas com a etapa de calibração.

A calibração do modelo constitui, portanto, numa etapa intermediária muito importante. Após a calibração o modelo pode se validado, isto é, verifica-se a sua validade frente a situação atual tomada como referência (ano base). Um modelo calibrado e validado pode ser utilizado para a previsão de situações futuras.

Na estrutura de um modelo identificam-se vários tipos de variáveis, por exemplo, variáveis explicativas, variáveis dependentes e variáveis de calibração. Após a calibração as variáveis de calibração passam a ser parâmetros fixos. Para se definir esses parâmetros fixos, utilizam-se várias técnicas conforme o tipo do modelo (ver Hyman, 1969; Evans, 1971; e Batty, 1976).

Para efeitos de calibração, pode-se distinguir dois grupos de modelos (ver Draper e Smith, 1966):

- (a) modelos intrinsecamente lineares e
- (b) modelos intrinsecamente não lineares.

Os modelos do tipo (a) são aqueles que são estruturados através de relações matemáticas que podem ser linearizadas. Neste caso a calibração é feita geralmente através de regressão simples ou múltipla.

Os modelos do tipo (b) apresentam relações matemáticas não linearizáveis. Neste caso a calibração é feita mediante o emprego de técnicas de busca, constituídas por processos de cálculos numéricos heurísticos (ver Novaes, 1978).

Em Novaes (1981) encontram-se exemplos de calibração de modelos do tipo (a) e (b).

#### **1.4 - Utilização das Informações Obtidas a Partir das Observações de Fluxos de Passageiros no Processo de Previsão de Demanda.**

No decorrer do desenvolvimento do processo de planejamento dos transportes utiliza-se muita informação. Estas informações são relativas a diferentes aspectos, como por exemplo, fluxos de passageiros e mercadorias, população,

renda, número de empregos, localização de fontes de consumo e de produção, etc... A obtenção dessas informações envolve a coleta de diferentes tipos de dados. A definição dos tipos de dados a serem coletados depende dos propósitos dos estudos, do tamanho da área em estudo e fundamentalmente dos recursos disponíveis para a coleta dos dados. A coleta de dados exige expressivos recursos financeiros e humanos.

Constata-se que a disponibilidade de dados adequados é um fator decisivo tanto na fase de estruturação como na fase de calibração de um modelo de demanda. A escolha de um método a ser usado pode ser definida após a verificação do tipo de dados disponíveis.

Ulysséa Neto (1989) salienta que existe a possibilidade de se conceber modelos que incorporem as informações obtidas a partir dos dados de fluxos coletados em diferentes níveis de agregação espacial. A vantagem maior desta estratégia reside no fato de usar dados de fluxos mais facilmente coletáveis e de baixo custo.

Em relação a quantidade de informação pode-se classificar os fluxos de passageiros nos seguintes grupos:

**(a) Origem - destino ( O - D) com propósito definido.** Os fluxos deste grupo contém basicamente as seguintes informações: origem da viagem, destino da viagem e propósito da viagem. Neste caso os dados só poderão ser obtidos através de entrevistas domiciliares e através de entrevistas nos veículos em vários pontos da rede.

**(b) Origem - destino.** Os fluxos deste grupo contém as informações: origem e destino da viagem. Neste caso não se conhece o propósito da viagem. Os dados podem ser obtidos através de tickets de passagem. A origem e o destino contida no ticket pode não representar a efetiva origem e destino do passageiro. O ticket, por exemplo, é emitido com origem "i" e destino "j", mas o passageiro pode ter seu real destino



situado além de "j", sob certas circunstâncias, este problema não invalida a utilização desses dados, cuja coleta é de baixo custo (ver Ulysséa Neto, 1988).

(c) **Contagens volumétricas.** O propósito das contagens volumétricas é o de estabelecer os padrões típicos de variação horária, diária e sazonal no fluxo de tráfego. Obtém-se, assim, o número de veículos e/ou pessoas que cruzam uma certa secção da via, sem entretanto detectar sua origem, destino e propósito de viagem. Estas contagens podem ser feitas de duas maneiras:

- manualmente usando formulários próprios e/ou contadores manuais e
- automaticamente, usando-se contadores automáticos.

Comumente utilizam-se contadores automáticos em conjunto com uma amostra de contagens manuais classificatórias para se determinar a composição do fluxo de tráfego .

As contagens volumétricas de tráfego sobre os links de uma rede rodoviária podem ser obtidas com muito menos recursos do que seriam necessários nas pesquisas de O-D nas vias (i.e. entrevistando-se os passageiros).

### 1.5 - Objetivos deste Trabalho.

Como as contagens volumétricas podem ser obtidas com poucos recursos, é razoável pensar em aproveitar ao máximo as informações contidas nesses dados. Essas informações são usadas para calibrar modelos de demanda e para estimar uma matriz O-D de viagens (ver Low, 1972 ; Jensen e Nielsen , 1973 ; Robillard , 1975; Symons et al. , 1976 ; Van Zuylen e

Willumsen ,1980 ; Willumsen , 1981a ; Willumsen ,1981b ; Fisk e Boyce , 1983 ; Maher, 1983; Bell, 1983 ; Cascetta e Nguyen, 1988 ; Nguyen et al., 1988 ; Göthe et al., 1989 ; Logie e Hynd, 1990 ; Lam e Lo,1991 e Yang et al., 1992).

Sabe-se, por outro lado, que a localização dos postos de contagens volumétricas, determina o grau de informação contido nas observações de fluxos. A posição espacial relativa destes postos, deve ser, portanto, otimizada para que um máximo de informação seja obtida.

Apesar das duas sugestões encontradas (ver Willumsen, 1981a; DER, 1987) para localização de postos de contagens volumétricas de tráfego, não existe até o momento uma metodologia que leve a uma sistematização desta localização de forma a extrair-se um máximo de informação das observações de fluxos, com o objetivo de estimar-se uma matriz O-D de viagens de passageiros.

Assim, os objetivos gerais deste trabalho são:

[1] Desenvolver um método de alocação de contadores volumétricos de tráfego numa rede rodoviária com o propósito de levantar informações de fluxo para estimar uma matriz de origem-destino de passageiros para uma área de estudo.

[2] Avaliar a eficiência do método proposto.

As etapas metodológicas usadas para atingir os objetivos deste trabalho foram definidas sempre dentro do esquema que segue mostrado na figura 1.1.

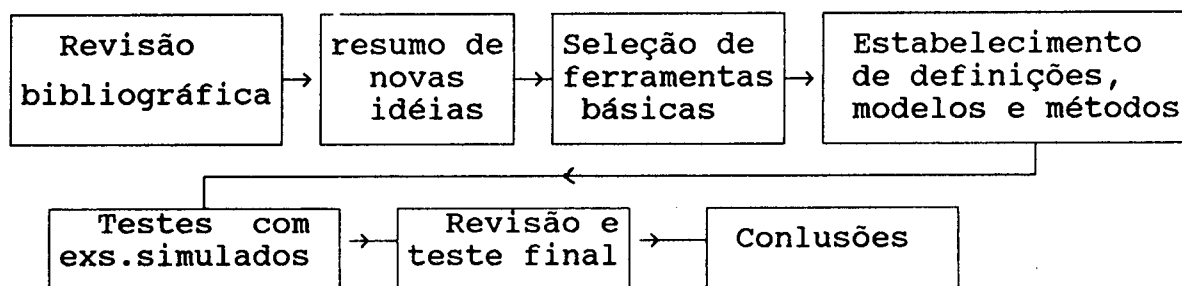


FIGURA 1.1 - *Etapas Metodológicas*

A sistemática dessa metodologia proposta gerou a análise detalhada dos modelos baseados na maximização da entropia, que utilizam as contagens volumétricas de tráfego nas suas restrições. Visualizou-se, então, a possibilidade de melhorar as estimativas obtidas, estruturando-se um novo modelo que utiliza as informações contidas nas contagens volumétricas de tráfego também na função objetivo. Acrescentou-se, então, os seguintes objetivos específicos:

[3] Estruturar um modelo para estimar uma matriz origem-destino de viagens de passageiros, cuja função objetivo absorve as informações contidas nas contagens volumétricas de tráfego.

[2] Analisar o desempenho do modelo usando redes simuladas.

## 1.6 - Estrutura Deste Trabalho.

Este trabalho está constituído de oito capítulos, dois anexos e referências bibliográficas. Após este capítulo introdutório tem-se o capítulo II, que apresenta o uso de contagens volumétricas de tráfego na estimativa de matrizes

de origem-destino de viagens (O-D). Nele apresentam-se então, alguns tópicos selecionados, referentes a definições, conceitos, modelos e métodos existentes na literatura. Na primeira secção tem-se a definição da equação fundamental, que é um ponto de partida para estudar-se o uso das contagens volumétricas de tráfego na estimativa de matrizes de origem - destino. A secção seguinte apresenta um resumo sobre a alocação de tráfego. Como o valor da proporção do número de viagens entre duas zonas que usam um determinado link ( $p_{ij}^k$ ) depende da alocação de tráfego, é necessário definir-se sempre qual o tipo de alocação que será usada. A independência e a inconsistência das contagens volumétricas é revista, pois este é um fator importante a ser considerado em modelos que usam as contagens volumétricas de tráfego na sua calibração. Na penúltima secção resume-se as características de modelos para estimar matrizes O-D que usam as contagens volumétricas. O modelo de Willumsen (1981a) é detalhado, pois este modelo é usado nos testes realizados para analisar a método proposto. Na última secção analisa-se dois métodos de alocação de contadores.

O capítulo III apresenta definições importantes da Teoria da Informação, pois esta é uma das ferramentas indispensáveis deste trabalho. O conceito de medida da informação como é introduzido por Shannon (1948), mostrou-se adequado para medir a quantidade de informação contida nas contagens volumétricas de um link da rede, por isto, ela foi usada para o estabelecimento de um referencial quantitativo, usado para indicar links com boa informação. Tem-se também a definição da entropia condicional, que é usada para estruturar a função objetivo dos novos modelos apresentados no capítulo seguinte.

O capítulo IV apresenta dois modelos para estimar uma matriz O-D de viagens. Estes são deduzidos, estruturados e calibrados pela autora, denotados neste trabalho por M2 e M3. Estes modelos são baseados na maximização da entropia

condicional . A função objetivo compatibiliza a utilização das informações contidas nas contagens volumétricas de tráfego, juntamente com as informações contidas nos dados de produção e atração de viagens. As estimativas produzidas pelo M2 são consistentes com os dados de produção e atração de viagens e as do M3 com as contagens volumétricas de tráfego.

O capítulo V apresenta os resultados dos testes usados para analisar o desempenho dos modelos deduzidos. Utiliza-se um exemplo simulado, pois a falta de dados reais disponíveis, impossibilitou a utilização de um exemplo real. As estimativas produzidas foram avaliadas através das estatísticas phi-normalizada e índice de dissimilaridade.

O capítulo VI apresenta o desenvolvimento do novo método de alocação de contadores de tráfego numa rede rodoviária. O método apresentado é heurístico e apresenta uma sistemática na sua estrutura, representada através de cinco etapas. Estas etapas são detalhadas e exemplificadas através de redes simuladas.

O capítulo VII apresenta os testes realizados para verificar a eficiência do método de alocação de contadores volumétricos de tráfego, proposto no capítulo VI. Estes testes foram realizados para cinco redes simuladas e envolveram os modelos M2 , M3 e o Modelo de Willumsen (1981). Além disso foram utilizadas seqüências de links definidas pelo novo método, seqüências definidas aleatoriamente e seqüências definidas pelo método de Willumsen. As avaliações de precisão das estimativas foram feitas através das estatísticas phi-normalizada e índice de dissimilaridade.

Finalmente o capítulo VIII sumariza as conclusões e contribuições deste trabalho, bem como apresenta sugestões de pesquisas futuras.

## CAPÍTULO II

### USO DE CONTAGENS VOLUMÉTRICAS DE TRÁFEGO NA ESTIMATIVA DE MATRIZES DE ORIGEM - DESTINO

As contagens volumétricas do tráfego cruzando um link de uma rede rodoviária podem ser obtidas com poucos recursos financeiros e humanos sem causar congestionamentos no trânsito.

Willumsen (1981b) afirma que o desenvolvimento de modelos para estimar uma matriz O-D de viagens, baseados em contagens de tráfego, é possível e atraente.

Identificam-se vários modelos para estimar matrizes de origem-destino que usam as contagens de tráfego. Geralmente esses modelos são usados para áreas onde a coleta de dados é difícil e de alto custo.

Neste capítulo serão discutidos alguns aspectos relativos a esses modelos.

#### 2.1 - Equação Fundamental.

Seja uma área de estudo dividida em  $N$  zonas, com seus respectivos centróides. A rede rodoviária está codificada com  $M$  nós e  $L$  links. Os pontos de contagens de tráfego estão localizados em  $L_c$  links ( $L_c \leq L$ ). Considera-se que as

viagens de uma matriz O-D,  $[T_{ij}]$ , usam os links da rede. Os fluxos observados são os resultados registrados nos contadores localizados nos  $L_c$  links, referentes a passagem dos veículos sobre os links.

Seja  $p_{ij}^k$  a proporção de viagens entre "i" e "j" que usam o link  $l_k$  ( $0 \leq p_{ij}^k \leq 1$ ). Quando  $p_{ij}^k = 0$ , tem-se que nenhuma viagem entre "i" e "j" passa pelo link  $l_k$ . Quando  $p_{ij}^k = 1$ , tem-se que todas as viagens entre "i" e "j" passam pelo link  $l_k$ . O valor da variável  $p_{ij}^k$  depende da rota escolhida pelo viajante.

A equação

$$Vl_k = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_{ij}^k T_{ij} \quad (2.1)$$

onde

$Vl_k$  = fluxo registrado no link contador  $l_k$  ;  
 $T_{ij}$  = número de viagens de origem "i" e destino "j" e  
 $p_{ij}^k$  = proporção de viagens entre "i" e "j" que usam o link  $l_k$ .

é chamada EQUAÇÃO FUNDAMENTAL na estimativa da matriz O-D.

Matematicamente a equação (2.1) representa um sistema de equações lineares, com  $L_c$  equações e  $N^2$  variáveis, quando  $k = 1, \dots, L_c$ .

Na prática  $N^2 > L_c$ , isto implica que o sistema poderá ter:

- (a) uma única solução;
- (b) infinitas soluções e
- (c) nenhuma solução.

O sistema pode ser representado matricialmente por

$$[V] = [P] [T], \quad (2.2)$$

onde  $[V]$  é a matriz dos termos independentes, isto é,

$$[V] = \begin{bmatrix} V1_1 \\ V1_2 \\ \vdots \\ V1_c \end{bmatrix}$$

$[P]$  é a matriz dos coeficientes, isto é,

$$[P] = \begin{bmatrix} p_{11}^1 & p_{12}^1 & \dots & p_{1N}^1 & p_{21}^1 & p_{22}^1 & \dots & \dots & \dots & p_{NN}^1 \\ p_{11}^2 & p_{12}^2 & \dots & p_{1N}^2 & p_{21}^2 & p_{22}^2 & \dots & \dots & \dots & p_{NN}^2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & & & \vdots \\ p_{11}^c & p_{12}^c & \dots & p_{1N}^c & p_{21}^c & p_{22}^c & \dots & \dots & \dots & p_{NN}^c \end{bmatrix}$$

e

$[T]$  é a matriz das incógnitas, isto é,

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{12} \\ \vdots \\ T_{1j} \\ \vdots \\ T_{NN} \end{bmatrix} .$$

Seja  $[P|V]$  a matriz ampliada, isto é,

$$[P|V] = \begin{bmatrix} p_{11}^1 & p_{12}^1 & \dots & p_{1N}^1 & p_{21}^1 & p_{22}^1 & \dots & \dots & \dots & p_{NN}^1 & V1_1 \\ p_{11}^2 & p_{12}^2 & \dots & p_{1N}^2 & p_{21}^2 & p_{22}^2 & \dots & \dots & \dots & p_{NN}^2 & V1_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & & & \vdots & \vdots \\ p_{11}^c & p_{12}^c & & p_{1N}^c & p_{21}^c & p_{22}^c & & & & p_{NN}^c & V1_c \end{bmatrix}$$



O sistema (2.2) admite solução se e somente se o posto da matriz ampliada  $[P|V]$  é igual ao posto da matriz dos coeficientes  $[P]$  (ver Boldrini et al., 1980).

Considerando

$$\text{posto } [P|V] = \text{posto } [P] = p,$$

pode-se ter as seguintes situações:

- (a)  $p = N^2$ , neste caso o sistema (2.2) tem solução única.
- (b)  $p < N^2$ , neste caso o sistema (2.2) admite infinitas soluções.

Na prática a hipótese (a) não é provável. No caso (b) pode-se escolher  $N^2 - p$  incógnitas, e as outras  $p$  incógnitas serão dadas em função destas. Assim o grau de liberdade do sistema é  $N^2 - p$ , e existirão infinitas matrizes  $[T]$ , que são soluções de (2.2).

Como dentro deste contexto a hipótese (a) não é provável, fica-se diante de um problema para ser resolvido - qual a matriz a ser escolhida?

Suposições sobre o comportamento do viajante podem levar a criação de regras que restringirão o número de variáveis independentes. Surgem assim vários métodos que se baseiam nesta suposição. Uma suposição "a priori", admitida em todos os métodos, é que  $T_{ij} = 0$  para todo  $i = j$ . Isto reduz o número de incógnitas de  $N^2$  para  $N^2 - N$ . Esta redução não é significativa para a resolução de (2.2) de maneira única.

## 2.2 - Alocação de Tráfego.

Como o valor da proporção  $p_{ij}^k$ , que aparece na equação

fundamental (2.1), depende da rota escolhida pelo viajante, torna-se importante, na determinação dos  $p_{1j}^k$ , o tipo de alocação usada.

Uma decisão fundamental ligada aos diversos tipos de alocação de tráfego é a identificação de um critério, usado por motoristas, na seleção de um caminho dentre os diversos caminhos disponíveis.

Wardrop (1952) sugeriu dois critérios. No primeiro critério, os motoristas tentam minimizar seus tempos de viagem individuais através de uma rede. No segundo critério os motoristas agem no sentido de minimizar o tempo total de viagem gasto por todos os motoristas da rede. Na prática sabe-se que os motoristas se comportam de acordo com algum critério intermediário, mas a maioria dos estudos em transporte urbano adotam o primeiro critério.

Uma ferramenta indispensável na alocação das viagens é encontrada na Teoria dos Grafos. Especificamente, dispõe-se de algoritmos para a construção de caminhos mínimos entre nós em uma rede (ver Christofides, 1975).

Os vários métodos de alocação são tradicionalmente classificados em dois grupos:

- alocação sem restrição de capacidade e
- alocação com restrição de capacidade.

Na alocação sem restrição de capacidade todas as viagens são alocadas às rotas de caminhos mínimos. Considera-se que o volume de tráfego não exerce influência sobre o desempenho do fluxo de tráfego, isto é, não altera os tempos de viagem. Um método muito usado de alocação sem restrição de capacidade é o método de alocação tudo ou nada.

Na alocação com restrição de capacidade considera-se que o número de viagens não pode ultrapassar a capacidade das

vias. Além disso, os tempos de viagem são alterados a medida em que os volumes de tráfego oscilam.

Robillard (1975) classifica os modelos de alocação em:

- proporcional e
- não proporcional.

Esta classificação é muito interessante dentro do contexto de estimativas de uma matriz de viagem O-D, usando contagens volumétricas.

Um modelo é dito proporcional quando satisfaz as seguintes condições:

(1) O fluxo total num link é igual a soma dos fluxos obtidos quando o método é aplicado para cada par O-D separadamente.

(2) Se a matriz O-D é multiplicada por um fator  $k$ , todos os fluxos alocados em cada link ficam multiplicados pelo dado fator  $k$ .

Um modelo que não satisfaz essas duas condições é dito não proporcional.

A alocação tudo ou nada e a alocação estocástica são proporcionais. Os métodos de alocação equilibrada não são proporcionais.

### 2.2.1 - Alocação tudo ou nada.

É o método de alocação de tráfego mais usado. É considerado o mais simples e o mais rápido (em tempo de CPU).

Neste modelo considera-se que os motoristas preferem fazer suas viagens pelas vias que oferecem menor resistência aos deslocamentos. A resistência aos deslocamentos ou

impedância de viagem pode ser medida em termos de tempo, distância, custo de viagem ou alguma combinação dessas variáveis.

O procedimento básico consiste em:

- (1) Descrição e codificação da rede em links e nós.
- (2) Determinação do caminho de tempo (ou custo) mínimo de cada zona em relação às outras zonas.
- (3) Alocação de tráfego pelos caminhos mínimos.

Existem vários programas computacionais para calcular os caminhos mínimos (ver Van Vliet, 1978).

As críticas existentes em relação a alocação tudo ou nada baseiam-se no fato que este método não considera a capacidade das vias, nem os acréscimos de tempo de viagem que ocorrerem devido ao aumento de volume de tráfego nas vias escolhidas. Além disso, as evidências mostram que este método não pode explorar as preferências pessoais na escolha de rota (ver Wright e Orrom, 1976 e Outram e Thompson, 1978).

Van Vliet (1976) sugere o uso de um parâmetro para representar o efeito da variação nas percepções dos motoristas. Este parâmetro é definido por uma relação que envolve o número observado de viagens entre cada par de zonas que usam uma parte  $r$  da via, o custo observado entre cada par de zonas que usam uma parte  $r$  da via e o custo mínimo entre cada par de zonas. Este parâmetro mede o grau de dispersão das rotas.

Na alocação tudo ou nada os valores das proporções de viagens com origem "i" e destino "j" que usam o link  $l_k$ , denotadas por  $p_{ij}^k$  ( $i, j = 1, \dots, N$  e  $k = 1, \dots, M$ ) são estimadas independentes da matriz  $[T_{ij}]$ . Tem-se:

$$p_{ij}^k = \begin{cases} 0, & \text{se } l_k \text{ não é usado na viagem de } i \text{ para } j \\ 1, & \text{se } l_k \text{ é usado.} \end{cases}$$

Este método de alocação foi escolhido, para ser usado neste trabalho, porque é considerado simples e operacional. Por outro lado, sendo um método proporcional, o tratamento dado aos fluxos dos links é matematicamente mais elementar, pois se a matriz O-D for multiplicada por um fator constante, todos os fluxos alocados em cada link ficam multiplicados pelo dado fator.

### 2.2.2 - Alocação estocástica.

Este tipo de alocação também é conhecido como uma alocação de tráfego em caminhos múltiplos.

Burrell (1968) propôs um método para geração de caminhos múltiplos através de uma rede de tráfego. Neste método admite-se que o motorista não conhece os tempos (ou custos) de viagens atuais, nas ligações, mas associa um suposto tempo de viagem a cada ligação, que é sorteada ao acaso a partir de uma distribuição de tempos. Admite-se que o motorista determina e usa uma rota que minimiza a soma dos supostos tempos de ligação.

Dial (1972) propõe um outro método. A cada caminho potencial entre um particular par origem-destino, é alocada uma probabilidade de uso, que permitirá estimar os fluxos.

Na alocação estocástica o cálculo dos  $p_{ij}^k$  apresenta algumas dificuldades (ver Willumsen, 1981a) mas podem ser calculados independentes da matriz  $[T_{ij}]$ . Essas proporções ( $p_{ij}^k$ ) dependem somente da rede e dos parâmetros do método de alocação escolhido.

### 2.2.3 - Alocação equilibrada.

Na alocação equilibrada os efeitos de congestionamento

são mais importantes que as diferentes percepções de custo. Este tipo de alocação é considerada realista. O equilíbrio é obtido quando o motorista não pode reduzir o seu custo (ou tempo) de viagem escolhendo outra rota.

Beckmann et al. (1956) mostraram que o problema da alocação de tráfego consistente com os princípios de Wardrop pode ser expresso em termos de programação matemática. Isto facilitou o desenvolvimento de vários algoritmos (ver por exemplo Van Vliet e Dow, 1979).

Neste caso, os valores dos  $p_{ij}^k$  dependem dos níveis de fluxos em cada link e não podem ser determinados independentemente do processo de estimativa da matriz O-D.

### 2.3 - Independência e Inconsistência das Contagens.

Existem dois problemas relativos às contagens volumétricas num link de uma rede, que devem ser considerados na resolução do sistema (2.2). Trata-se da independência e inconsistência das contagens.

#### 2.3.1 - Independência.

As evidências mostram que nem todo link adiciona necessariamente nova informação, isto é, muitos deles podem ser redundantes.

Na figura 2.1 representou-se, como exemplo, uma parte de uma rede com 3 links contadores.

$$\begin{aligned} \text{Seja: } V_{l_1} &= 65, \\ V_{l_2} &= 70 \text{ e} \\ V_{l_3} &= 135. \end{aligned}$$

Nesta situação a contagem  $Vl_3$  é redundante, pois, pela estrutura da rede sabe-se que  $Vl_3 = Vl_1 + Vl_2$ . Assim, a contagem  $Vl_3$  não adiciona informação e somente duas contagens são independentes.

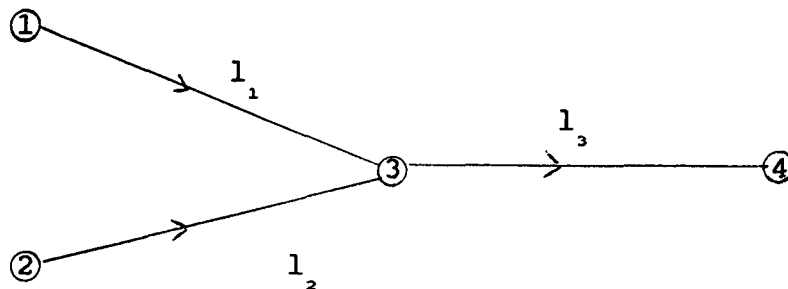


FIGURA 2.1 - Parte de uma rede viária.

### 2.3.2 - Erros e inconsistências.

Willumsen (1981a) salienta que os erros nas contagens volumétricas têm suas origens no decorrer do processamento de dados e no decorrer da expansão (mensal, semanal ou diária) do período de estudo.

Os erros nas contagens podem trazer inconsistências nos fluxos. Isto fará com que algumas equações do sistema (2.2) sejam incompatíveis e então não é possível encontrar solução para (2.2).

Na figura 2.1, se

$$\begin{aligned} Vl_1 &= 65 \\ Vl_2 &= 70 \\ Vl_3 &= 120, \end{aligned}$$

a equação correspondente a contagem  $Vl_3$ , isto é,

$$Vl_3 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_{ij}^3 T_{ij},$$

seria inconsistente. Portanto não seria possível achar uma solução para o sistema (2.2).

Willumsen (1981a) cita alguns trabalhos que apresentam estudos sobre os erros das contagens volumétricas de tráfego. Um percentual entre 3 e 10 % é apresentado. Para fazer as devidas correções, alguns fatores de correção têm sido estudados.

Alguns trabalhos apresentam maneiras convenientes para resolver o problema das inconsistências das contagens ( ver p.ex. Van Zuylen e Willumsen, 1980; Van Zuylen e Bronston, 1982; Bell, 1983; Cascetta e Nguyen, 1988; Yang e Sasaki, 1991; Yang et al., 1992 ).

Willumsen ( 1981 a ) apresenta inicialmente um procedimento para a identificação das condições de continuidade dos fluxos. Em seguida propõe um algoritmo cujo dado de entrada é um conjunto de contagens inconsistentes e cujo dado de saída é um correspondente conjunto de contagens consistentes.

#### **2.4 - A Utilização das Contagens Volumétricas no Processo de Modelagem.**

Na secção 1.5 citam-se vários modelos, encontrados na literatura, que usam as contagens volumétricas de tráfego na determinação de matrizes O-D.

As informações provenientes das contagens volumétricas de tráfego também são utilizadas na calibração dos parâmetros de modelos sintéticos de distribuição de viagens.

Willumsen (1981b) apresenta 3 grupos:



- modelos baseados no modelo gravitacional;
- modelos que utilizam alocação equilibrada e
- modelos baseados na maximização da entropia.

#### 2.4.1 - Modelos baseados no modelo gravitacional.

Os modelos desse grupo consideram que o comportamento do viajante pode ser explicado por três fatores:

- fatores de origem da viagem;
- fatores de destino da viagem e
- fatores do custo da viagem.

Identificam-se três subgrupos:

- modelo de Robillard;
- modelos gravitacionais convencionais e
- modelos de demanda estendidos.

**Modelo de Robillard** - Neste modelo as viagens são explicadas como num modelo do tipo gravitacional, mas não se conhece, "a priori", os dados sobre geração e atração de viagens de cada zona.

Matematicamente tem-se:

$$T_{ij} = R_i S_j f(c_{ij}) \quad (2.3)$$

onde  $f(c_{ij})$  é uma função do custo  $(c_{ij})$ , geralmente definida por  $f(c_{ij}) = c_{ij}^{-d}$ , sendo  $d$  um parâmetro a ser calibrado;  $R_i$  e  $S_j$  são os parâmetros de geração e atração de viagens respectivamente.

A equação fundamental fica :

$$Vl_k = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_{ij}^k R_i S_j f(c_{ij}) \quad (2.4)$$

O problema deste modelo está na calibração dos parâmetros  $R_i$ ,  $S_j$  e  $d$  (ver Robillard, 1975).

**Modelos gravitacionais convencionais** - Nestes modelos os dados de geração e atração de viagens são conhecidos.

Matematicamente tem-se:

$$T_{ij} = b_1 O_i D_j C_{ij}^{-d} \quad (2.5)$$

onde

$O_i$  = número de viagens originadas na zona "i";  
 $D_j$  = número de viagens destinadas na zona "j" e  
 $C_{ij}$  = custo de viagem entre "i" e "j".

Os parâmetros  $b_1$  e  $d$  são os parâmetros de calibração.

A equação fundamental é escrita como :

$$Vl_k = b_0 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N b_1 O_i D_j C_{ij}^{-d} p_{ij}^k \quad (2.6)$$

onde  $b_0$  é também um parâmetro para calibração. Este parâmetro foi introduzido para explicar o tráfego local, não explicado nos modelos gravitacionais.

A equação (2.6) pode ser reescrita como :

$$Vl_k = b_0 + b_1 G_k^d \quad (2.7)$$

onde

$$G_k^d = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N O_i D_j C_{ij}^{-d} p_{ij}^k \quad (2.8)$$

Neste caso os parâmetros de calibração são  $b_0$ ,  $b_1$  e  $d$ .

Pequenas variações na equação (2.7) produzem outros modelos (ver Low, 1972; Hogberg, 1976 e Holm et al., 1976).

**Modelos de demanda estendidos** - Neste grupo estão incluídos os modelos que utilizam alocação proporcional. Nestes modelos inclui-se outros fatores associados com outras etapas do processo de planejamento de transporte, por exemplo, um relacionamento entre geração de tráfego e hierarquia urbana.

Matematicamente tem-se :

$$T_{ij} = \sum_r b_r O_i^r D_j^r C_{ij}^{-d_r} \quad (2.9)$$

onde  $r$  é um propósito de viagem.

A equação fundamental

$$Vl_k = b_0 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N T_{ij} p_{ij}^k \quad (2.10)$$

é usada para calibrar os parâmetros  $b_r$  e  $d_r$  (ver Symons et al., 1976).

#### 2.4.2 - Modelos que utilizam alocação equilibrada.

Esses modelos foram desenvolvidos na década de 70. Os modelos que utilizam as condições de alocação equilibrada requerem o conhecimento de curvas custo-fluxo para cada link.

Nguyen (1977) sugeriu um método que foi modificado por Turnkist e Gur (1979).

Nguyen (1977) desenvolveu duas programações matemáticas para a estimativa da matriz O-D, que satisfazem as condições da alocação equilibrada e que são consistentes

com os fluxos observados.

O primeiro programa foi considerado de custo muito alto devido aos dados requeridos (contagens de todos os links da rede) para o processamento.

O segundo programa exige o conhecimento dos custos de viagens entre cada par O-D.

Matematicamente tem-se :

$$\min F(Vl_k, T_{ij}) = \sum_k \int_0^{Vl_k} C_k(x) dx - \sum_{ij} C_{ij} T_{ij} \quad (2.11)$$

$$T_{ij} - \sum_r T_{ij}^r = 0, \quad \forall i, j \quad (2.12)$$

$$T_{ij}^r \geq 0, \quad \forall i, j, r \quad (2.13)$$

$$T_{ij} \geq 0, \quad \forall i, j \quad (2.14)$$

$$Vl_k = \sum_{ij} T_{ij}^r \delta_{ij}^k \quad \forall k \quad (2.15)$$

onde

$C_k(x)$  = relação entre fluxo e custo para cada link.

$C_{ij}^k$  = custo observado do viajante entre "i" e "j".

$T_{ij}^r$  = número de viagens entre "i" e "j" usando a rota r.

$\delta_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{se a rota r entre "i" e "j" usa o link } l_k. \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$

Turnkist e Gur (1979) desenvolveram modificações no método de Nguyen. O método modificado foi aplicado em áreas urbanas e sua aplicação requer o conhecimento dos fluxos de todos os links e o total de viagens finais em cada zona.

#### 2.4.3 - Modelos baseados na maximização da entropia.

A entropia de Shannon (1948), estudada dentro do contexto da Teoria da Informação, tem sido usada como uma

importante ferramenta no planejamento urbano e regional.

Pode-se considerar que o trabalho do Wilson (1970) marcou o início da utilização da maximização da entropia em modelos de planejamento de transporte.

Em Kapur (1989) encontram-se vários modelos de planejamento urbano e regional.

Encontram-se na literatura utilizada neste trabalho, dois modelos que são baseados na maximização da entropia e que usam as contagens volumétricas de tráfego na sua calibração. Tem-se:

- modelo de Willumsen e
- modelo de Van Zuylen.

O modelo de Willumsen usa a maximização da entropia e o modelo de Van Zuylen usa a minimização da informação. Esses dois modelos chegam a resultados semelhantes, conforme a análise dos próprios autores (ver Van Zuylen e Willumsen, 1980). Ambos tem propriedades similares e usam o mesmo algoritmo na solução.

**Modelo de Willumsen** - Este modelo utiliza a alocação proporcional. A sua derivação segue um paralelo dos modelos gravitacionais, mas troca a restrição de custo por uma restrição associada às contagens volumétricas (ver por ex. Willumsen, 1981a). As contagens volumétricas de tráfego usadas devem ser consistentes, mas não necessariamente independentes. A matriz O-D de viagens gerada é consistente com as informações contidas nas contagens utilizadas.

Matematicamente tem-se :

$$\max S(T_{ij}) = - \sum_{ij} (T_{ij} \ln T_{ij} - T_{ij}) \quad (2.16)$$

s.a.

$$Vl_k - \sum_{ij} T_{ij} p_{ij}^k = 0 \quad (2.17)$$

$$T_{ij} \geq 0 \quad (2.18)$$

Usando o método Lagrangeano obtém-se :

$$T_{ij} = \prod_k X_k^{p_{ij}^k} \quad (2.19)$$

onde

$$X_k = e_k^{-\lambda_k} \quad (2.20)$$

e  $\lambda_k$  é o multiplicador lagrangeano associado com a contagem no link  $l_k$ .

A introdução de uma informação "a priori" é prevista. Esta informação pode ser obtida de uma matriz mais antiga, denotada por  $[t_{ij}]$ . Quando não se tem uma matriz antiga, pode-se usar uma matriz com valores unitários.

Matematicamente o modelo fica escrito como :

$$\max S(T_{ij}) = - \sum_{ij} T_{ij} \left( \ln \frac{T_{ij}}{t_{ij}} - 1 \right) \quad (2.21)$$

$$\text{s.a.} \quad Vl_k - \sum_{ij} T_{ij} p_{ij}^k = 0 \quad (2.22)$$

$$T_{ij} \geq 0 \quad (2.23)$$

Usando o método de Lagrange obtém-se :

$$T_{ij} = t_{ij} \prod_k X_k^{p_{ij}^k} \quad (2.24)$$

A equação (2.24) reduz-se à equação (2.19) quando os valores dos  $t_{ij}$ ,  $i, j = 1, \dots, N$ ,  $i \neq j$  são unitários. Assim quando não se dispõe de uma matriz mais antiga, utiliza-se uma matriz com valores unitários.

É possível estender esse modelo para utilizar as condições da alocação equilibrada.

Matematicamente tem-se :

$$T_{ij}^r = \sum_{ij} t_{ij}^r \sum_k X_k^{\delta_{ij}^k} \quad (2.25)$$

onde

$T_{ij}^r$  = o número de viagens entre "i" e "j" que usam a rota r.

$$\delta_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{se a parte r entre "i" e "j" usa link } l_k \\ 0, & \text{se a parte r entre "i" e "j" não usa o link } l_k. \end{cases}$$

$t_{ij}^r$  = número de viagens "a priori" entre "i" e "j" que usam a parte r da rede.

Na prática a aplicação do modelo (2.25) apresenta dificuldades, pois os erros das contagens e dos relacionamentos custos-fluxos atrapalham a definição do conjunto de custos mínimos das partes de cada par O-D.

**Modelo de Van Zuylen** - Neste modelo Van Zuylen (1978) utiliza uma informação adicional às contagens de tráfego, colhida de uma matriz de viagem O-D antiga ( $[t_{ij}]$ ).

Usando a informação de Brillouin (1956), Van Zuylen chega na expressão:

$$I = \sum_k \sum_{ij} T_{ij} p_{ij}^k \ln \frac{T_{ij} S^k}{V l_k t_{ij}} \quad (2.26)$$

onde

$I$  = total de informação contida nos fluxos observados.

$$S^k = \sum_{ij} t_{ij} p_{ij}^k .$$

Matematicamente o problema fica:

$$\min I \quad (2.27)$$

$$\text{s.a.} \quad vl_k = \sum_{ij} p_{ij}^k T_{ij} . \quad (2.28)$$

Usando o método de Lagrange obtém-se :

$$T_{ij} = t_{ij} \prod_k \frac{p_{ij}^k}{y_k^{g_{ij}}} \quad (2.29)$$

onde

$$y_k = \frac{vl_k}{S^k} e^{-(1+\lambda_k)} \quad (2.30)$$

$$g_{ij} = \sum_k p_{ij}^k \quad (2.31)$$

e  $\lambda_k$  é o multiplicador de Lagrange correspondente a contagem volumétrica do link  $l_k$ .

O modelo de Willumsen e o modelo de Van Zuylen resultam em um problema multi-proporcional (ver Murchland, 1977 e 1978).

Van Zuylen e Willumsen (1980) apresentam um algoritmo para a calibração deste modelo, baseado nos estudos de Murchland (1977). Murchland identifica a equivalência entre a programação convexa e o problema multi-proporcional e prova a unicidade da solução.

#### 2.4.4 - Análise dos modelos citados.

Todos os modelos citados nesta secção apresentaram uma característica em comum, que é a utilização das contagens volumétricas de tráfego nas suas respectivas calibrações.



Como esses dados são obtidos com poucos recursos financeiros e humanos, pode-se afirmar que essa característica citada é uma vantagem desses modelos.

Com relação aos modelos dos dois primeiros grupos (modelos baseados no modelo gravitacional e modelos que utilizam alocação equilibrada), pode-se salientar algumas dificuldades tais como:

- problemas na calibração de alguns parâmetros ;
- custos altos para a implementação, devido ao fato de requererem contagens volumétricas de todos os links da rede e
- exigência do conhecimento dos custos de viagens entre cada par origem-destino.

Portanto, destacam-se os modelos baseados na maximização da entropia, pois estes não apresentam os problemas acima.

Por outro lado, os modelos baseados na maximização da entropia, aqui citados, conservam o mesmo problema do modelo de Wilson (1970), que considera todos os micro-estados com a mesma probabilidade de ocorrência. Sabe-se ainda que as estimativas apresentadas por esses modelos são mais precisas quando utiliza-se como matriz "a priori", uma matriz antiga.

Os novos modelos apresentados no capítulo IV, incorporam a característica comum a todos os modelos citados nesta seção e introduzem a utilização da entropia condicional para resolver o problema da equiprobabilidade dos micro-estados. Utilizam uma matriz de valores máximos, definida a partir de dados disponíveis ( contagens volumétricas de tráfego e/ou dados de produção e atração de viagens), dispensando portanto a matriz mais antiga.

## 2.5 - Alocação de Contadores.

Encontram-se na literatura vários modelos para estimar matrizes O-D de viagens que usam as contagens volumétricas de tráfego (ver p. ex. os artigos citados em 1.5). Entretanto, somente dois métodos para definir a alocação dos contadores nos links da rede viária foram encontrados. Tem-se:

- método proposto por Willumsen (1981 a) e
- método representativo (ver Schaechterle et al, 1973).

Esses métodos não apresentam uma sistemática que atendam os diversos modelos. Por isto utilizam-se as contagens volumétricas existentes. Quando é necessário definir-se novos postos de coleta dos fluxos, faz-se uma escolha aleatória ou uma escolha baseada na experiência do planejador e/ou pesquisador.

### 2.5.1 - Método proposto por Willumsen.

O método proposto por Willumsen (1981a), foi o único, encontrado pela autora, que tem a finalidade de localizar os links cujos fluxos tenham uma boa informação para estimativa de matrizes O-D de viagens. Este método surgiu após a dedução e derivação do modelo citado na secção 2.4.3. Considerando uma limitação nos orçamentos para a coleta de dados extras (isto é novas contagens volumétricas para melhorar as estimativas), é inevitável procurar definir qual a melhor localização dos contadores.

Este método pode ser resumido nas seguintes etapas:

- (1) Usar todas as informações encontradas (p.ex. matriz O-D mais antiga ou contagens volumétricas já

existentes) para obter uma primeira estimativa de fluxos, denotada por  $Vl_k$ , para todos os links que não têm contadores alocados.

(2) Produzir uma segunda estimativa grosseira, denotada por  $Vl_k^*$ , (p.ex. contagens manuais rápidas de 6 min) dos volumes esperados em cada link.

(3) Calcular

$$I_{l_k} = 0,5 \frac{(Vl_k - Vl_k^*)^2}{Vl_k^*} \quad (2.32)$$

para cada link, onde  $I_{l_k}$  é a quantidade de informação contida nas contagens volumétricas do link  $l_k$ .

(4) Os links são classificados de acordo com a medida definida em (2.32), excluindo-se os links que não apresentam contagens independentes. Portanto o link a ser escolhido é aquele que corresponde ao maior valor de  $I_{l_k}$ .

Este método requer uma estimativa grosseira de volumes de tráfego em todos os links da rede. Geralmente é necessário fazer-se contagens rápidas manuais de todos os links da rede viária em estudo. Isto evidentemente requer mais recursos humanos e financeiros.

No capítulo VII, este método será usado para testes comparativos com o novo método proposto, e será denotado por MET1.

### 2.5.2 - Método representativo.

O método representativo encontra-se detalhado em Schaechterle et al. (1973), e está sendo utilizado em Santa Catarina, na implementação do Sistema Integrado de Postos de Contagem (ver D.E.R., 1987). Este método, a rigor, não contempla o uso das contagens volumétricas para estimar

matrizes O-D de viagens.

Neste método os postos de contagens são classificados em:

- postos permanentes (com aparelhos mecanizados) e
- postos temporários (com aparelhos mecanizados ou manuais).

Os postos temporários são subordinados aos postos permanentes , portanto, ambos complementam-se mutuamente.

Os dados coletados nos postos permanentes fornecem informações sobre o comportamento do fluxo do link no qual está instalado e também de vários outros links da rede considerados subordinados a ele. A cada posto permanente associa-se uma função representativa de postos subordinados. A relação básica é

$$Vl_r = k \cdot Vl_s \quad (2.33)$$

onde

$k$  = constante de proporcionalidade.

$Vl_r$  = contagens volumétricas do posto permanente  $r$ .

$Vl_s$  = contagens volumétricas do posto subordinado  $s$ .

Usando a Estatística como ferramenta, obtém-se as fórmulas que auxiliam a definição da localização dos contadores nos postos permanentes.

Este método não analisa a informação contida nas contagens para efeitos de estimativa de matrizes O-D de viagens. Inicialmente pensou-se em usar este método para fazer comparações com o novo método (ver Flemming, 1992). Posteriormente verificou-se a inadequação da escolha tendo em vista que os objetivos finais são diferentes.

## 2.6 - Algumas Considerações.

Este capítulo foi dedicado a tópicos relativos às contagens volumétricas numa rede viária. Na secção 2.1 definiu-se a equação fundamental e o sistema de equações cuja solução é uma matriz O-D de viagens. Aspectos referentes a existência e unicidade de solução desse sistema são analisados.

A secção 2.2 apresenta os tipos de alocação de tráfego mais usados. Verificou-se que os valores das proporções de viagens entre a zona "i" e a zona "j" que usam o link  $l_k$  dependem do tipo de alocação de tráfego escolhido.

Os novos modelos (M2 e M3), apresentados no capítulo IV utilizam a alocação tudo ou nada, pois conforme análise feita na secção 2.2.1, este método tem a simplicidade e a operacionalidade requeridas neste trabalho.

Os erros nas contagens, causadores das inconsistências, são analisados na secção 2.3. Nesta secção analisa-se também o problema da independência das contagens volumétricas.

A secção 2.4 apresenta as características básicas de alguns modelos que utilizam as contagens volumétricas. Alguns modelos baseados no modelo gravitacional, modelos que utilizam alocação equilibrada e modelos baseados na maximização da entropia são apresentados.

Da análise desses modelos extraiu-se as premissas básicas dos modelos M2 e M3. Essas premissas absorvem a característica comum dos modelos apresentados e introduzem as novas idéias citadas na secção 2.4.4 e desenvolvidas no capítulo IV.

Os métodos de alocação de contadores volumétricos de tráfego nos links de uma rede viária são apresentados na secção 2.5. Suas características são avaliadas. A partir dessa avaliação estabeleceu-se uma importante característica do novo método (apresentada e discutida nos capítulos VI e VII), que é a flexibilidade. A flexibilidade é exigida, para que possa atender com eficiência os diversos modelos para estimar matrizes origem-destino que usam as contagens volumétricas de tráfego nas suas respectivas calibrações. As contagens volumétricas obtidas nos links de um conjunto de links definido pelo método devem, portanto, conter uma maior quantidade de informação para estimar uma matriz O-D de viagens. Para medir essa quantidade de informação, utilizou-se a informação seletiva, oriunda da Teoria da Informação.

Um maior detalhamento das medidas da Teoria da Informação, usadas neste trabalho, será feito no capítulo III. Essas medidas são importantes na derivação dos modelos M2 e M3 (apresentados e exemplificados nos capítulos IV e V), e na concepção do método proposto no capítulo VI.

## CAPÍTULO III

### O USO DA TEORIA DA INFORMAÇÃO NO PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES

#### 3.1 - Introdução.

Em 1948, Shannon introduziu um modelo para sistemas de comunicação. A partir daí, várias medidas da quantidade da informação têm sido definidas e estudadas (ver p.ex. Ash, 1965; Taneja, 1992), estruturando a Teoria da Informação.

O modelo apresentado por Shannon é caracterizado por diversos componentes básicos: fonte, codificador, canal, decodificador e receptor. A fonte de mensagens é a componente do sistema capaz de produzir mensagens. A mudança da forma de linguagem é realizada pelo codificador. Portanto o codificador transforma a linguagem da fonte para a linguagem do canal. O canal é o meio através do qual a mensagem é propagada. Geralmente está sujeito a vários tipos de perturbações que são chamadas de ruído. A capacidade de um canal sem ruído pode ser medida (ver p.ex. Flemming, 1984). A finalidade do decodificador é decifrar a mensagem transmitida pelo canal de modo a torná-la inteligível ao receptor. O receptor é o ponto de destino da mensagem.

A Teoria da Informação, atualmente, é aplicada em várias áreas (ver p.ex. Theil, 1972; Jumarie, 1986; Kapur, 1989 e Flemming, 1990).

Este capítulo apresenta um resumo dos conceitos da

Teoria da Informação que são ferramentas básicas deste trabalho.

### 3.2 - Definições Iniciais.

O comportamento dos sistemas de comunicação são de natureza estatística, daí a necessidade de definir-se inicialmente o conceito de variável aleatória com sua respectiva distribuição de probabilidades.

#### 3.2.1 - Variável aleatória.

Suponha que para cada resultado experimental ou ponto amostral "s", seja aplicada uma regra de medida (ou contagem) que implique em um número. Por exemplo, seja o espaço amostral, o conjunto de links de uma rede viária. Aplica-se a regra :

"a cada link  $l_k$  corresponde o número de pares O-D associados a ele ( o par  $(i,j)$  está associado ao link  $l_k$  quando  $p_{ij}^k \neq 0$ )".

Uma regra como essa que associa pontos amostrais a números é denominada variável aleatória. Portanto, uma variável aleatória X é uma função que associa a cada ponto amostral "s" um número "x".

O domínio dessa função é o espaço amostral e o conjunto imagem é um conjunto de números.

Formalizando o exemplo citado acima tem-se, na figura 3.1 uma rede viária simulada. As equações fundamentais são:



$$\begin{aligned}
 V_1 &= T_{12} + T_{13} + T_{14} + T_{32} \\
 V_2 &= T_{21} + T_{41} \\
 V_3 &= T_{31} + T_{32} \\
 V_4 &= T_{13} + T_{14} + T_{23} + T_{24} + T_{43} \\
 V_5 &= T_{41} + T_{42} + T_{43} \\
 V_6 &= T_{14} + T_{24} + T_{34}
 \end{aligned}$$

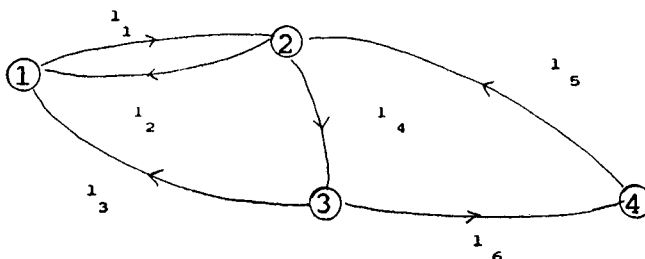


FIGURA 3.1 - Rede viária simulada

A variável aleatória  $X$  pode ser representada graficamente (ver figura 3.2) e através do seu conjunto imagem :

$$X = \{ 2, 3, 4, 5 \}$$

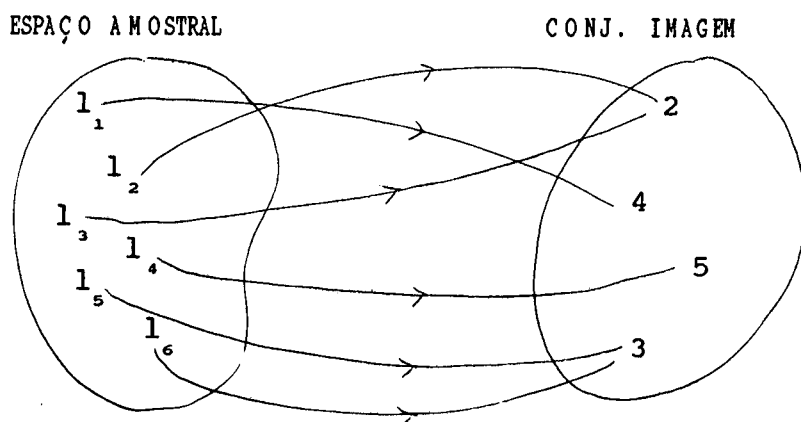


FIGURA 3.2 - Variável aleatória  $X$

### 3.2.2 - Distribuição de probabilidades de uma variável aleatória.

Para mostrar a proporção das vezes em que a variável tende a assumir cada um dos diversos valores, define-se:

$$p(x) = P_x [ X = x ]$$

denominada função de densidade de probabilidade, onde  $P_x [ X = x ]$  é a probabilidade de escolhido um elemento do espaço amostral, este ter como imagem o número "x".

O conjunto

$$P = \{ p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_n) \}$$

é dito uma distribuição de probabilidades da variável aleatória X. É claro que :

- a)  $0 \leq p(x_i) \leq 1$  , para todo  $x_i$  do domínio
- b)  $\sum_i p(x_i) = 1$  .

No exemplo da figura 3.1 tem-se:

$$P = \{ 1/3, 1/3, 1/6, 1/6 \}$$

pois

$$p(2) = P_x [ X = 2 ] = 2/6$$

$$p(3) = P_x [ X = 3 ] = 2/6$$

$$p(4) = P_x [ X = 4 ] = 1/6$$

$$p(5) = P_x [ X = 5 ] = 1/6$$

### 3.3 - Medidas da Informação.

Todo indivíduo, no seu dia a dia, observa o transporte de alguma informação. A informação da ocorrência de um evento é recebida quando existe INCERTEZA antes da sua

ocorrência.

Shannon (1948) quantificou a informação transportada usando inicialmente um raciocínio indutivo, resumido a seguir.

Seja E um evento com probabilidade de ocorrência p. Supondo que alguém confiável vem e emite a mensagem de que "E ocorreu", pergunta-se:

"Qual a quantidade de informação transportada por esta mensagem?"

A resposta intuitiva é:

- "pouca informação", se p é próximo de 1 e
- "muita informação", se p é próximo de zero.

Estas idéias intuitivas sugerem escolher uma função decrescente de p , para medir a quantidade de informação.

Este foi, em linhas gerais, o raciocínio indutivo usado por Shannon quando definiu a função

$$h(p) = - \log_2 p , p \in (0,1] \quad (3.1)$$

para medir a quantidade de informação transportada pela mensagem "E ocorreu".

Pode-se definir:

- (i) A informação contida na mensagem "E não ocorreu":

$$h(1-p) = - \log_2 (1-p), p \in [0,1) \quad (3.2)$$

- (ii) A informação esperada:

$$\begin{aligned} H(p,1-p) &= p h(p) + (1-p) h(1-p) \\ &= -p \log_2 p - (1-p) \log_2 (1-p), p \in [0,1], \\ &\text{com a convenção } 0 \cdot \log_2 0 = 0. \end{aligned}$$

(iii) A informação esperada ou incerteza média associada aos eventos de uma variável aleatória discreta  $\{ X = x_j, j = 1, \dots, n \}$  com distribuição de probabilidade  $P = \{ p(x_1), \dots, p(x_n) \}$ :

$$H(X) = \frac{p_1 h(p_1) + \dots + p_n h(p_n)}{p_1 + \dots + p_n} = - \sum_{j=1}^n p_j \log_2 p_j \quad (3.3)$$

Pode-se também denominar  $h(p)$ , definida em (3.1), por informação seletiva ou individual e  $H(X)$ , definida em (3.3), por Entropia de Shannon.

A Entropia de Shannon pode ser reescrita como:

$$H(X) = - c \sum_{j=1}^n p_j \log p_j, \quad p_j \in [0,1] \text{ e } 0 \cdot \log 0 = 0 \quad (3.4)$$

onde  $c \in \mathbb{R}$  e  $\log = \log_b$ ,  $b > 1$ .

Por convenção, neste texto, o logaritmo em qualquer base  $b > 1$ , será denotado por "log".

### 3.4 - Entropia Conjunta e Entropia Condicional.

Sejam  $X$  e  $Y$  duas variáveis aleatórias discretas com distribuição de probabilidades conjunta  $P = \{ p(i,j), i=1, \dots, m \text{ e } j=1, \dots, n \}$ .

A entropia conjunta é definida por

$$H(X,Y) = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p(i,j) \log p(i,j). \quad (3.5)$$

A entropia condicional de Y dado  $X = x_j$ ,  $j = 1, \dots, n$  é definida como

$$H(Y / X = x_j) = - \sum_{i=1}^m p(i/j) \log p(i/j) \quad (3.6)$$

onde  $p(i/j)$  é a probabilidade condicional definida por

$$p(i/j) = \frac{p(i,j)}{p(j)} \quad (3.7)$$

Observa-se que por simplificação usa-se as notações :

$$\begin{aligned} p(x_i, y_j) &= p(i, j); \\ p(x_i) &= p_i \quad \text{e} \\ p(y_j) &= p_j. \end{aligned}$$

A entropia condicional de Y dado X, denotada por  $H(Y/X)$ , é definida como média das entropias condicionais  $H(Y / X = x_j)$  com pesos  $p_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ , isto é,

$$H(Y / X) = \sum_{j=1}^n p_j H(Y / X = x_j) \quad (3.8)$$

ou

$$H(Y / X) = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p(i,j) \log p(i,j) \quad (3.9)$$

Valem as propriedades:

$$H(X, Y) = H(X) + H(Y/X) \quad (3.10)$$

$$H(X, Y) \leq H(X) + H(Y) \quad (3.11)$$

$$H(Y/X) \leq H(Y). \quad (3.12)$$

### 3.5 - Estado de um Sistema.

Um evento representa um estado de um sistema.

Portanto a informação sobre um determinado estado de um sistema é dada usando-se a fórmula (3.1). A informação média ou entropia dos elementos de um sistema é calculada usando-se (3.4). Quando alguma informação "a priori" sobre os elementos do sistema é conhecida pode-se usar (3.9) para calcular a entropia dos elementos do sistema.

Salienta-se algumas propriedades das medidas definidas, que são importantes nas aplicações da área transportes:

a) A medida que a entropia cresce a informação seletiva decresce.

b) A entropia é máxima quando a distribuição de probabilidades é equiprovável ( $p_1 = p_2 = \dots = p_n$ ).

c) Sistemas mais aleatórios, isto é, sistemas mais ricos em número de estados, apresentam entropia mais elevada.

Essas propriedades são discutidas no decorrer das secções seguintes, quando as medidas da Teoria da Informação são adequadas para situações específicas (por exemplo classificação de links de uma rede viária e estruturação de modelos para estimar matrizes O-D de viagens).

### **3.6 - Utilização da Entropia em Modelos do Planejamento de Transportes.**

O método de maximização da entropia foi apresentado pela primeira vez por Shannon em 1948. Jaynes (1957) estudou-o extensivamente e introduziu o procedimento de otimização usando o método de Lagrange. Em 1970, Wilson adaptou esta técnica para a distribuição de viagens.

Wilson (1970) considerou que num sistema de transporte pode-se identificar 3 níveis: micro, meso e macro-nível.

**Micro - nível:** Neste nível tem-se uma descrição de detalhes para cada "indivíduo", isto é, sua origem "i", seu destino "j", tempo de sua viagem, etc.. Portanto neste nível tem-se informações sobre cada micro-estado do sistema (ou evento elementar).

**Meso - nível:** Este é um nível intermediário. Alguns micro-estados são agregados em convenientes níveis de agregação, e passa-se a analisar apenas informações sobre o conjunto. Portanto um meso-estado é caracterizado pelo número de indivíduos que se deslocam entre cada par de origem-destino.

**Macro - nível:** Este é considerado o nível inferior de descrição. As informações sobre o macro-estado do sistema são obtidas exogenamente. Neste contexto as informações são caracterizadas pelo número total de viagens geradas ( $O_1$ ) e atraídas ( $D_1$ ) em cada zona, custo total de transporte, etc..

Diante dessa identificação do sistema, a técnica adaptada por Wilson consiste em identificar:

(a) as probabilidades "a priori" dos micro-estados. Se nada é conhecido sobre eles, supõe-se que todos os micro-estados são equiprováveis;

(b) uma medida entrópica em termos dos meso-estados;

(c) os macro-estados, isto é, as restrições e

(d) uma técnica para otimizar a medida entrópica sujeita as restrições definidas em (c).

No capítulo seguinte faz-se uma adaptação dessa técnica para estruturar os modelos M2 e M3.

### 3.7 - Estabelecimento de um Referencial para Medir a Informação Contida nas Contagens Volumétricas.

Nos capítulos anteriores salientou-se que vários modelos utilizam as contagens volumétricas para a calibração e estimativa de matrizes O-D de viagens. Constatou-se a necessidade de um novo método para alocar postos de contagens, para coletar dados (contagens volumétricas de tráfego) que tenham a maior informação possível, para estimar matrizes O-D de viagens. A escolha de um referencial para medir a informação embutida nesses dados tornou-se um ponto fundamental.

Da análise dos vários modelos para estimar matrizes O-D de viagens verificou-se a existência de links com um particular tipo de informação. Trata-se dos links que tem somente um par O-D associado a ele. As seguintes definições foram então estabelecidas:

**Informação do tipo 1** - A contagem volumétrica de tráfego de um link  $l_k$  tem informação do tipo 1 se existe somente um par O-D associado a ele, isto é, a equação fundamental do link  $l_k$  tem somente um par  $(i,j)$  tal que  $p_{ij}^k = 1$ , quando a alocação tudo ou nada está sendo usada.

Para exemplificar esta definição considere-se uma rede simulada, representada na figura 3.3.

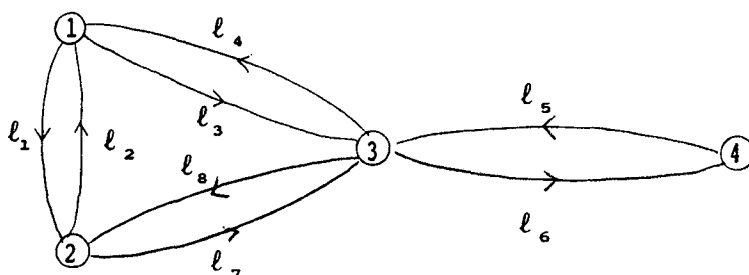


FIGURA 3.3 - Rede de um exemplo simulado.



As equações fundamentais são:

$$\begin{aligned}
 Vl_1 &= T_{12} \\
 Vl_2 &= T_{21} \\
 Vl_3 &= T_{13} + T_{14} \\
 Vl_4 &= T_{31} + T_{41} \\
 Vl_5 &= T_{14} + T_{24} + T_{34} \\
 Vl_6 &= T_{41} + T_{42} + T_{43} \\
 Vl_7 &= T_{23} + T_{24} \\
 Vl_8 &= T_{32} + T_{42}
 \end{aligned}$$

Observando essas equações fundamentais conclui-se que as contagens volumétricas dos links  $l_1$  e  $l_2$  tem informação do tipo 1.

Analisando isoladamente cada link, através de sua equação fundamental, pode-se dizer que o link cujas contagens volumétricas têm informação do tipo 1 são links que têm uma "boa" quantidade de informação, pois pode-se definir uma célula da matriz  $[T_{ij}]$ . Esses links são facilmente detectados, conhecendo-se as equações fundamentais.

**Informação do tipo 2** - Diz-se que as contagens volumétricas de um link  $l_k$  têm informação do tipo 2 se existem dois ou mais pares associados a ele e a sua equação fundamental pode ser reescrita como

$$Vl_k = Vl_{k1} + \dots + Vl_{kn} + T_{ij}$$

onde  $l_{k1}, \dots, l_{kn}$  são links cujas contagens tem informação do tipo 1.

Por exemplo seja a rede da figura 3.4 de um exemplo simulado.

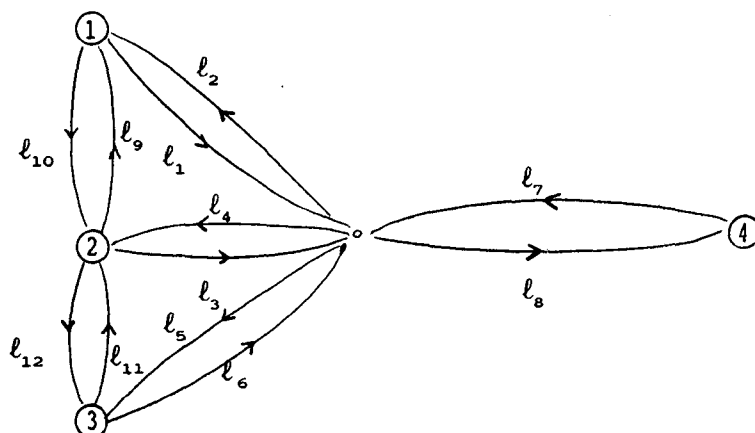


FIGURA 3.4 - Rede Simulada.

As equações fundamentais dos links são:

$$\begin{aligned} Vl_1 &= T_{14} \\ Vl_2 &= T_{41} \\ Vl_3 &= T_{24} \\ Vl_4 &= T_{42} \\ Vl_5 &= T_{43} \\ Vl_6 &= T_{34} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Vl_7 &= T_{41} + T_{42} + T_{43} \\ Vl_8 &= T_{14} + T_{24} + T_{34} \\ Vl_9 &= T_{21} + T_{31} \\ Vl_{10} &= T_{12} + T_{13} \\ Vl_{11} &= T_{31} + T_{32} \\ Vl_{12} &= T_{13} + T_{23} \end{aligned}$$

Portanto as contagens dos links  $l_1$  ao  $l_6$  contém informação do tipo 1 e as contagens dos links  $l_7$  e  $l_8$  têm informação do tipo 2, pois

$$\begin{aligned} Vl_7 &= Vl_2 + Vl_4 + T_{43} \\ Vl_8 &= Vl_1 + Vl_6 + T_{24} \end{aligned}$$

Observa-se que existe outras maneiras de reescrever os links  $l_7$  e  $l_8$ , para verificar que as contagens têm informação do tipo 2. Neste exemplo, em particular, verifica-se que os links  $l_7$  e  $l_8$  são dependentes (ver secção 2.3.1). Observa-se também que esses links podem não ser facilmente detectados em redes mais complexas.

Pode-se de maneira análoga às anteriores, definir uma informação do tipo 3 ou mais, no entanto, isto não iria mais destacar links com um particular tipo de informação.

Além das observações que determinaram as definições exemplificadas nesta secção, outras observações, mais gerais, foram feitas. Tem-se que:

- O uso da maximização da entropia para estimar uma matriz O-D, usando as contagens volumétricas, requer mais ou menos dados, conforme o modelo.

- Na prática, nunca se tem um conjunto completo de contagens volumétricas, assim pode-se usar técnicas existentes para converter contagens de um link para outro (ver Schaechterle, 1973).

- Nos modelos do tipo gravitacional observa-se que a preferência de uma contagem  $Vl_k$  sobre outra  $Vl_s$  fica definida pela análise dos pares O-D da equação fundamental. Por exemplo, conhece-se

$$Vl_1 = T_{12} + T_{21} + T_{13} + T_{31}.$$

Uma outra contagem deve ser obtida, podendo ser escolhido o link  $l_2$  ou  $l_3$ . Sabendo-se que

$$Vl_2 = T_{13} + T_{31}$$

$$Vl_3 = T_{34} + T_{43},$$

escolhe-se  $Vl_3$ , pois os pares (3,4) e (4,3) ainda não foram considerados na contagem  $Vl_1$ .

- Uma vez calibrado um modelo do tipo gravitacional, com uma determinada quantidade de links contadores, a inclusão de outros links garante ganhos cada vez menores à medida em que se adiciona um novo link (ver p. ex. Hogberg, 1975).

Observa-se, portanto, que a quantidade de informação contida nas contagens volumétricas de um link da rede não pode ser medida de maneira única. Cada modelo requer um modo de se definir um conjunto de links cujas contagens volumétricas contribuem para a calibração e/ou estimativa de uma matriz O-D de viagens. Os links desse conjunto serão chamados de **LINKS ATUANTES**.

Diante de todas essas considerações e observações feitas estabeleceu-se os seguintes referenciais:

**Referencial qualitativo:** Um link tem uma "boa" informação nas suas contagens, se ele é um **LINK ATUANTE**.

**Referencial quantitativo:** A contagem volumétrica de um link pertencente ao conjunto de links de uma rede viária, tem a maior quantidade de informação, quando a informação seletiva (ver secção 3.3) deste link, é maior que a dos outros links.

No capítulo VI esses referenciais serão usados e detalhados para a estruturação do novo método de alocação de contadores volumétricos de tráfego.

### 3.8 - Resumo.

Neste capítulo apresentaram-se conceitos da Teoria da Informação que foram considerados ferramentas básicas deste trabalho.

A secção 3.1 apresentou uma introdução que destaca as origens e o objetivo geral da Teoria da Informação.

Como os sistemas de comunicação são de natureza estatística, são necessários alguns conceitos da Estatística, tais como o de variável aleatória e o de distribuição de probabilidades. Esses conceitos são apresentados na secção 3.2. A variável aleatória exemplificada nesta secção é usada no capítulo VI para obter-se os eventos relacionados com cada link da rede viária e sua respectiva probabilidade de ocorrência.

A secção 3.3 introduziu algumas medidas da informação, destacando-se a informação seletiva e a entropia de Shannon. Essas medidas são apresentadas inicialmente de forma intuitiva e posteriormente são definidas formalmente. A entropia de Shannon foi destacada, por ser muito usada em modelos de transporte. A informação seletiva mostrou-se uma medida adequada para destacar links dentre os links de uma rede viária. Por isto, ela foi escolhida para classificar os links de uma rede viária, no novo método.

A definição e as propriedades da entropia condicional são apresentadas na secção 3.4. Esta medida entrópica mostrou-se adequada para ser usada em modelos de transporte, de acordo com a técnica do Wilson (1970), com a vantagem de absorver algumas informações referentes aos meso-estados do sistema. Os novos modelos apresentados no capítulo IV utilizam essa medida na função objetivo.

Na secção 3.5 apresentaram-se as principais propriedades das medidas definidas na secção 3.3, que auxiliam o planejador e/ou pesquisador da área de transportes.

Na secção 3.6 procurou-se apresentar uma interface entre a Teoria da Informação e Transportes, através da identificação dos micro, meso e macro-estados do sistema de transportes.

A secção 3.7 apresenta um referencial qualitativo e um

referencial quantitativo para medir a informação contida nas contagens volumétricas de tráfego dos links de uma rede viária. Para estabelecer o referencial quantitativo utilizou-se a informação seletiva. No estabelecimento do referencial qualitativo introduziu-se o conceito de link atuante. Os novos conceitos de Informação do tipo 1 e 2 são apresentados também nesta secção. Os referenciais citados são importantes, pois formam o alicerce do novo método apresentado no capítulo VI.

## CAPÍTULO IV

### NOVOS MODELOS PARA ESTIMAR MATRIZES O-D DE VIAGENS QUE UTILIZAM CONTAGENS VOLUMÉTRICAS DE TRÁFEGO

#### 4.1 - Introdução.

A busca de um referencial para medir a informação contida nas contagens volumétricas de um link numa rede viária provocou um estudo detalhado de alguns modelos (citados no capítulo II). Da análise desses modelos surgiram as novas idéias descritas nos capítulos anteriores, originando as premissas dos modelos para estimar uma matriz O-D de viagens.

Este capítulo apresenta todos os detalhes referentes a esses novos modelos.

#### 4.2 - Matrizes O-D de Valores Máximos.

As definições que seguem caracterizam uma matriz O-D de viagens, cujas células representam os valores máximos que os  $T_{ij}$  ( $i, j = 1, \dots, N$ ) podem assumir diante de determinados tipos de dados disponíveis, especificamente diante dos valores dos  $O_i$ ,  $D_j$  e alguns  $Vl_k$ .

#### 4.2.1 - Definições básicas.

Pode-se definir uma matriz O-D de viagens de valores máximos usando os dados:

- a) de produção e atração de viagens ( $O_i$  e  $D_j$ );
- b) de produção e atração de viagens e contagens volumétricas de alguns links da rede em estudo; e
- c) contagens volumétricas dos links que fazem a cobertura da matriz O-D.

As definições 1, 2 e 3 seguintes correspondem aos itens acima respectivamente.

**Definição 1:** - Seja  $W1 = [a_{ij}]$  uma matriz tal que  $a_{ij}$  é dado por

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{se } i = j \\ \min \{O_i, D_j\} & \text{se } i \neq j \end{cases} \quad (4.1)$$

onde  $O_i$  é o total de viagens originadas na zona "i" e  $D_j$  é o total de viagens que se destinam à zona "j".

**Definição 2 :** - Para uma alocação tudo ou nada define-se a matriz  $W2 = [b_{ij}]$  fazendo um refinamento na matriz  $W1 = [a_{ij}]$ , isto é,

$$b_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{se } i = j \\ \min \{a_{ij}, V_{ij}\} & \text{se } i \neq j \end{cases} \quad (4.2)$$

onde

$$V_{ij} = \min \left\{ V_k \text{ disponíveis, com valores de } k \text{ tal que } p_{ij}^k \neq 0 \right\}.$$

**Definição 3 :** Para uma alocação tudo ou nada define-se a matriz  $W3 = [e_{ij}]$  como



$$e_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{se } i = j \\ \min \{Vl_k, \text{ para } k \text{ tal que } p_{ij}^k \neq 0 \text{ e } l_k \in \text{COB}\}, & \text{se } i \neq j \end{cases} \quad (4.3)$$

onde COB é um conjunto cobertura da matriz O-D de viagens.

Este conjunto cobertura consiste de um conjunto de links da rede em estudo, tal que a união dos pares O-D associados a esses links, resulta no conjunto de todos os pares  $(i,j)$ , com  $i \neq j$ , de uma matriz O-D de viagens. Formalmente a definição de um conjunto cobertura pode ser encontrada em Christofides (1975).

#### 4.2.2 - Algumas alterações na matriz W2 e W3.

As matrizes W2 e W3 das definições 2 e 3 respectivamente podem sofrer algumas alterações em situações particulares. Salienta-se :

(1) Quando a equação fundamental de um link disponível apresenta um único par O-D, denotado por  $(i^*, j^*)$ , pode-se alterar a linha  $i^*$  e a coluna  $j^*$  da matriz W2. Cada par com origem  $i^*$  terá como valor  $O_{i^*} - T_{i^* j^*}$  e cada par com destino  $j^*$  terá como valor  $D_{j^*} - T_{i^* j^*}$ , desde que esses valores sejam menores que os já definidos anteriormente.

(2) Seja  $NO/D_k$ , o número de pares associados a cada link  $l_k$  da rede. Quando existe na rede  $N-2$  links com  $NO/D_k = 1$  e os  $N-2$  pares associados a esses links, ditos "bem definidos", estão numa mesma linha (ou mesma coluna), pode-se fazer uma nova alteração na matriz W. O par  $(i^*, j^*)$  com  $i^* \neq j^*$ , da respectiva linha (ou coluna) que não está bem definido, pode ser reescrito como:

$$b_{i^*j^*} = O_{i^*} - \sum_{j \neq j^*} b_{i^*j} \quad (\text{ou } b_{i^*j^*} = D_{j^*} - \sum_{i \neq i^*} b_{ij^*} ).$$

Com o par  $(i^*, j^*)$  bem definido, pode-se ainda redefinir os demais  $b_{ij}$  da coluna  $j^*$  (ou linha  $i^*$ ):

$$b_{ij^*} = D_{j^*} - b_{i^*j^*} \quad \text{para } i = 1, \dots, N, i \neq i^* \text{ e } i \neq j^*$$

$$(\text{ou } b_{i^*j} = O_{i^*} - b_{i^*j^*} \quad \text{para } j = 1, \dots, N, j \neq j^* \text{ e } j \neq i^* ),$$

desde que este novo valor seja menor que os valores anteriormente definidos.

(3) Quando existe um link  $l_k^*$  com  $NO/D_k^* = 1$ , e o par  $(i^*, j^*)$  associado a este link, está também associado a outros links da rede, pode-se verificar a possibilidade de alterar outros pares que ainda não estão bem definidos. Para os  $(i, j)$  com  $i \neq j$ ,  $i \neq i^*$  e  $j \neq j^*$  tem-se para  $V_{ij}$  da definição 2:

$$V_{ij} = \min \{ V_{l_k} - V_{l_k^*} \quad \text{com valores de } k \text{ tais que } p_{ij}^k \neq 0 \text{ e } p_{i^*j^*}^k \neq 0 \}.$$

A alteração (3) vale também para a matriz  $W3$ .

#### 4.2.3 - Exemplos.

Para exemplificar as definições 1, 2 e 3, considera-se uma rede simulada com 5 nós, dos quais 4 são centróides, e 10 links. Supondo conhecida a alocação de tráfego, pode-se escrever as equações fundamentais:

$$\begin{aligned} V_{l_1} &= T_{12} + T_{32} + T_{42} \\ V_{l_2} &= T_{21} + T_{24} \\ V_{l_3} &= T_{13} \\ V_{l_4} &= T_{31} + T_{32} + T_{41} + T_{42} \\ V_{l_5} &= T_{23} \\ V_{l_6} &= T_{31} + T_{32} + T_{34} \\ V_{l_7} &= T_{13} + T_{23} + T_{43} \\ V_{l_8} &= T_{41} + T_{42} + T_{43} \\ V_{l_9} &= T_{34} \\ V_{l_{10}} &= T_{24} + T_{14} \end{aligned}$$

Supondo que:

$$\begin{array}{ll} O_1 = 27 & D_1 = 12 \\ O_2 = 24 & D_2 = 35 \\ O_3 = 39 & D_3 = 37 \\ O_4 = 31 & D_4 = 37 \end{array}$$

pode-se escrever a matriz W1:

$$W1 = \begin{bmatrix} - & 27 & 27 & 27 \\ 12 & - & 24 & 24 \\ 12 & 35 & - & 37 \\ 12 & 31 & 31 & - \end{bmatrix}$$

Supondo conhecidas as contagens volumétricas dos links da rede:

$$\begin{array}{ll} V1_1 = 35 & V1_2 = 14 \\ V1_3 = 12 & V1_4 = 35 \\ V1_5 = 10 & V1_6 = 39 \\ V1_7 = 37 & V1_8 = 31 \\ V1_9 = 20 & V1_{10} = 17 \end{array}$$

pode-se escrever a matriz W2:

$$W2 = \begin{bmatrix} - & \min\{27,35\} & \min\{27,12\} & \min\{27,17\} \\ \min\{12,14\} & - & \min\{24,10\} & \min\{24,14\} \\ \min\{12,35\} & \min\{35,35\} & - & \min\{37,20\} \\ \min\{12,31\} & \min\{31,31\} & \min\{31,31\} & - \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} - & 27 & 12 & 17 \\ 12 & - & 10 & 14 \\ 12 & 35 & - & 20 \\ 12 & 31 & 31 & - \end{bmatrix}$$

Pode-se fazer alterações na matriz W2 definida acima, considerando-se as observações anteriores( ver secção 4.2.2):

(1) Diante da existência de pares bem definidos ( $b_{13} = 12$ ,  $b_{23} = 10$  e  $b_{34} = 20$ ) pode-se fazer as alterações:

$$\begin{aligned}
 b_{12} &= \min \{ 27, O_{1,13}-b_{13} \} = \min \{ 27, 15 \} = 15 \\
 b_{14} &= \min \{ 17, O_{1,13}-b_{13}, D_{4,34}-b_{34} \} = \min \{ 17, 15, 17 \} = 15 \\
 b_{21} &= \min \{ 12, O_{2,23}-b_{23} \} = \min \{ 12, 14 \} = 12 \\
 b_{24} &= \min \{ 14, O_{2,23}-b_{23}, D_{4,34}-b_{34} \} = \min \{ 14, 14, 17 \} = 14 \\
 b_{31} &= \min \{ 12, O_{3,34}-b_{34} \} = \min \{ 12, 19 \} = 12 \\
 b_{32} &= \min \{ 35, O_{3,34}-b_{34} \} = \min \{ 35, 19 \} = 19 \\
 b_{43} &= \min \{ 31, D_{3,13}-b_{13}, -b_{23} \} = \min \{ 31, 15 \} = 15.
 \end{aligned}$$

Portanto,

$$W2 = \begin{bmatrix} - & 15 & 12 & 15 \\ 12 & - & 10 & 14 \\ 12 & 19 & - & 20 \\ 12 & 31 & 15 & - \end{bmatrix}$$

Após a alteração anterior o par (4,3) também ficou bem definido. Pode-se, portanto, fazer alterações nos elementos da linha 4. Tem-se:

$$\begin{aligned}
 b_{41} &= \min \{ 12, O_{4,43}-b_{43} \} = \min \{ 12, 16 \} = 12 \\
 b_{42} &= \min \{ 31, O_{4,43}-b_{43} \} = \min \{ 31, 16 \} = 16.
 \end{aligned}$$

(3) A terceira alteração proposta pode ser realizada, entretanto, a matriz resultante permanece a mesma.

Portanto, a matriz W2 resultante é

$$W2 = \begin{bmatrix} - & 15 & 12 & 15 \\ 12 & - & 10 & 14 \\ 12 & 19 & - & 20 \\ 12 & 16 & 15 & - \end{bmatrix}$$

Para definir a matriz W3 necessita-se de um conjunto de cobertura da matriz O-D de viagens. Para definir um conjunto de cobertura pode-se usar algoritmos de cobertura ou

resolver um problema de programação inteira 0 - 1 (ver por exemplo Cristofides, 1975).

Usando o algoritmo descrito em Flemming (1993), implementado em Fortran 77 (Programa COB do anexo I), obteve-se o seguinte conjunto de cobertura

$$\{ l_4, l_7, l_2, l_6, l_1, l_{10} \} .$$

Assim,

$$\begin{array}{lll} e_{12} = V1_1 & e_{13} = V1_7 & e_{14} = V1_{10} \\ e_{21} = V1_2 & e_{23} = V1_7 & e_{24} = \min\{V1_2, V1_{10}\} \\ e_{31} = \min\{V1_4, V1_6\} & e_{32} = \min\{V1_1, V1_4, V1_6\} & e_{34} = V1_9 \\ e_{41} = V1_4 & e_{42} = \min\{V1_1, V1_4\} & e_{43} = V1_7. \end{array}$$

Portanto,

$$W3 = \begin{bmatrix} - & 35 & 37 & 17 \\ 14 & - & 37 & 14 \\ 35 & 35 & - & 39 \\ 35 & 35 & 37 & - \end{bmatrix}$$

Na figura 4.1 (A), (B) e (C) pode-se visualizar os elementos das matrizes W1, W2, W3 comparados com os valores da matriz observada  $T^*$ . Observa-se que todos os pontos assinalados estão acima ou sobre a reta bissetriz do quadrante, isto porque os elementos de W1, W2 e W3 são os valores máximos que os  $T_{ij}$  podem assumir, quando é feita a estimativa para a matriz O-D de viagens.

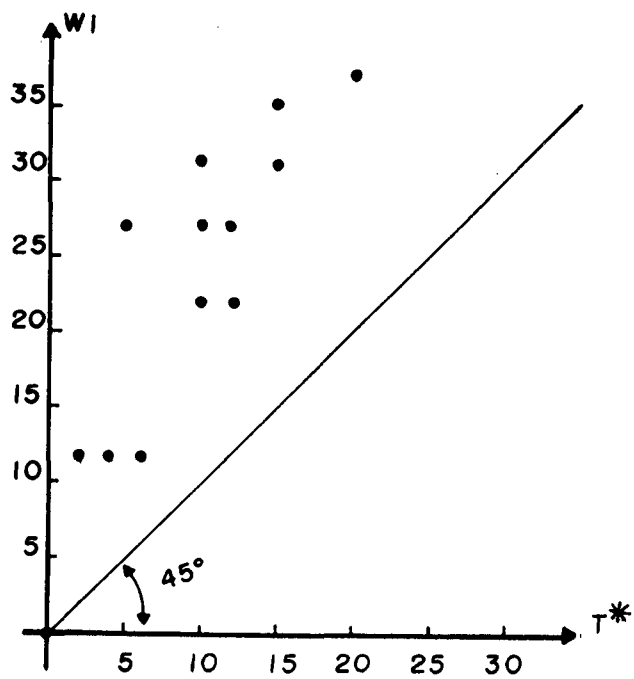


FIGURA 4.1 (A) - Matriz observada versus matriz  $W1$ .

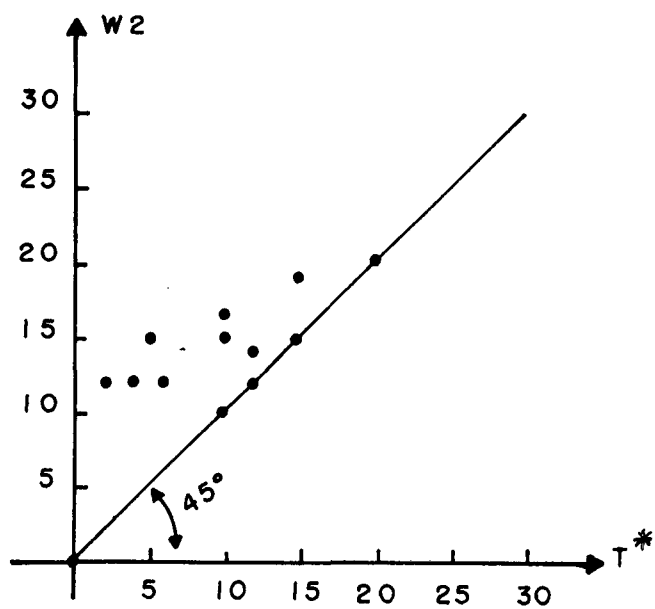


FIGURA 4.1 (B) - Matriz observada versus matriz  $W2$ .

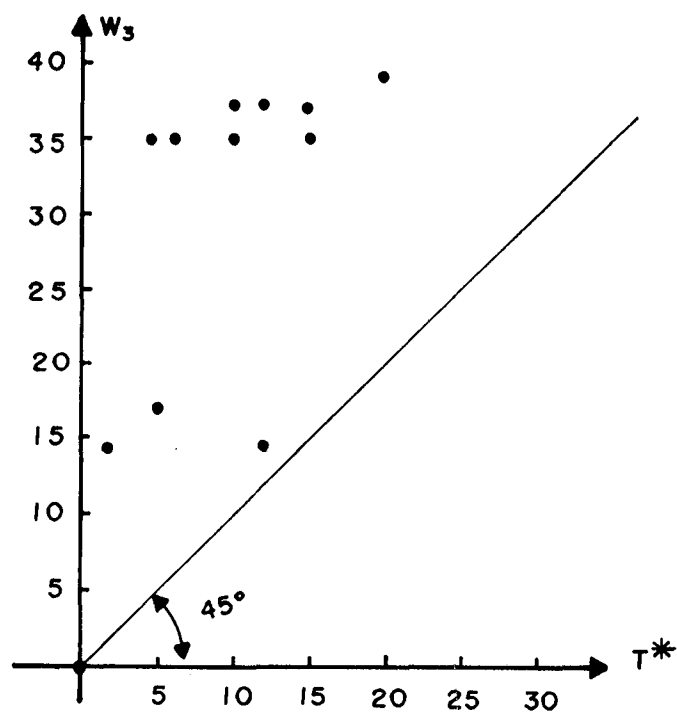


FIGURA 4.1 (C) - Matriz observada versus matriz  $W_3$ .

#### 4.3 - Um Novo Modelo para Estimar uma Matriz O-D de Viagens.

Pretende-se estimar uma matriz  $[T_{ij}]$  de viagens tal que :

a) Os elementos da matriz  $[T_{ij}]$  são positivos ou nulos e tem os seus valores restritos aos valores de uma matriz de valores máximos  $W = [W_{ij}]$ . A matriz  $W$  a ser usada, pode ser a matriz  $W_1$ ,  $W_2$  ou  $W_3$  definidas na secção 4.2.1.

b) Os elementos da matriz estimada  $T = [T_{ij}]$  devem satisfazer:

i) as equações de consistências

$$\sum_{i=1}^N T_{ij} = D_j \quad (j = 1, \dots, N) \quad (4.4)$$

$$\sum_{j=1}^N T_{ij} = O_i \quad (i = 1, \dots, N); \quad (4.5)$$

ii) as equações fundamentais

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_{ij}^k T_{ij} = V l_k, \quad k = 1, 2, \dots, M. \quad (4.6)$$

Vamos inicialmente fazer algumas adaptações à técnica usada por Wilson, pois dispomos de algumas informações sobre os meso-estados, isto é,

$$T_{ij} \leq W_{ij} \quad i, j = 1, 2, \dots, N.$$

Consideremos um espaço amostral A constituído pelos componentes individuais das células  $W_{ij}$  da matriz  $[W_{ij}]$ . As viagens individualizadas e personificadas (micro-estados) que são os componentes das células da matriz  $[T_{ij}]$  pertencem a esse espaço (ver subconjunto B da figura 4.2).

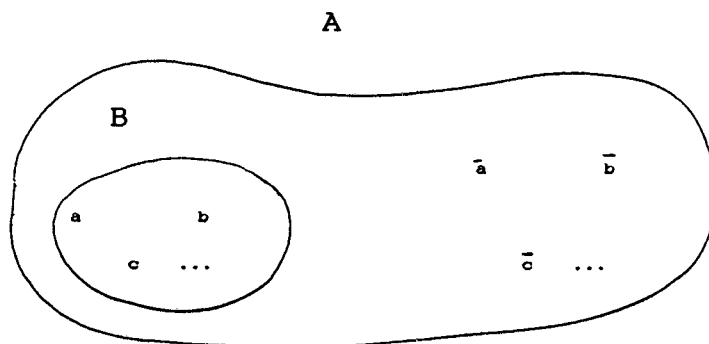


FIGURA 4.2 - Espaço Amostral

Qualquer célula da matriz  $W$  pode ser visualizada pela união de um subconjunto de B com um subconjunto de  $(A - B)$ .



Um meso-estado fica definido por um subconjunto de B. Define-se algumas distribuições de probabilidades como segue:

(a) Seja  $P(X)$  uma distribuição de probabilidades associada a uma variável aleatória discreta  $X$ ,

$$P(X) = \{ p(x_1) , p(x_2) \} \quad (4.7)$$

onde

$p(x_1) = T / W$  é a probabilidade de escolhido um elemento do espaço amostral  $A$ , este elemento , representar uma viagem dentre as  $T$  viagens.

$$(T = \sum_{1j} T_{1j} \text{ e } W = \sum_{1j} W_{1j}).$$

$p(x_2) = (W - T) / W$  é a probabilidade de escolhido um elemento do espaço amostral, este elemento não ser uma das  $T$  viagens.

(b) Seja  $P(Y)$  uma distribuição de probabilidades, associada a uma variável aleatória  $Y$ :

$$P(Y) = \{ p(y_{11}), \dots, p(y_{1N}), p(y_{21}), \dots, p(y_{2N}), \dots, p(y_{N1}), \dots, p(y_{NN}) \}$$

ou

$$P(Y) = \{ W_{ij} / W , i, j = 1, 2, \dots, N \} \quad (4.8)$$

onde

$p(y_{1j}) = W_{1j} / W$  é a probabilidade de escolhido um elemento do espaço amostral  $A$ , este elemento ser um elemento da célula  $W_{1j}$ .

(c) Usando as distribuições (4.7) e (4.8) pode-se definir duas outras distribuições:

$$[ p(x_r , y_{1j}) ] \text{ e } [ p(y_{1j} / x_r) ]$$

com

$$[p(x_r, y_{ij})] = \begin{bmatrix} p(x_1^1, y_{ij}) & , i, j= 1, \dots, N \\ p(x_2^1, y_{ij}) & , i, j= 1, \dots, N \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$[p(y_{ij} / x_r)] = \begin{bmatrix} \frac{p(x_r, y_{ij})}{p(x_r)} & r = 1, 2 \\ & i, j = 1, 2, \dots, N \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

onde

$p(x_1, y_{ij}) = T_{ij} / W$  é a probabilidade de escolhido um elemento do espaço amostral este elemento represente uma viagem de origem "i" e destino "j".

$p(x_2, y_{ij}) = (W_{ij} - T_{ij}) / W$  é a probabilidade de escolhido um elemento do espaço amostral este elemento não represente uma viagem de origem "i" e destino "j".

e

$p(y_{ij} / x_r)$  são probabilidades condicionais.

Usando as distribuições (4.9) e (4.10) pode-se definir a entropia condicional  $H(Y/X)$  (ver por ex. Aczél e Daróczy, 1975):

$$H(Y/X) = - \sum_{ij} \left[ \frac{T_{ij}}{W} \ln \frac{T_{ij}}{T} \right] - \sum_{ij} \left[ \frac{W_{ij} - T_{ij}}{W} \ln \frac{W_{ij} - T_{ij}}{W - T} \right] \quad (4.11)$$

Esta entropia é a medida entrópica em termos dos meso-estados, considerando-se as restrições  $T_{ij} \leq W_{ij}$ .

Identificada esta medida, segue-se as etapas propostas

em Wilson (1970), isto é, identifica-se um conjunto de restrições (macro-estados) e após ter sido escolhida uma técnica de otimização, resolve-se o problema de maximização sujeito às restrições.

Estruturam-se então dois novos modelos:

(1) O modelo denotado por M2, que usa como restrições as equações de consistência dadas em (4.4) e (4.5).

(2) O modelo denotado por M3, que usa como restrições as equações fundamentais dadas em (4.6).

A estruturação e calibração desses modelos são apresentadas nas secções seguintes.

#### 4.4 - O Modelo M2.

##### 4.4.1 - Definição e estruturação.

O modelo M2 tem como função objetivo a função definida em (4.11) e como restrições as equações de consistência definidas em (4.4) e (4.5). Tem-se

$$\max H(Y/X) \quad (4.12)$$

$$\text{s.a. } \sum_{j=1}^N T_{ij} = O_i \quad (i=1, \dots, N) \quad (4.13)$$

$$\sum_{i=1}^N T_{ij} = D_j \quad (j=1, \dots, N) \quad (4.14)$$

$$O_i \leq T_{ij} \leq W_{ij} \quad (i, j=1, \dots, N) \quad (4.15)$$

A função entrópica  $H(Y/X)$  pode ser reescrita como:

$$H(Y/X) = \frac{1}{W} \left[ - \sum_{ij} T_{ij} \ln T_{ij} - \sum_{ij} (W_{ij} - T_{ij}) \ln (W_{ij} - T_{ij}) + k \right] \quad (4.16)$$

onde  $K = T \ln T + (W - T) \ln (W - T)$  é uma constante.

Portanto o problema de maximização também pode ser reescrito como o seguinte problema de minimização:

$$\min F = \sum_{ij} [T_{ij} \ln T_{ij} + (W_{ij} - T_{ij}) \ln (W_{ij} - T_{ij})] \quad (4.17)$$

$$\text{s.a. } \sum_j T_{ij} = O_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (4.18)$$

$$\sum_i T_{ij} = D_j \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (4.19)$$

$$0 \leq T_{ij} \leq W_{ij} \quad (i, j = 1, \dots, N) \quad (4.20)$$

$$\text{A função } F = \sum_{ij} T_{ij} \ln T_{ij} + \sum_{ij} (W_{ij} - T_{ij}) \ln (W_{ij} - T_{ij})$$

é uma função estritamente convexa, pois é a soma de funções estritamente convexas, cada uma de uma variável específica  $T_{ij}$  (ver por ex. Bazaraa, 1979)

Esta função  $F$  está definida num conjunto

$$Z = \{ [T_{ij}] \mid 0 \leq T_{ij} \leq W_{ij} \}$$

com a convenção de que  $0 \cdot \ln 0 = 0$ .

O conjunto  $Z$  é fechado, limitado e convexo num sub espaço vetorial  $E_{NN}$  contido no espaço euclidiano  $NN$ -dimensional.

Uma função estritamente convexa definida sobre um conjunto convexo fechado e limitado admite um único mínimo. Este mínimo pode estar no interior de  $Z$ , quando  $0 < T_{ij} < W_{ij}$ , ou estar na fronteira de  $Z$ , quando  $T_{ij} = 0$  ou  $T_{ij} = W_{ij}$ .

Para o caso de um ponto interior, pode-se usar o

Método de Lagrange (ver por exemplo Novaes, 1978), para achar o ponto ótimo.

O lagrangeano é :

$$L = \sum_{ij} T_{ij} \ln T_{ij} + \sum_{ij} (w_{ij} - T_{ij}) \ln (w_{ij} - T_{ij}) - \sum_i \lambda_i \left[ \sum_j T_{ij} - O_i \right] - \sum_j \beta_j \left[ \sum_i T_{ij} - D_j \right].$$

Derivando em relação a  $T_{ij}$  vem:

$$\frac{\partial L}{\partial T_{ij}} = T_{ij} \frac{1}{T_{ij}} + \ln T_{ij} + (w_{ij} - T_{ij}) \frac{-1}{w_{ij} - T_{ij}} - \ln (w_{ij} - T_{ij}) - \lambda_i - \beta_j.$$

Igualando a zero, obtém-se:

$$\ln (w_{ij} - T_{ij}) - \ln T_{ij} = -\lambda_i - \beta_j$$

$$\ln \frac{w_{ij} - T_{ij}}{T_{ij}} = -\lambda_i - \beta_j$$

$$\frac{w_{ij} - T_{ij}}{T_{ij}} = e^{-\lambda_i - \beta_j} \quad (4.21)$$

$$T_{ij} = \frac{w_{ij}}{1 + e^{-\lambda_i - \beta_j}} \quad (4.22)$$

Fazendo  $A_i = e^{-\lambda_i}$  e  $B_j = e^{-\beta_j}$ , pode-se reescrever (4.22) como segue:

$$T_{ij} = \frac{w_{ij}}{1 + A_i \cdot B_j} \quad (4.23)$$

A expressão (4.21) pode ser escrita como

$$w_{ij} - T_{ij} = T_{ij} e^{-\lambda_i - \beta_j}. \quad (4.24)$$

Aplicando o somatório sobre todos os "i" e depois sobre todos os "j" em (4.24) vem:

$$\sum_i w_{ij} - \sum_i T_{ij} = \sum_i T_{ij} \cdot A_i \cdot B_j \quad (4.25)$$

$$\sum_j w_{ij} - \sum_j T_{ij} = \sum_j T_{ij} \cdot A_i \cdot B_j. \quad (4.26)$$

De (4.25) tira-se que:

$$B_j = \frac{\sum_i w_{ij} - D_j}{\sum_i T_{ij} \cdot A_i} \quad (4.27)$$

onde  $\sum_i T_{ij}$  foi substituído por  $D_j$ .

De (4.26) tira-se:

$$A_i = \frac{\sum_j w_{ij} - O_i}{\sum_j T_{ij} \cdot B_j} \quad (4.28)$$

onde  $\sum_j T_{ij}$  foi substituído por  $O_i$ .

Para o caso de existir pontos na fronteira, isto é, quando  $T_{ij} = w_{ij}$ , as equações (4.23), (4.27) e (4.28) podem

ser utilizadas definindo-se a indeterminação 0/0 obtida em (4.27) e (4.28) como igual a zero. Portanto, as equações (4.23), (4.27) e (4.28), são as equações que serão usadas para a estimativa da matriz  $[T_{ij}]$ .

#### 4.4.2 - Calibração do M2.

O sistema de equações definido por (4.23), (4.27) e (4.28) apresenta um caráter recursivo, na medida em que os fatores de balancamento  $A_i$ 's e  $B_j$ 's, responsáveis pela satisfação das restrições (4.18) e (4.19), encontram-se especificados em função de  $T_{ij}$ .

Neste caso faz-se necessário utilizar um procedimento iterativo, como o descrito a seguir:

(a) Obter os dados de entrada:

- (i) matriz de valores máximos  $[W_{ij}]$  e
- (ii) dados de produção e atração de viagens -  $O_i$  e  $D_j$ ,  
 $i, j = 1, \dots, N$ .

(b) Inicializar os valores dos  $A_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ), fazendo  $A_i = 1$  para todos os "i".

(c) Inicializar os valores dos  $B_j$  ( $j = 1, \dots, N$ ), usando a equação

$$B_j = \left( \sum_i W_{ij} - D_j \right) / D_j .$$

(d) A partir dos  $A_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) e dos  $B_j$  ( $j = 1, \dots, N$ ) determinar os valores dos  $T_{ij}$  ( $i, j = 1, \dots, N$ ) através da equação (4.23).

(e) Verificar se as equações (4.18) estão satisfeitas. Em caso afirmativo vá para a etapa (f). Em caso negativo vá para a etapa (h).

(f) Verificar se as equações (4.19) estão satisfeitas. Em

caso afirmativo PARE. Em caso negativo vá para a etapa (g).

(g) Calcular os novos  $B_j$  ( $j = 1, \dots, N$ ) usando a equação (4.27) e retornar a etapa (d).

(h) Calcular os novos  $A_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) usando a equação (4.28).

(i) Calcular os  $T_{ij}$  ( $i, j = 1, \dots, N$ ) usando a equação (4.23).

(j) Verificar se as equações (4.19) estão satisfeitas. Em caso afirmativo vá para a etapa (k). Em caso negativo vá para a etapa (g).

(k) Verificar se as equações (4.18) estão satisfeitas. Em caso afirmativo PARE. Em caso negativo vá para a etapa (h).

Para verificar se as equações (4.18) e (4.19) estão satisfeitas adotou-se o seguinte critério:

Para cada  $i, j = 1, \dots, N$  definiu-se

$$VEROI = \sum_i |O_i^{(n)} - O_i| \quad \text{e} \quad VERDJ = \sum_j |D_j^{(n)} - D_j|$$

onde

$$O_i^{(n)} = \sum_j T_{ij}^{(n)} \quad ; \quad D_j^{(n)} = \sum_i T_{ij}^{(n)} \quad \text{sendo os } T_{ij}^{(n)} \quad (i, j = 1, \dots, N) \text{ os valores estimados na iteração "n".}$$

As equações (4.18) e (4.19) estão satisfeitas quando  $VEROI < \varepsilon$  e  $VERDJ < \varepsilon$  respectivamente, onde  $\varepsilon > 0$  é o valor de tolerância definido no início do procedimento.

Este algoritmo de calibração foi implementado em Fortran 77 (descrito no anexo I - denotado por M2) e foi testado para 27 redes simuladas. A calibração foi



devidamente alcançada para todas as seqüências de links escolhidas, o que mostra que o modelo deduzido é plenamente operacional.

#### 4.5 - O Modelo M3.

##### 4.5.1 - Definição e estruturação.

O modelo M3 tem como função objetivo a função entrópica condicional definida em (4.11) e como restrições as equações fundamentais de alguns links da rede viária. Tem-se,

$$\max H(Y/X) \quad (4.29)$$

$$\text{s.a. } \sum_{i,j} p_{i,j}^k T_{i,j} = V l_k \quad (k = 1, \dots, M) \quad (4.30)$$

$$0 \leq T_{i,j} \leq W_{i,j} \quad (4.31)$$

A função entrópica  $H(Y/X)$  pode ser reescrita como:

$$H(Y/X) = \frac{1}{W} \left[ -\sum_{i,j} T_{i,j} \ln T_{i,j} - \sum_{i,j} (W_{i,j} - T_{i,j}) \ln (W_{i,j} - T_{i,j}) + k \right]$$

onde  $K = T \ln T + (W - T) \ln (W - T)$  é uma constante.

Portanto o problema de maximização também pode ser reescrito como o seguinte problema de minimização:

$$\min F = \left[ \sum_{i,j} T_{i,j} \ln T_{i,j} + (W_{i,j} - T_{i,j}) \ln (W_{i,j} - T_{i,j}) \right] \quad (4.32)$$

$$\text{s.a. } \sum_{i,j} p_{i,j}^k T_{i,j} = V l_k \quad (k = 1, 2, \dots, M) \quad (4.33)$$

$$0 \leq T_{i,j} \leq W_{i,j} \quad (i, j = 1, 2, \dots, N) \quad (4.34)$$

Com observações análogas às anteriores, feitas para o modelo M2, pode-se usar o método de Lagrange.

O lagrangeano pode ser escrito como:

$$L = \sum_{ij} T_{ij} \ln T_{ij} + \sum_{ij} (W_{ij} - T_{ij}) \ln (W_{ij} - T_{ij}) + \lambda_k (Vl_k - \sum_{ij} p_{ij}^k T_{ij}) \quad (4.35)$$

Fazendo as derivadas parciais em relação a  $T_{ij}$  e  $\lambda_k$  vem

$$\frac{\partial L}{\partial T_{ij}} = \ln T_{ij} - \ln (W_{ij} - T_{ij}) - \sum_k \lambda_k p_{ij}^k \quad (4.36)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_k} = Vl_k - \sum_{ij} p_{ij}^k T_{ij} \quad (4.37)$$

Igualando a zero tem-se

$$\ln \frac{W_{ij} - T_{ij}}{T_{ij}} = - \sum_k \lambda_k p_{ij}^k \quad (4.38)$$

$$Vl_k - \sum_{ij} p_{ij}^k T_{ij} = 0 \quad (4.39)$$

Fazendo  $X_k = e^{-\lambda_k}$  a equação (4.38) pode ser escrita como

$$\frac{W_{ij} - T_{ij}}{T_{ij}} = \prod_k X_k^{p_{ij}^k} \quad (i, j, \dots, N) \quad (4.40)$$

ou

$$T_{ij} = \frac{W_{ij}}{1 + \prod_k X_k^{p_{ij}^k}}, \quad (i, j=1, \dots, N) \quad (4.41)$$

Usando as equações (4.39) e (4.41) pode-se calibrar o modelo deduzido.

#### 4.5.2 - Calibração.

O procedimento usado para calibrar este modelo está baseado em procedimentos descritos em Murchland (1977 e 1978) e em Willumsen (1981a).

Reescreve-se as equações (4.40) como

$$D_{ij} = T_{ij} \prod_k X_k^{p_{ij}^k} \quad (i, j=1, 2, \dots, N) \quad (4.42)$$

onde  $D_{ij} = W_{ij} - T_{ij}$ .

Para alguns  $Vl_k$  dados, e diante da matriz  $W$  definida na secção 4.2, podemos escrever as equações

$$DVI_k = \sum_{ij} p_{ij}^k D_{ij} \quad (k=1, \dots, M) \quad (4.43)$$

Analisando as equações (4.42) e (4.43) podemos dizer que o problema : " Encontrar os  $T_{ij}$  que satisfazem as equações (4.39) e (4.41)" é equivalente ao problema: "Encontrar os  $D_{ij}$  que satisfazem as equações (4.42) e (4.43)".

Estamos considerando, neste caso, que os  $D_{ij}$  assumem um valor inicial igual a  $T_{ij}$ , ou que os  $T_{ij}$  assumem um valor inicial igual a  $W_{ij}/2$ . Esses valores iniciais vão ser ajustados através de um fator de proporcionalidade ( $X_k$ ), da  $k$ -ésima soma ( $DVI_k$ ). Este problema é um problema multi-proporcional (ver Murchland ,1977 e 1978). Uma formulação matemática para resolver este problema é apresentada em Murchland , 1977 e usada em diversos problemas semelhantes (por ex. ver Willumsen , 1981a).

Para este caso, especificamente é necessário uma adaptação para garantir que  $D_{ij} \leq W_{ij}$  ,  $(i, j=1, 2, \dots, N)$ .

Tem-se então o seguinte procedimento:

(a) Obter os dados de entrada:

- i)  $[p_{ij}^k]$  - particularmente podem ser obtidos por uma alocação tudo ou nada;
- ii)  $[W_{ij}]$  e
- iii) Contagens volumétricas de  $L_c$  links.

(b) Supor os valores iniciais  $[IT_{ij}] = [W_{ij} / 2]$ .

(c) Encontrar as somas  $DVl_k$ .

(d) Fazer  $n = 1$  ( $n$  é o número de iterações).

(e) Fazer  $[D_{ij}] = [IT_{ij}]$ .

(f) Fazer  $X_k = 1$  para todos os links.

(g) Para cada link  $k$  de uma lista de links dados fazer:

- i) Calcular a diferença de fluxo  $DVl_k^{(n)} = \sum_{ij} p_{ij}^k D_{ij}$ .
- ii) Trocar  $X_k$  por  $X_k \cdot Y_k$ , onde  $Y_k$  é obtido pela resolução da equação:

$$\hat{DVl}_k = \sum_{ij} p_{ij}^k D_{ij} Y_k^p$$

Para uma alocação tudo ou nada tem-se

$$Y_k = \frac{\hat{DVl}_k}{DVl_k^{(n)}}$$

- iii) Encontrar  $D_{ij} = D_{ij} \cdot Y_k^p$  ( $i, j = 1, 2, \dots, N$ ).

(h) Verificar para todos os  $k$  se

$$\frac{|DVl_k^{(n)} - \hat{DVl}_k|}{\hat{DVl}_k} \cdot 100 < \delta$$

onde  $\delta$  é o valor de tolerância definido no início do procedimento. Em caso afirmativo vá para a etapa (i) e em caso negativo fazer  $n = n + 1$  e retornar para a etapa (g).

(i) Verificar se  $D_{ij} \leq W_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, N$ ). Em caso afirmativo PARE. Em caso negativo vá para a etapa (j).

(j) Redefinir os valores iniciais de  $(IT_{ij})$ , seguindo os seguintes itens :

i) Obter uma lista dos links tais que  $p_{ij}^k = 1$  para os pares  $(i, j)$  tais que  $D_{ij} \leq W_{ij}$ .

ii) Obter uma lista dos pares O/D que compõem as somas  $DV1_k$ , para os  $k$  listados no item anterior, exceto os pares tais que  $D_{ij} \leq W_{ij}$ .

iii) Fazer

$$IT_{ij} = \begin{cases} IT_{ij} + K, & \text{para todos os pares listados no item anterior} \\ IT_{ij}, & \text{para os demais pares.} \end{cases}$$

onde  $k$  pode ser igual a 1 ou uma constante positiva adequada.

(K) Fazer  $n = n + 1$  e retornar à etapa (e).

Este algoritmo foi implementado em Fortran 77 (ver programa M3 descrito no Anexo I). Dezesesseis redes simuladas foram testadas, obtendo-se sempre os resultados esperados. No capítulo seguinte apresenta-se detalhadamente o desenvolvimento de um exemplo, e as respectivas análises para avaliar o desempenho desse modelo.

#### 4.6 - Dedução do M2 e M3 Usando uma Distribuição de probabilidades.

Nesta secção verifica-se que a função objetivo usada

nos modelos M2 e M3 pode ser deduzida também a partir de uma distribuição de probabilidades (ver Flemming e Ulysséa Neto, 1992b).

Deseja-se distribuir  $T$  viagens entre os pares de zonas  $(i,j)$ ,  $i \neq j$ , sabendo-se que os  $T_{ij}$  têm os seus valores limitados pelos valores  $W_{ij}$ .

A probabilidade de ocorrência de uma distribuição, denotada por  $p\left\{ (T_{ij}), i \neq j \right\}$  é dada pela expressão:

$$\begin{aligned}
 p\left\{ (T_{ij}), i \neq j \right\} &= p\left[ T_{12}/T_{13}, \dots, T_{1N}, T_{21}, T_{23}, \dots, T_{2N}, \dots, T_{NN} \right] \cdot \\
 &\cdot p\left[ T_{13}/T_{14}, T_{15}, \dots, T_{1N}, T_{21}, T_{23}, \dots, T_{2N}, \dots, T_{NN} \right] \cdot \\
 &\cdot \dots \cdot p\left[ T_{N,N-1} / T_{NN} \right] \cdot p(T_{NN}), \quad (4.44)
 \end{aligned}$$

onde as probabilidades que aparecem à direita do sinal de igualdade são probabilidades condicionais, com exceção da  $p(T_{NN})$  que é uma probabilidade individual.

Usando a forma combinatorial pode-se reescrever (4.44), como:

$$p\left\{ (T_{ij}), i \neq j \right\} = \frac{C_{W_{12}}^{T_{12}} \cdot C_{W_{13}}^{T_{13}} \cdot \dots \cdot C_{W_{NN}}^{T_{NN}}}{C_{T_w}^T} \quad (4.45)$$

onde  $T_w = \sum_{ij} w_{ij}$ .

Aplicando a definição de combinação da análise combinatória, vem:

$$p\left(\{T_{ij}\}, i \neq j\right) = \frac{\frac{\pi_{i,j(i \neq j)}}{\pi_{i,j(i \neq j)}} \frac{w_{ij}!}{T_{ij}! (w_{ij} - T_{ij})!}}{\frac{T_w!}{T! (T_w - T)!}} \quad (4.46)$$

Dentre as diversas distribuições verifica-se a existência de uma distribuição cuja probabilidade de ocorrência é a maior de todas. Esta distribuição é dita a mais provável de ocorrer. Tem-se então que maximizar a probabilidade de ocorrência. Valem, portanto, as relações que seguem:

$$\begin{aligned} \max p\left(\{T_{ij}\}, i \neq j\right) &= \max \left[ \ln p \left[ \{ T_{ij} \}, i \neq j \right] \right] \\ &= \max \left( \ln \frac{\pi_{i,j(i \neq j)}}{\pi_{i,j(i \neq j)}} \frac{w_{ij}!}{T_{ij}! (w_{ij} - T_{ij})!} \right) \\ &= \max \left( \sum_{ij} \ln w_{ij}! - \sum_{ij} \ln T_{ij}! - \right. \\ &\quad \left. - \sum_{ij} \ln (w_{ij} - T_{ij})! \right) \end{aligned} \quad (4.47)$$

Usando a aproximação de Stirling ( $\ln T! \approx T \ln T - T$ ), tem-se:

$$\begin{aligned} \max p\left(\{T_{ij}\}, i \neq j\right) &= \max \left( \sum_{ij} w_{ij} \ln w_{ij} - \sum_{ij} w_{ij} - \sum_{ij} T_{ij} \ln T_{ij} + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{ij} T_{ij} - \sum_{ij} (w_{ij} - T_{ij}) \ln (w_{ij} - T_{ij}) + \sum_{ij} (w_{ij} - T_{ij}) \right) \\ &= \max \left( - \sum_{ij} T_{ij} \ln T_{ij} - \sum_{ij} (w_{ij} - T_{ij}) \ln (w_{ij} - T_{ij}) \right). \end{aligned}$$

Encontra-se, assim, a mesma função objetivo proposta nas secções 4.4.1 e 4.5.1. Obviamente esta função objetivo leva à obtenção dos modelos M2 e M3 deduzidos nas secções anteriores.

#### 4.7 - Algumas Observações.

Fazem-se necessários algumas considerações com relação a esses dois novos modelos apresentados neste capítulo.

A função objetivo dos modelos M2 e M3 foi deduzida de duas maneiras distintas, isto é, usando-se:

- i) a maximização da probabilidade de ocorrência de uma determinada distribuição e
- ii) a maximização da entropia condicional.

A maximização da probabilidade de ocorrência de uma distribuição para encontrar-se a distribuição mais provável, já é consagrada na literatura. Alguns desses modelos apresentam o problema da equiprobabilidade de todas as distribuições particulares (ver por exemplo Wilson, 1970). Nos novos modelos, aqui apresentados (M2 e M3), contorna-se este problema, limitando-se o número de distribuições particulares (ou micro-estados).

Os modelos entrópicos, encontrados na literatura, utilizam a maximização de uma função entrópica, onde a entropia usada é a entropia de Shannon (ver secção 2.4.3). Os modelos M2 e M3 utilizam a entropia condicional. A entropia condicional mostrou-se adequada, pois ela absorve a informação de limitação dos valores dos  $T_{ij}$ .

Ambos os modelos foram calibrados conforme



secções 4.4.2 e 4.5.2. Os testes com redes simuladas foram realizados. Para todas as seqüências de links escolhidas, obteve-se bons resultados. A descrição de um exemplo simulado, e a maneira usada para avaliar as estimativas, estão detalhadas no capítulo seguinte.

A matriz de valores máximos definida neste capítulo viabilizou a definição da função objetivo de ambos os modelos. No próximo capítulo apresentam-se alguns testes realizados com esta matriz. Verifica-se, a partir desses testes, que a matriz de valores máximos pode ser usada para definir uma matriz "a priori", aplicável em modelos como o modelo de Willumsen.

## CAPÍTULO V

### ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS MODELOS M2 E M3 ATRAVÉS DE UM EXEMPLO SIMULADO

#### 5.1 - Introdução.

Neste capítulo apresenta-se uma aplicação dos modelos M2 e M3, usando-se um exemplo simulado.

A opção de usar um exemplo simulado, ao invés de um exemplo real, foi feita tendo em vista a não existência de dados reais. Para que a aplicação seja avaliada necessitam-se dos dados:

- matriz O-D observada e
- contagens volumétricas de alguns links da rede.

Para algumas regiões têm-se as contagens volumétricas, mas não se tem a matriz observada ou vice-versa. A coleta da matriz O-D observada requer recursos que não estão disponíveis .

A avaliação do desempenho de um modelo usando exemplo simulado é bastante usada na literatura (ver por exemplo Willumsen e Van Zuylen, 1980; Bell, 1983; Cascetta e Nguyen, 1988).

Duas estatísticas foram utilizadas para analisar a proximidade das estimativas obtidas com a matriz observada

proposta. Estas estatísticas estão apresentadas também neste capítulo.

Ao final deste capítulo apresentam-se também alguns resultados que mostram uma utilidade da matriz  $W$  de valores máximos, isto é, a matriz  $W$  pode ser usada para definir uma matriz "a priori".

## 5.2 - Descrição do Exemplo Simulado.

Seja uma área de estudo com 8 zonas de tráfego. A tabela 5.1 mostra a matriz O-D observada na área, juntamente com os dados de produção ( $O_i$ ) e atração ( $D_j$ ) de viagens.

O\D	1	2	3	4	5	6	7	8	$O_i$
1	0	12	27	13	5	7	2	4	70
2	13	0	12	5	9	15	7	10	71
3	4	21	0	13	2	9	5	21	75
4	18	15	12	0	4	15	12	3	79
5	13	2	13	13	0	17	1	7	66
6	2	3	10	9	3	0	9	2	38
7	4	7	25	8	9	21	0	9	83
8	7	25	24	7	12	17	4	0	96
$D_j$	61	85	123	68	44	101	40	56	578

TABELA 5.1 - Matriz observada do exemplo simulado

A rede simulada tem 15 nós, dos quais 8 são centróides. As rodovias que ligam os pares de zonas estão simbolizadas através de links direcionados de um grafo simplificado, mostrado na figura 5.1.

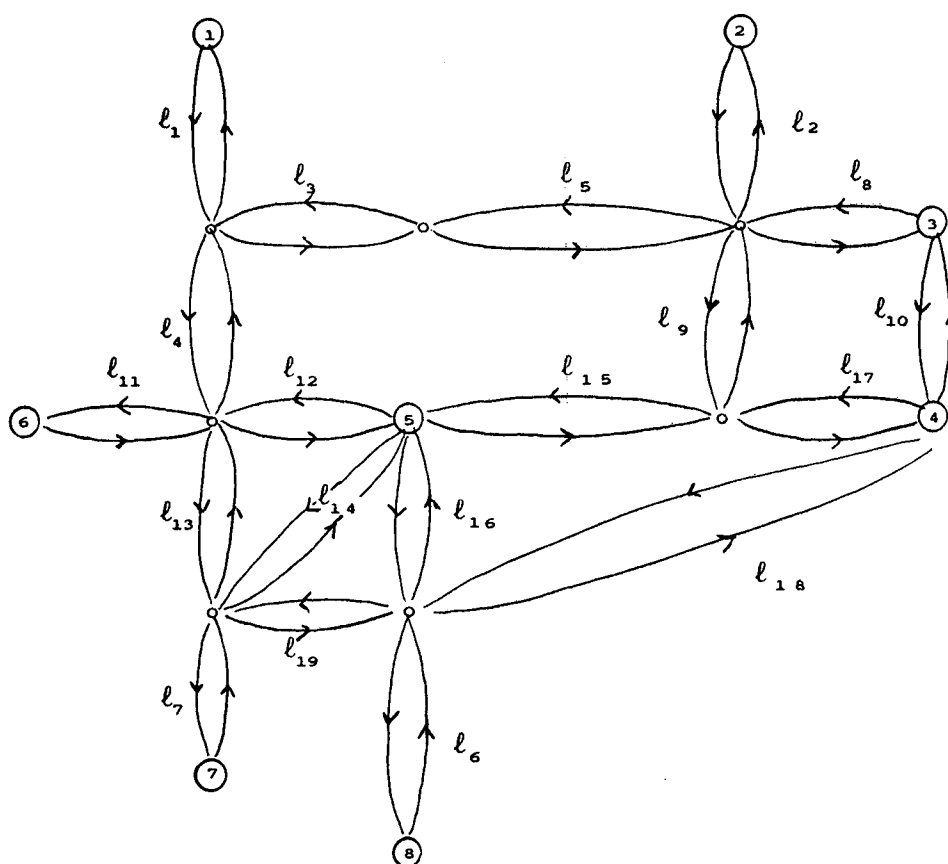


FIGURA 5.1 - Rede do exemplo simulado.

### 5.3 - Definição da Matriz de Valores Máximos.

Para aplicar o modelo M2 ou o modelo M3, necessita-se inicialmente da matriz  $W$  de valores máximos. A matriz  $W$  é definida, de acordo com as definições 1, 2 ou 3 da secção 4.2. Quando usa-se a definição 1, utilizam-se somente os dados de produção e atração de viagens listados na tabela 5.1. Para o caso das definições 2 e 3, utilizam-se as contagens volumétricas de alguns links da rede viária.

Os pares O-D associados a cada link devem ser

listados. Para isso necessita-se de uma alocação de tráfego. Neste caso a alocação escolhida é a alocação tudo ou nada, pois os modelos M2 e M3 foram calibrados baseados neste tipo de alocação.

A tabela 5.2 mostra os caminhos mínimos do exemplo em análise. O valor 0 (zero) simboliza que o link  $l_k$  não faz parte do caminho mínimo entre "i" e "j". O valor 1 (um) é usado em caso contrário. Portanto, usando os valores da tabela 5.2 definem-se os valores das proporções  $p_{ij}^k$  para  $i, j = 1, \dots, 8$ ,  $i \neq j$  e  $k=1, \dots, 19$ . Salienta-se que para cada "k" têm-se duas equações fundamentais, pois todos os links representam uma rodovia com duas direções.

PARES O/D	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$	$l_6$	$l_7$	$l_8$	$l_9$	$l_{10}$
(1,2)e(2,1)	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0
(1,3)e(3,1)	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0
(1,4)e(4,1)	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
(1,5)e(5,1)	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
(1,6)e(6,1)	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
(1,7)e(7,1)	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0
(1,8)e(8,1)	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
(2,3)e(3,2)	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
(2,4)e(4,2)	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1
(2,5)e(5,2)	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
(2,6)e(6,2)	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
(2,7)e(7,2)	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
(2,8)e(8,2)	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1
(3,4)e(4,3)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
(3,5)e(5,3)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
(3,6)e(6,3)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
(3,7)e(7,3)	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
(3,8)e(8,3)	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
(4,5)e(5,4)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(4,6)e(6,4)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(4,7)e(7,4)	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
(4,8)e(8,4)	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
(5,6)e(6,5)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(5,7)e(7,5)	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
(5,8)e(8,5)	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
(6,7)e(7,6)	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
(6,8)e(8,6)	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
(7,8)e(8,7)	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0

TABELA 5.2 (A) - Caminhos mínimos do ex. simulado (links 1 a 10)

PARES O/D	$l_{11}$	$l_{12}$	$l_{13}$	$l_{14}$	$l_{15}$	$l_{16}$	$l_{17}$	$l_{18}$	$l_{19}$
(1,2)e(2,1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(1,3)e(3,1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(1,4)e(4,1)	0	1	0	0	1	0	1	0	0
(1,5)e(5,1)	0	1	0	0	0	0	0	0	0
(1,6)e(6,1)	1	0	0	0	0	0	0	0	0
(1,7)e(7,1)	0	0	1	0	0	0	0	0	0
(1,8)e(8,1)	0	0	0	1	0	0	0	0	0
(2,3)e(3,2)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(2,4)e(4,2)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(2,5)e(5,2)	0	0	0	0	1	0	0	0	0
(2,6)e(6,2)	1	1	0	0	1	0	0	0	0
(2,7)e(7,2)	0	0	0	0	1	1	0	0	1
(2,8)e(8,2)	0	0	0	0	0	0	0	1	0
(3,4)e(4,3)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(3,5)e(5,3)	0	0	0	0	1	0	1	0	0
(3,6)e(6,3)	1	1	0	0	1	0	1	0	0
(3,7)e(7,3)	0	0	0	0	0	0	0	1	1
(3,8)e(8,3)	0	0	0	0	0	0	0	1	0
(4,5)e(5,4)	0	0	0	0	1	0	1	0	0
(4,6)e(6,4)	1	1	0	0	1	0	1	0	0
(4,7)e(7,4)	0	0	0	0	0	0	0	1	1
(4,8)e(8,4)	0	0	0	0	0	0	0	1	0
(5,6)e(6,5)	1	1	0	0	0	0	0	0	0
(5,7)e(7,5)	0	0	0	0	0	1	0	0	1
(5,8)e(8,5)	0	0	0	0	0	1	0	0	0
(6,7)e(7,6)	1	0	1	0	0	0	0	0	0
(6,8)e(8,6)	1	0	0	1	0	0	0	0	0
(7,8)e(8,7)	0	0	0	0	0	0	0	0	1

TABELA 5.2 (B) - Caminhos mínimos do ex. simulado  
(links 11 a 19)

É necessário ainda, para a definição da matriz  $W_2$ , um conjunto de contagens volumétricas de alguns links da rede. A sistemática para a definição de uma seqüência conveniente é discutida no capítulo seguinte. Para a presente aplicação serão usadas as seqüências listadas na tabela 5.3.

	LINKS						
Seqüência 1	l <sub>8</sub>	,l <sub>12</sub>	,l <sub>15</sub>	,l <sub>9</sub>	,l <sub>16</sub>	,l <sub>3</sub>	,l <sub>5</sub>
	l <sub>4</sub>	,l <sub>13</sub>	,l <sub>14</sub>	,l <sub>17</sub>	,l <sub>18</sub>	,l <sub>19</sub>	,l <sub>1</sub>
	l <sub>2</sub>	,l <sub>6</sub>	,l <sub>7</sub>	,l <sub>10</sub>	,l <sub>11</sub>		
Seqüência 2	l <sub>8</sub>	,l <sub>15</sub>	,l <sub>12</sub>	,l <sub>3</sub>	,l <sub>4</sub>	,l <sub>5</sub>	,l <sub>9</sub>
	l <sub>17</sub>	,l <sub>18</sub>	,l <sub>19</sub>	,l <sub>13</sub>	,l <sub>1</sub>	,l <sub>2</sub>	,l <sub>6</sub>
	l <sub>16</sub>	,l <sub>7</sub>	,l <sub>10</sub>	,l <sub>14</sub>	,l <sub>11</sub>		
Seqüência 2	l <sub>5</sub>	,l <sub>8</sub>	,l <sub>9</sub>	,l <sub>16</sub>	,l <sub>13</sub>	,l <sub>14</sub>	,l <sub>3</sub>
	l <sub>19</sub>	,l <sub>1</sub>	,l <sub>7</sub>	,l <sub>2</sub>	,l <sub>10</sub>	,l <sub>11</sub>	,l <sub>15</sub>
	l <sub>18</sub>	,l <sub>17</sub>	,l <sub>12</sub>	,l <sub>4</sub>	,l <sub>6</sub>		

TABELA 5.3 - Seqüências de links da rede viária.

Para definir-se a matriz W usando a definição 3, necessita-se de um conjunto de cobertura da matriz O-D de viagens. Neste exemplo utilizou-se o algoritmo proposto pela autora (ver Flemming, 1993), implementado em Fortran 77 (programa COB, descrito no anexo I). Para este exemplo analisado o conjunto cobertura fornecido pelo COB é:

$$\{ l_{15}, l_6, l_1, l_7, l_2, l_{11}, l_{12}, l_{10} \}.$$

#### 5.4 - Preparação dos Dados.

Um programa computacional, denotado por SOFT, foi desenvolvido para a preparação dos dados de entrada dos modelos M2 e M3. Este programa está descrito no anexo I.

O programa SOFT foi desenvolvido para preparar os dados de exemplos simulados, mas pode ser adequado também para exemplos reais. O usuário deve inicialmente escolher

qual a definição (1, 2 ou 3) que vai usar para a matriz W.

Os arquivos de entrada são:

- PIJK - contém as proporções de viagens  $p_{ij}^k$ ;
- TIJAUX - contém a matriz observada e
- OISDJS - contém os dados de produção e atração de viagens.

Os dados referentes aos links (número de links e os k dos links) que estão disponíveis são fornecidos via teclado.

Os arquivos de saída são:

- WIJ - contém a matriz de valores máximos W;
- TIJI - contém a matriz  $[W_{ij}/2]$ ;
- M5CV - contém os valores definidos pela fórmula (4.43) do capítulo IV ;
- PIHK - contém as proporções  $p_{ij}^k$  dos links selecionados e
- VR - contém as contagens volumétricas dos links selecionados .

Este programa analisa também se os links fornecidos são atuantes ou não, fornecendo uma listagem dos não atuantes. Os links são atuantes, neste caso, quando contribuem para a formação da matriz W.

### 5.5 - Estatísticas Usadas Para Avaliação do Desempenho dos Modelos M2 e M3.

A avaliação do desempenho de um modelo que estima uma matriz O-D de viagens é feita usando-se várias estatísticas (ver por exemplo Thomas,1977; Smith e Hutchinsin,1981; e Ayeni,1983). Estas estatísticas medem a proximidade da matriz



observada com a matriz estimada. Neste trabalho utilizaram-se as estatísticas: Phi-normalizada e índice de dissimilaridade, descritas a seguir.

### 5.5.1 - Estatística phi-normalizada.

Esta estatística é baseada na Teoria da Informação. É uma medida similar à informação ganha usada por Batty e March (1976) e por Thomas (1977). Sua definição é dada pela fórmula:

$$\phi = \sum_{i,j} (T_{ij}^* / T) |\ln (T_{ij}^* / T_{ij})| \quad (5.1)$$

onde

$[T_{ij}^*]$  = matriz O-D observada;  
 $[T_{ij}]$  = matriz O-D estimada e  
 $T$  = número total de viagens.

Quando as matrizes observadas e estimadas coincidem, o valor de  $\phi$  é zero. Assim quanto menor for o valor de  $\phi$ , tanto melhor será a matriz O-D de viagens estimada.

### 5.5.2 - Índice de dissimilaridade.

Esta estatística tem uma interpretação muito interessante (ver Thomas, 1977). Ela mede a porcentagem de viagens que podem ser realocadas entre os pares (i,j), para que a matriz observada coincida com a matriz estimada. Sua definição é:

$$ID = (50/T) \sum_{i,j} |T_{ij}^* - T_{ij}| \quad (5.2)$$

É fácil de verificar (usando desigualdade triangular) que o valor de ID varia entre 0 e 100. Quanto mais próximo de zero for o valor de ID tanto melhor será a estimativa da matriz.

## 5.6 - Aplicação dos Modelos.

### 5.6.1 - Aplicação do modelo M2.

Para aplicar o modelo M2 utilizou-se um programa computacional, denotado por M2, descrito no anexo I. Este programa resume-se na implementação do algoritmo de calibração proposto na secção 4.4.2. Os dados de entrada são feitos através da leitura dos arquivos WIJ e OISDJS, que contém a matriz W e os dados de produção e atração de viagens respectivamente. O arquivo WIJ é gerado pelo programa SOFT.

No critério de parada utilizou-se o parâmetro  $\epsilon = 0,001$ , que é um indicativo do nível de precisão desejado.

Usando as seqüências 1, 2 ou 3 propostas na tabela 5.3 formaram-se os conjuntos de links constituídos com 1, 2, 3, ..., 19 links. Por exemplo, usando a seqüência 1, tem-se  $\{l_8\}$ ,  $\{l_8, l_{12}\}$ , etc.. Estes conjuntos de links foram então considerados como disponíveis, em cada aplicação do modelo M2, quando a matriz de valores máximos W escolhida é a W2.

As matrizes O-D estimadas foram avaliadas através das medidas  $\phi$  e ID, definidas na secção 5.5.

Alguns resultados estão listados na tabela 5.4. Nesta tabela a coluna "Observações" apresenta algumas observações pertinentes, tais como o menor e o maior valor de  $\phi$  e ID dentre os resultados obtidos usando-se a seqüência 1, 2, ou 3. O menor valor obtido corresponde à melhor estimativa e o maior valor corresponde à pior estimativa.

Quando a matriz W é definida usando-se a definição 1, isto é,  $W = W1$ , tem-se uma estimativa cujos valores das estatísticas são:

$$\phi = 0,381177 \text{ e } ID = 19,6689.$$

Quando a matriz  $W$  é definida usando-se um conjunto de cobertura, isto é,  $W = W_3$ , para este exemplo obtém-se:  
 $\phi = 0,383545$  e  $ID = 19,9736$ .

Seqüên- cia	N. de Links	Links $l_k$ $k=$	N. de iterações	$\phi$	ID	OBS.
1	3	8,12,15	130	0.401314	20.3717	-
1	4	8,12,15,9	128	0.376584	18.4519	menor $\phi$ e ID
1	9	8,12,15,9 16,3,5,4, 13	125	0.431232	20.4100	maior $\phi$
1	10	8,12,15,9, 16,3,5,4,... 13,14	121	0.426203	20.7830	maior ID
1,2 ou3	19	Todos os links	102	0.413770	20.4980	-
2	4	8,15,12,3	142	0.418180	21.0641	maior ID
2	8	8,15,12,3 4,5,9, 17	116	0.365465	18.1772	menor $\phi$ e ID
2	17	8,15,12,3 4,5,9,17,7 18,19,13,1	113	0.424224	20.3905	maior $\phi$
3	3	5, 8, 9	129	0.379430	18.5709	menor $\phi$ e ID
3	5	5,8,9,16, 13	137	0.437596	20.4179	maior $\phi$
3	17	5,8,9,16,1 13,14,3,19 2,10,11,12 15,18,17,7	106	0.431063	21.1604	maior ID

TABELA 5.4 - Valores de  $\phi$  e ID de alguns conjuntos de links aplicados no modelo M2.

A figura 5.2 mostra o gráfico que relaciona os fluxos estimados com os fluxos observados, quando utilizou-se  $W = W2$  definida com os links  $l_8, l_{15}, l_{12}, l_3, l_4, l_5, l_9, l_{17}$ .

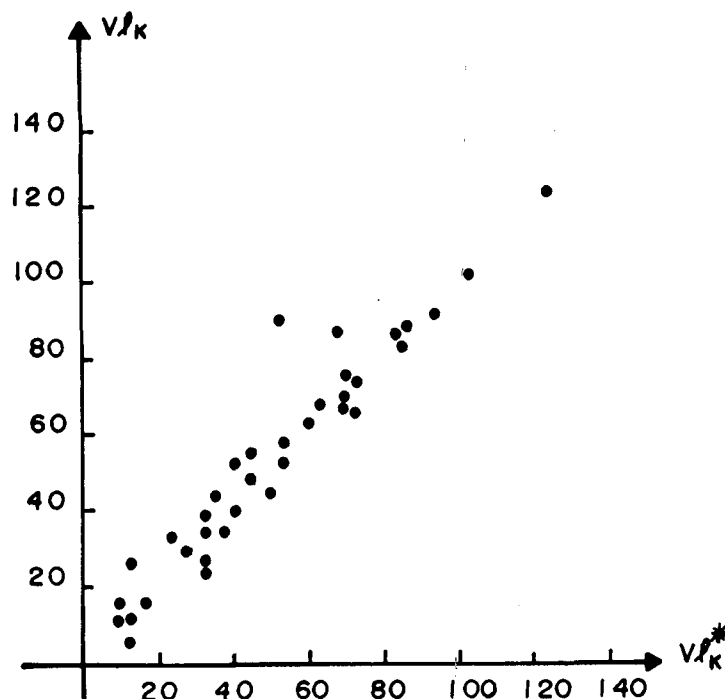


FIGURA 5.2 - Fluxos estimados versus fluxos observados usando o modelo M2 e 8 links.

### 5.6.2 - Links não atuantes para o M2.

Na secção 3.7 estabeleceu-se que um link é atuante quando ele contribui para a calibração de um modelo ou para a estimativa de uma matriz O-D de viagens. Para o caso deste modelo analisado (M2), um link é atuante quando ele pode contribuir para a formação da matriz  $W$  de valores máximos.

O programa SOFT, que prepara os dados dos exemplos simulados, lista os links não atuantes e os links dependentes que passam a ser não atuantes.

Quando se tem as contagens volumétricas de todos os links da rede, os links não atuantes são facilmente identificáveis. No entanto pode-se identificar "possíveis"

links não atuantes através de uma fórmula prática, obtida empiricamente, observando-se vários exemplos simulados.

Toma-se como referência uma média denotada por  $\overline{NO/D}$ , definida por

$$\overline{NO/D} = \frac{\sum_{l_k} NO/D_{l_k}}{n} \quad (5.3)$$

onde

$NO/D_{l_k}$  = número de pares O-D associados ao link  $l_k$ .  
 $n$  = número total de links.

Se  $NO/D_{l_k} > \overline{NO/D}$  então o link  $l_k$  é um "possível" link não atuante.

Quando  $W = W2$ , pode-se fazer essa análise com todos os links da rede viária. Quando  $W = W3$  pode-se fazer essa análise com os links da rede viária exceto com os links que formam o menor conjunto de cobertura.

### 5.6.3 - Algumas observações sobre o modelo M2.

O modelo desenvolvido mostrou-se adequado, pois é um modelo simples, operacional e utiliza poucos dados. As contagens volumétricas, que são usadas opcionalmente, podem ser obtidas com poucos recursos.

Os valores encontrados nas estatísticas  $\phi$  e ID são considerados bons (ver por exemplo Thomas, 1977). Esses resultados podem ser melhorados se o valor do parâmetro  $\epsilon$ , for menor que o usado ( $\epsilon = 0,001$ ).

A introdução de informações relativas às contagens volumétricas através da função objetivo foi adequada. O modelo absorve bem estas informações. De fato os volumes de tráfego estimados são muito próximos dos volumes observados (ver figura 5.2).

O modelo M2 mostra a operacionalidade e a consistência de se utilizar uma função entrópica condicional  $[H(Y/X)]$ , ao invés de usar a função entrópica de Shannon  $[H(x)]$ . Isto evidentemente cria possibilidades de novos modelos serem estruturados, com outros dados nas restrições.

Quando as contagens volumétricas são usadas observa-se que este modelo apresenta uma redução no número de iterações, a medida em que aumenta-se o número de links contadores. No entanto o aumento do número de links contadores não implica numa melhor estimativa. Isto ocorre devido a presença dos links não atuantes e devido ao fato de que o modelo não produz uma estimativa consistente com as contagens volumétricas. Portanto, uma sistematização para a escolha do conjunto de links é muito importante. Este trabalho apresenta no capítulo seguinte um método que incorpora uma sistemática adequada.

#### 5.6.4 - Aplicação do modelo M3.

Para aplicar o modelo M3 utilizou-se um programa computacional, denotado por M3, descrito no anexo I. Este programa consiste da implementação do algoritmo descrito na secção 4.5.2. Os dados de entrada estão nos arquivos:

PIHK, TIJI, M5CV, WIJ .

Estes arquivos são os arquivos de saída do programa SOFT.

No critério de parada utiliza-se um valor  $\delta$ , geralmente entre 2 e 5 (ver secção 4.5.2 item (h)). Neste exemplo utilizou-se  $\delta = 2$ .

Vários conjuntos de links foram estruturados de maneira análoga aos usados na aplicação do M2.

Observa-se que o conjunto de links usado na definição da matriz  $W$ , foi também usado para as restrições.

As tabelas 5.5 (A), (B) e (C) mostram alguns dos resultados obtidos.

A figura 5.3 mostra o gráfico que relaciona os volumes de tráfego estimados com os volumes de tráfego observados, quando utilizou-se  $W = W2$  e as contagens volumétricas dos links:

{  $l_8, l_{12}, l_{15}, l_9, l_{16}, l_3, l_5, l_4, l_{13}, l_{14}, l_{17}, l_{18}, l_{19}, l_1, l_2$  }

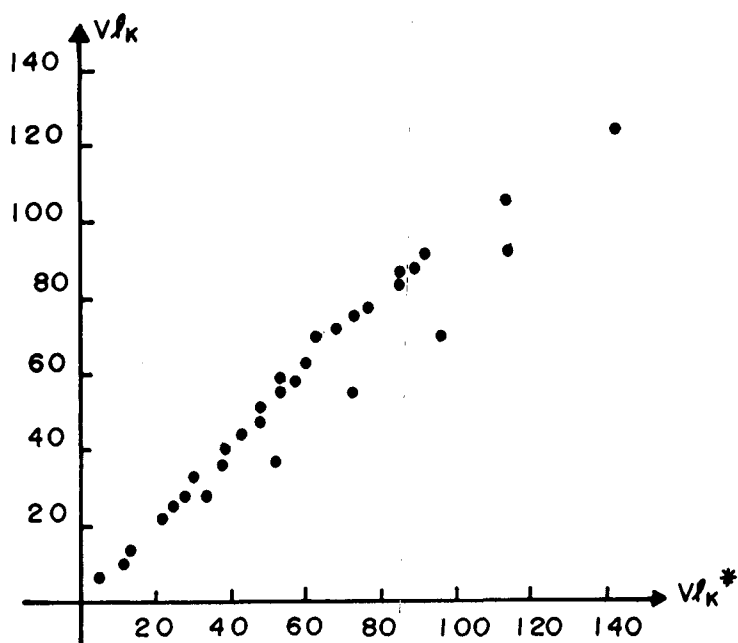


FIGURA 5.3 - Volumes estimados versus volumes observados do modelo M3

Seq.	n.links	LINKS	ITE	$\phi$	ID
1	1	8	1	0.854926	84.5375
	3	8,12,15	4	0.775759	64.4979
	5	8,12,15,9,16	4	0.744780	59.4015
	8	8,12,15,9,16,3, 5,4	4	0.672674	46.3339
	10	8,12,15,9,16,3 5,4,13,14	3	0.712185	42.4956
	15	8,12,15,9,16,3 5,4,13,14,17,18 9,1,2	6	0.568742	31.8188
	19	TODOS	4	0.601911	29.3085
2	1	8	1	0.854926	84.5275
	3	8,15,12	4	0.775759	64.4979
	5	8,15,12,3,4	3	0.758542	51.7740
	8	8,15,12,3,4,5, 9,17	4	0.664763	49.2819
	10	8,15,12,3,4,5, 9,17,18,19	4	0.745743	42.7978
	15	8,15,12,3,4,5,9 17,18,19,13,1,2 6,16	6	0.643718	32.0182
	19	TODOS	4	0.601911	29.3085
3	1	5	1	0.900611	90.0952
	3	5,8,9	3	0.776069	72.3526
	5	5,8,9,16,13	3	0.794137	64.9786
	8	5,8,9,16,13,14 3,19	4	0.656617	51.2478
	10	5,8,9,16,13,14, 3,19,1,7	4	0.586439	42.1643
	15	5,8,9,16,13,14 3,19,1,7,2,10,11 15,18	7	0.610547	31.4419
	19	TODOS	4	0.601911	29.3085

TABELA 5.5 (A) - Resultados obtidos do modelo M3 usando  $W=W1$ .



Seq.	n.links	LINKS	ITE	$\phi$	ID
1	1	8	1	0.863074	84.9467
	3	8,12,15	4	0.779174	64.7487
	5	8,12,15,9,16	5	0.709870	58.8056
	8	8,12,15,9,16,3, 5,4	4	0.680502	44.8470
	10	8,12,15,9,16,3 5,4,13,14	5	0.591369	39.0462
	15	8,12,15,9,16,3 5,4,13,14,17,18 9,1,2	7	0.563506	31.3143
	19	TODOS	4	0.516537	28.0692
2	1	8	1	0.863074	84.9467
	3	8,15,12	4	0.766418	64.2026
	5	8,15,12,3,4	2	0.680092	49.8631
	8	8,15,12,3,4,5, 9,17	3	0.659166	48.8196
	10	8,15,12,3,4,5, 9,17,18,19	3	0.665597	40.8187
	15	8,15,12,3,4,5,9 17,18,19,13,1,2 6,16	6	0.664455	32.7911
	19	TODOS	4	0.516537	28.0692
3	1	5	1	0.900611	90.0952
	3	5,8,9	3	0.756802	71.6572
	5	5,8,9,16,13	3	0.700839	62.6935
	8	5,8,9,16,13,14 3,19	3	0.618844	49.7371
	10	5,8,9,16,13,14, 3,19,1,7	4	0.542401	40.7628
	15	5,8,9,16,13,14 3,19,1,7,2,10,11 15,18	7	0.590817	31.4384
	19	TODOS	4	0.516537	28.0692

TABELA 5.5 (B) - Resultados obtidos do modelo M3 usando  $W=W2$ .

seq.	N. links	LINKS	ITE	$\Phi$	ID
COB	8	15,6,1,7,2,11, 12,10	4	0.814039	43.0994
	10	15,6,1,7,2,11, 12,10,8,9	5	0.838950	40.9161
	15	15,6,1,7,2,11, 12,10,8,9,16,3, 5,4,13	4	0.688170	34.8078
	19	TODOS	4	0.601911	29.3085

TABELA 5.5 (C) - Resultados obtidos do modelo M3 usando  $W = W3$ .

#### 5.6.5 - Links atuantes para o M3.

Para este modelo as contagens volumétricas de alguns links da rede viária são usadas opcionalmente na função objetivo e obrigatoriamente nas restrições. Assim um link não dependente é sempre um link atuante.

O grau de informação contido em cada link é variável. Isto pode ser constatado observando-se vários exemplos. A tabela 5.6 ilustra alguns casos.

N. links	LINKS	ITE	$\Phi$	ID
1	8	1	0.854926	84.5275
1	12	1	0.789896	79.7475
1	15	1	0.755615	72.4364
1	17	1	0.804526	81.1429
1	1	1	0.826914	76.0876
1	2	1	0.754479	73.4530
1	5	1	0.900611	90.0952

TABELA 5.6 - Resultados obtidos com o M3 usando somente 1 link, com  $W = W2$ .

Várias variáveis influenciam a quantidade de informação contida nos links (ver secção 3.7 ), por exemplo o número de pares associados a cada link e a localização do link na rede viária. Essas variáveis estão também relacionadas entre si. Isto dificulta o estabelecimento de uma medida para a quantidade de informação contida no link. No capítulo seguinte utiliza-se uma medida da Teoria da Informação, que reproduz de forma conveniente, não otimizada, esta quantidade de informação.

#### 5.6.6 - Comparação do modelo M3 com o modelo M1.

O modelo M3 foi comparado com o modelo de Willumsen (denotado por M1). Esta comparação pode ser feita considerando-se que ambos têm como função objetivo uma função entrópica e as estimativas geradas são consistentes com as contagens volumétricas de alguns links da rede.

O modelo M1 foi implementado em fortran 77 (programa M1, descrito no anexo I), usando-se o algoritmo descrito pelo autor (ver Willumsen, 1981a) com a matriz "a priori"  $[t_{ij}]$  definida com  $t_{ij} = 1$  para  $i \neq j$ .

A tabela 5.7 mostra alguns resultados comparativos.

Observa-se, portanto, para este exemplo, uma diferença muito pequena entre os resultados apresentados. No caso da medida  $\phi$ , a diferença em média foi de 0,031 e no caso da medida ID a diferença foi de 6,4. Considerando a interpretação percentual de ID, pode-se dizer que o M1 apresenta, neste exemplo, em média, estimativas em torno de 6 % melhores que as estimativas do modelo M3. Esta é uma diferença bem pequena, neste contexto.

N. links	LINKS K =	M1		M3	
		$\phi$	ID	$\phi$	ID
8	15,6,1,7,2,11,12 10	0.771723	28.8163	0.814039	43.0994
11	15,6,1,7,2,11,12 10,8,9,16	0.675155	26.6570	0.683718	35.1764
14	15,6,1,7,2,11,12 10,8,9,16,3,5,4	0.642715	25.5282	0.646311	34.2418
15	15,6,1,7,2,11,12 10,8,9,16,3,5, 4,13	0.639488	25.4608	0.688170	34.8078
16	15,6,1,7,2,11,12 10,8,9,16,3,5, 4,13,14	0.637888	25.4183	0.678480	34.7159
17	15,6,1,7,2,11,12 10,8,9,16,3,5, 4,13,14,17	0.639564	25.4861	0.588969	32.9240
18	15,6,1,7,2,11,12 10,8,9,16,3,5, 4,13,14,17,18	0.597547	23.8004	0.593608	32.6964
19	TODOS	0.597724	23.7874	0.580305	32.1824

TABELA 5.7 - Dados da aplicação do modelo M1 e M3 usando só contagens volumétricas.

Sabe-se que ambos os modelos podem ter suas estimativas melhoradas quando incorporam outras informações. No caso do M1 quando utiliza-se uma matriz "a priori" e no caso do M3 quando utiliza-se  $W = W2$ .

No anexo II, apresentam-se 33 tabelas. Estas tabelas mostram resultados das estatísticas phi-normalizada ( $\phi$ ) e índice de dissimilaridade (ID), para cinco diferentes exemplos, envolvendo um total de 143 seqüências de links. Nessas tabelas o modelo de Willumsen foi denotado por M1 quando não se dispõe de uma matriz "a priori" ( $[t_{ij}] = 1$  para  $i \neq j$ ) e denotado por M12 quando se dispõe de uma matriz "a priori". Observa-se pequenas diferenças entre os valores das estatísticas  $\phi$  e ID, quando compara-se M3 com M12. No caso do exemplo 3 (ver tabelas A1.3, A2.3, A3.3 e A4.3), verifica-se

que o modelo M3 apresenta sistematicamente melhores estimativas. Portanto, o modelo M3 é um bom modelo tendo em vista que ele produz estimativas próximas das estimativas produzidas pelo modelo M1, que já é um modelo consagrado.

Na secção seguinte apresentam-se outras observações referentes ao modelo M3.

#### 5.6.7 - Outras observações sobre o modelo M3.

Diante dos resultados listados neste capítulo e diante de outros resultados com outros exemplos pode-se concluir que:

1) A inclusão de novas contagens volumétricas, de links atuantes, como dados de entrada do modelo, melhora a estimativa da matriz. Isto pode ser visualizado, por exemplo na figura 5.4, que mostra o percentual de links usados versus a estatística phi-normalizada. Este resultado já era um resultado esperado considerando-se a estrutura do modelo.

2) Usando-se uma "boa" seqüência de links (uma seqüência é "boa" quando a cada link incluído obtém-se melhorias na estimativa), verifica-se que, com 50% dos links, já obtém-se boas estimativas (observar figura 5.4).

3) Para uma situação real, deve-se sempre analisar a consistência dos dados de entrada, pois em caso contrário, o procedimento proposto na secção 4.5.2, pode não convergir.

4) O modelo M3 assim como o M2 mostram a operacionalidade e a consistência da utilização da entropia condicional como função objetivo.

5) O modelo M3 mostra que operacionalmente é possível e interessante utilizar-se alguns dados disponíveis (não

necessariamente todos) de produção e atração de viagens juntamente com as contagens volumétricas de alguns links da rede viária. Isto torna-o atraente para ser aplicado em regiões onde não se dispõe de recursos para a coleta de dados.

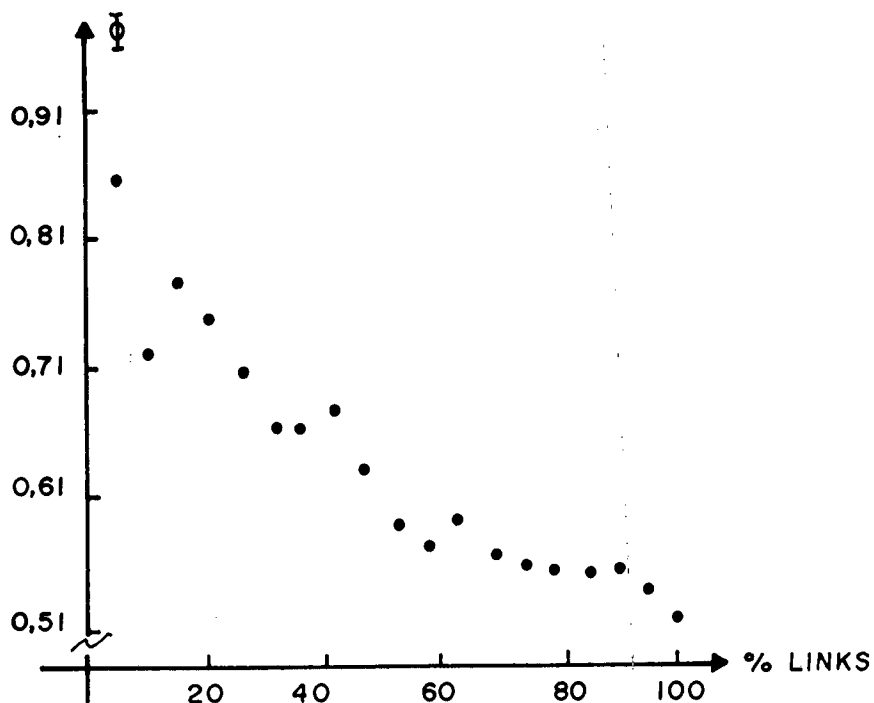


FIGURA 5.4 - % de links usados versus estatística  $\phi$  usando o modelo M3.

## 5.7 - Alguns testes realizados com a matriz de valores máximos.

### 5.7.1 - Valores assumidos pela matriz W.

Nos modelos M2 e M3 utiliza-se como dado de entrada, para estruturar a função objetivo, uma matriz O-D de valores máximos, denotada por W. Esta matriz pode ser definida de

três maneiras distintas (ver 4.2). É sempre interessante usar:

1)  $W = W_1$ , quando o modelo M2 é usado e não se dispõe de contagens volumétricas.

2)  $W = W_2$ , quando o modelo M2 é usado e se dispõe das contagens volumétricas de alguns links da rede viária.

3)  $W = W_2$ , quando o modelo M3 é usado e se dispõe dos dados de produção e atração de viagens.

4)  $W = W_3$ , quando o modelo M3 é usado e não se dispõe dos dados de produção e atração de viagens.

Essas conclusões são tiradas levando-se em conta as definições 1,2 e 3 da secção 4.2.1 e os resultados obtidos com a aplicação dessas matrizes.

A matriz  $W = W_2$  é uma matriz mais próxima da matriz observada. Por exemplo, medindo a proximidade dessas matrizes com a matriz observada, para a rede exemplificada neste capítulo obtém-se:

$$\begin{array}{ll} \phi_{W_1} = 1,62129 & ID_{W_1} = 239,014 \\ \phi_{W_2} = 1,27295 & ID_{W_2} = 162,716 \\ \phi_{W_3} = 1,30525 & ID_{W_3} = 177,595 \end{array}$$

onde  $\phi_{W_1}$ ,  $\phi_{W_2}$  e  $\phi_{W_3}$  representam a estatística phi-normalizada de comparação das matrizes  $W_1$ ,  $W_2$  e  $W_3$  respectivamente, com a matriz observada e  $ID_{W_1}$ ,  $ID_{W_2}$ ,  $ID_{W_3}$  a estatística índice de dissimilaridade.

### 5.7.2 - A Matriz W como uma matriz "a priori".

Pode-se usar a matriz W para definir uma matriz "a priori". Realizou-se alguns testes com o modelo de Willumsen,

que usa uma matriz "a priori"  $[t_{ij}]$ . Neste modelo quando não se dispõe dessa matriz utiliza-se uma matriz com valores unitários para os  $i \neq j$ . Verificou-se através de exemplos que a matriz  $W$  de valores máximos pode ser usada, neste modelo, para configurar uma matriz "a priori", produzindo boas estimativas.

As tabelas do Anexo II, mostram vários exemplos. Nessas tabelas usou-se a notação  $M1$ , para o modelo de Willumsen com matriz "a priori" unitária e  $M12$  com uma matriz "a priori" definida a partir de uma matriz de valores máximos.

A tabela 5.8 mostra a estatística  $\phi$  de avaliação das estimativas obtidas, para o exemplo usado neste capítulo.

N. Links	LINKS	$[t_{ij}] = W1/2$	$[t_{ij}] = W2/2$	$[t_{ij}] = W3/2$	$[t_{ij}] = U$
8	15,6,1,7,2,11, 12,10	0.439468	0.446068	0.555585	0.771723
10	15,6,1,7,2,11, 12,10, ,9	0.441477	0.462222	0.559965	0.691951
12	15,6,1,7,2,11, 12,10,8 9,16,3	0.410151	0.416118	0.487507	0.642733
16	15,6,1,7,2,11, 12,10,8,9,16,3 5,4,13,14	0.401962	0.431187	0.492948	0.637888
19	TODOS	0.398165	0.422119	0.468724	0.597724

TABELA 5.8 - resultados da aplicação do modelo  $M1$  com diversas matrizes "a priori" ( $U$  é a matriz com valores unitários para  $i \neq j$ ).

Portanto a matriz  $W$  pode também ser usada para definir uma matriz "a priori". Observa-se que a utilização de  $[t_{ij}] = W1/2$ , produziu as melhores estimativas neste caso. Este já era um resultado esperado, pois para este modelo, a matriz  $W = W1$  é a que tem novas informações, isto é, informações sobre produção e atração de viagens.



## 5.8 - Considerações Finais.

Os testes apresentados neste capítulo, mostraram a operacionalidade e consistência dos modelos M2 e M3.

As estatísticas phi-normalizada e índice de dissimilaridade, definidas nas secções 5.5.1 e 5.5.2 respectivamente, foram usadas para avaliar a precisão das estimativas obtidas pelos modelos M1, M2 e M3. Com os valores de  $\phi$  e ID obtidos, estruturaram-se as tabelas 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8 deste capítulo e as 33 tabelas do anexo II.

As observações e comparações realizadas mostraram que esses modelos produzem bons resultados. Portanto, são modelos que podem ser usados para situações reais.

A inexistência de dados reais de origem-destino e de contagens volumétricas impossibilitou a realização da validação desses modelos.

Quanto a matriz W de valores máximos, definida no capítulo anterior e avaliada neste capítulo, verificou-se que a sua utilização para definir uma matriz "a priori" é viável. Os testes realizados com o modelo de Willumsen mostraram também que a sua utilização é interessante, pois as estimativas obtidas são mais precisas.

## CAPÍTULO VI

### UM NOVO MÉTODO DE ALOCAÇÃO DE CONTADORES VOLUMÉTRICOS DE TRÁFEGO

#### 6.1 - Introdução.

Este capítulo apresenta um método de alocação de contadores volumétricos de tráfego numa rede rodoviária, com o propósito de levantar informações de fluxos para estimar uma matriz O-D , numa área em estudo.

A necessidade de um método flexível, para atender os diversos modelos usados para estimar uma matriz O-D, foi salientada no capítulo II.

O método apresentado neste capítulo, é um método heurístico, pois apresenta uma sistemática no seu desenvolvimento, que apesar de não ter a preocupação de atingir soluções teóricas exatas, é capaz de levar a soluções práticas satisfatórias. As etapas deste método foram estruturadas, de modo a introduzir uma sistemática, que produza bons resultados, isto é, a seqüência de links definida produz um conjunto de contagens volumétricas que contém uma maior informação para a estimativa da matriz O-D.

A concepção deste método foi baseada em algumas premissas, citadas na secção seguinte, e em vários exemplos simulados (em torno de 25 redes ). Cinco exemplos

representativos foram selecionados, para ilustrar as diversas etapas do método.

## 6.2 - Desenvolvimento do Novo Método.

Considerou-se inicialmente que :

(1) O número de contadores volumétricos de tráfego é definido a "priori" (p.ex. em função de custos disponíveis para a instalação e implantação), admitindo-se, no entanto, que o mesmo seja redefinido.

(2) Caso haja alguns contadores instalados na rede, deve-se procurar enquadrá-los na alocação, sempre que possível.

(3) Dentre as aplicações das contagens volumétricas, uma das mais importantes é a sua utilização para estimar matrizes O-D de viagens. Portanto, o método deve ser flexível, para que possa atender à necessidade de calibração dos modelos matemáticos que fazem estas estimativas.

(4) Não se pretende estabelecer "privilégios", em relação aos links. Portanto, o uso da aleatoriedade em alguns momentos , é bastante útil.

Diante dessas considerações e em função da análise dos resultados de vários exemplos simulados, as seguintes etapas foram estruturadas, para a concepção do método de alocação:

- (1) Definição da área de estudo.
- (2) Zoneamento da área de estudo e caracterização da rede viária.
  - (2.1) Definição do número de contadores.
- (3) Classificação dos links.

(4) Setorização

(4.1) definição da setorização;

(4.2) distribuição setorial e

(4.3) classificação dos links por setores.

(5) Escolha dos links para alocação dos contadores.

A seguir algumas considerações são tecidas sobre cada uma das etapas resumidas acima.

### 6.2.1 - Definição da área de estudo.

Considerando que o método de alocação de contadores volumétricos de tráfego tem como objetivo maior um aumento de eficiência da coleta de informações de fluxos com vistas a estimativa de matrizes O-D de viagens, a área de estudo a ser definida será aquela que compreende a maior parte das viagens a serem explicadas. Naturalmente, os critérios de delimitação desta área deverão ser os mesmos adotados nos processos convencionais de planejamento de transportes ( ver p.ex. Hutchinson, 1974) . No contexto deste trabalho, a correta identificação e caracterização da rede viária na área de estudo apresenta-se como uma etapa de particular importância.

### 6.2.2 - Zoneamento da área de estudo e caracterização da rede viária.

Na área de estudo, faz-se um zoneamento e definem-se os centróides de maneira usual, isto é, divide-se a área em "N" zonas de tráfego, com a finalidade de melhor identificar os pontos de origem e destino das viagens.

A rede rodoviária da área de estudo será representada através de um grafo simplificado. Cada link deste grafo representa uma rodovia federal, estadual ou municipal. Cada

nó deste grafo representa um ponto gerador ou receptor de tráfego.

As figuras 6.1 a 6.5 mostram os grafos simplificados das redes simuladas que servirão de exemplos neste capítulo.

Nota-se que nos exemplos 1 e 4 (ver figs. 6.1 e 6.4) todos os nós são centróides.

Os nós centróides são numerados de 1 a  $N$ , visto que a área em estudo é dividida em  $N$  zonas de tráfego.

As rodovias da rede podem ter várias faixas de tráfego. Sem perda de generalidade, serão consideradas uma ou duas faixas, conforme o sentido do tráfego. Cada faixa de tráfego será representada por uma ligação direcionada do grafo. Usa-se a notação  $l_k$  ( $k=1,2,\dots,L$ ) para denotar os  $L$  links da rede rodoviária. Caso a rodovia que o link representa, apresente duas faixas de tráfego, diz-se que o link terá dois CANAIS. Assim a notação  $l_{k1}$  representa o canal 1 do link  $l_k$  e  $l_{k2}$  representa o canal 2 do link  $l_k$ . Na figura 6.2 todos os links têm dois canais. Nas figuras 6.3 e 6.4 todos os links têm somente um canal e nas figuras 6.1 e 6.5, alguns links apresentam um canal e outros dois canais.

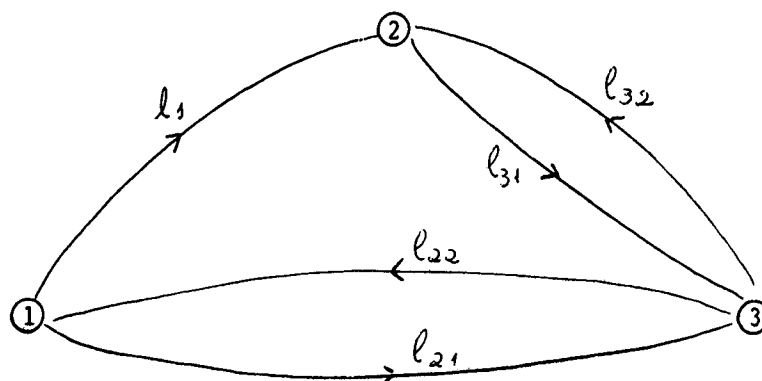


FIGURA 6.1 - Grafo simplificado da rede do exemplo 1.

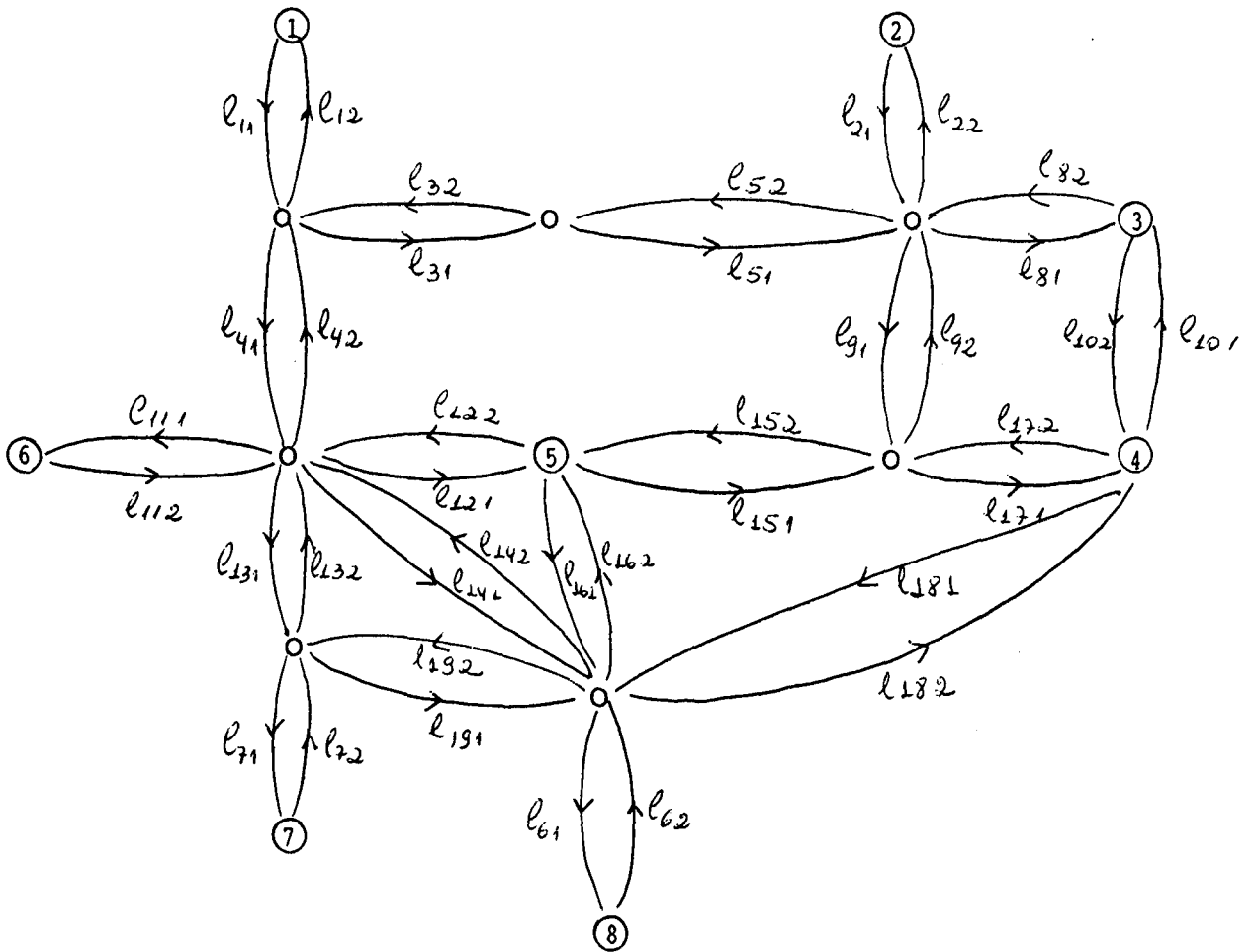


FIGURA 6.2 - Grafo simplificado da rede do ex. 2.

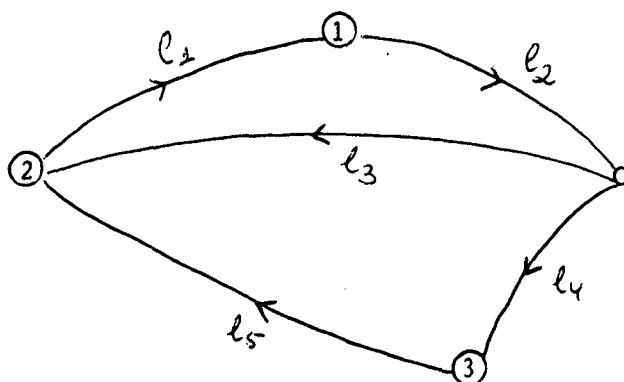


FIGURA 6.3 - Grafo simplificado do ex. 3.

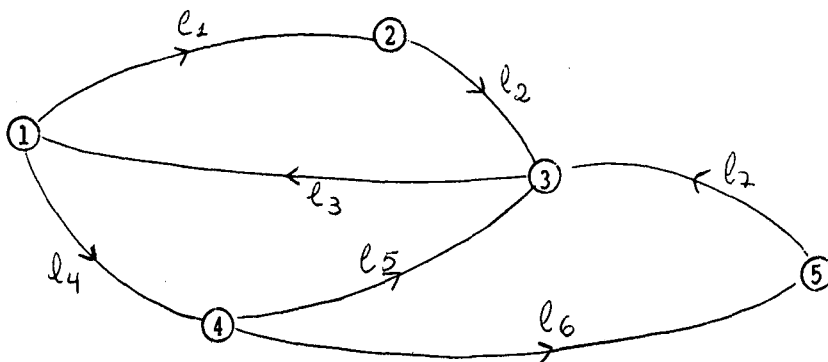


FIGURA 6.4 - Grafo simplificado do ex. 4.

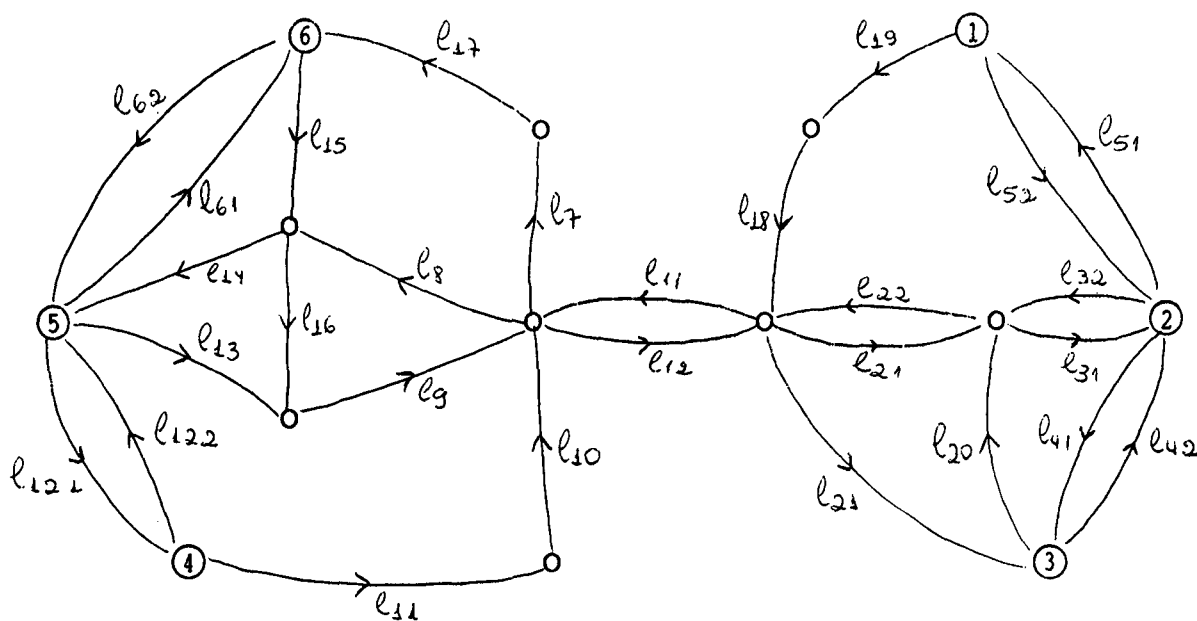


FIGURA 6.5 - Grafo simplificado do ex. 5.

### 6.2.3 - Definição do número de contadores.

Após a caracterização da rede, deve-se definir o número de contadores volumétricos de tráfego que devem ser

alocados, pois esta é uma informação "a priori" prevista. Este número pode ser definido em função de recursos disponíveis para a instalação e implantação de um sistema.

Pode-se também definir este número em função do modelo que vai ser usado para estimar a matriz O-D de viagens. Por exemplo, no caso de modelos do tipo do modelo M1 ou M3, uma boa escolha inicial parece estar em torno de 50 % dos links da rede (ver figura 5.4).

Salienta-se que é muito importante o conhecimento da estrutura do modelo que vai ser usado para obter-se as estimativas, pois algumas decisões são tomadas (por exemplo a definição do número de contadores) em função de tal estrutura.

Pode-se, no decorrer do processo, redefinir o número de contadores. Isto ocorrerá quando os critérios de desempates não são suficientes para a definição final da alocação dos contadores (ver secção 6.2.7).

#### **6.2.4 - Classificação dos links.**

Para cada link de uma rede viária, pode-se escrever a equação fundamental correspondente (ver secção 2.1). Analisando-se os pares O-D que aparecem na equação fundamental, define-se um número, denotado por NO/D. Este número representa o número de pares O-D associado a cada link da rede.

Suponha que um link da rede é selecionado aleatoriamente e que seja registrado o número de pares O-D (NO/D) que aparecem na equação fundamental de seus canais. Considerando-se um ponto amostral "s", como sendo um canal de um link, pode-se definir uma variável aleatória X (ver secção 3.2.1), que associa a cada ponto amostral "s", o número de pares O-D associados ao respectivo canal do link. O domínio



desta variável aleatória é o espaço amostral e o conjunto imagem é um conjunto de números naturais maiores ou iguais a 1 e menores ou iguais a  $N^2 - N$ .

Calcula-se a probabilidade de  $X$  ser igual a " $x$ ", denotada por  $P_x[X = x]$ , ou seja, a probabilidade de escolhido um link, este ter  $x$  pares O-D na sua equação fundamental, onde  $x$  pertence ao conjunto imagem da variável aleatória  $X$ . Obtém-se, então, uma distribuição de probabilidades  $P$  para a variável aleatória  $X$  (ver secção 3.2.2).

A partir daí, calcula-se a informação seletiva ou individual para cada link, denotada por

$$h(p) = - \ln p, \quad p \in (0,1] \quad (6.1)$$

(ver secção 3.3). Os links que tiverem maior informação seletiva serão os primeiros classificados. No caso de links com dois canais, pode ocorrer que a informação seletiva desses canais seja diferente. Neste caso, para efeitos de ordenação usa-se a média das informações seletivas. Pode-se também fazer a classificação por canais. Dependendo da estrutura do modelo, isto pode ser mais interessante.

Observa-se que é necessário, neste processo, conhecer os valores dos  $p_{ij}^k$ , ou seja, deve-se ter uma alocação de tráfego definida. Nos exemplos dados será sempre usada uma alocação tudo ou nada (i.e.  $p_{ij}^k = 1$  se " $k$ " encontra-se no caminho mínimo entre " $i$ " e " $j$ " e  $p_{ij}^k = 0$  em caso contrário).

As tabelas 6.1.1 a 6.1.5 são fornecidas pelo programa NOTIJ (ver descrição no anexo I). Este programa analisa os caminhos mínimos entre os pares  $(i,j)$  com  $i \neq j$  e determina o número de pares O-D associados a cada link da rede (NO/D).

Para facilitar as implementações computacionais cada link e seus respectivos canais têm um número associado, denotado por NC. Por exemplo na tabela 6.1.1, o link  $l_1$  está

associado ao número  $NC=1$ ; o canal 1 do link  $l_2$  ( $l_{21}$ ) está associado ao número  $NC=3$ , etc.

Usando os dados das tabelas 6.1.1 a 6.1.5 obtém-se as variáveis aleatórias ( $X_e$ ,  $e = 1, \dots, 5$ ) e suas distribuições de probabilidades ( $P(X_e)$ ,  $e = 1, \dots, 5$ ), referentes respectivamente aos exemplos 1 a 5:

$$X_1 = \{ 1, 2 \} ;$$

$$P(X_1) = \{ 3/5, 2/5 \} .$$

$$X_2 = \{ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 \} ;$$

$$P(X_2) = \{ 8/38, 4/38, 2/38, 8/38, 2/38, 12/38, 2/38 \} .$$

$$X_3 = \{ 1, 2, 3 \} ;$$

$$P(X_3) = \{ 1/5, 2/5, 2/5 \} .$$

$$X_4 = \{ 1, 6, 7 \} ;$$

$$P(X_4) = \{ 1/7, 4/7, 2/7 \} .$$

$$X_5 = \{ 2, 3, 5, 6, 9 \} ;$$

$$P(X_5) = \{ 6/28, 12/28, 2/28, 6/28, 2/28 \} .$$

Por exemplo:

$X_1 = \{ 1, 2 \}$  representa o conjunto imagem da variável aleatória do exemplo 1, pois os links da rede do exemplo 1 apresentam 1 ou 2 pares O-D associados a eles.

$P(X_1) = \{ 3/5, 2/5 \}$  representa a distribuição de probabilidades da variável aleatória  $X_1$ , pois a probabilidade de escolhido aleatoriamente um link, da rede do exemplo 1, este ter 1 par O-D associado a ele é igual a  $3/5$ , e a probabilidade de ter 2 pares O-D associados é igual a  $2/5$ .

LINK	NC	NO/D	LINK	NC	NO/D
1	1	1	1	5	2
1 <sup>1</sup>	3	1	1 <sup>3 1</sup>	4	1
1 <sup>2 1</sup>	2	2	1 <sup>3 2</sup>		
1 <sub>2 2</sub>					

TABELA 6.1.1 - n.º computacional (NC) e N.º de pares O-D (NO/D) associados a cada link do exemplo 1.

LINK	NC	NO/D	LINK	NC	NO/D	LINK	NC	NO/D
1 <sub>1 1</sub>	1	7	1 <sub>7 2</sub>	26	7	1 <sub>1 4 1</sub>	14	2
1 <sub>1 2</sub>	20	7	1 <sub>8 1</sub>	8	4	1 <sub>1 4 2</sub>	33	2
1 <sub>2 1</sub>	2	7	1 <sub>8 2</sub>	27	4	1 <sub>1 5 1</sub>	15	8
1 <sub>2 2</sub>	21	7	1 <sub>9 1</sub>	9	3	1 <sub>1 5 2</sub>	34	8
1 <sub>3 1</sub>	3	2	1 <sub>9 2</sub>	28	3	1 <sub>1 6 1</sub>	16	3
1 <sub>3 2</sub>	22	2	1 <sub>1 0 1</sub>	10	7	1 <sub>1 6 2</sub>	35	3
1 <sub>4 1</sub>	4	5	1 <sub>1 0 2</sub>	29	7	1 <sub>1 7 1</sub>	17	5
1 <sub>4 2</sub>	23	5	1 <sub>1 1 1</sub>	11	7	1 <sub>1 7 2</sub>	36	5
1 <sub>5 1</sub>	5	2	1 <sub>1 1 2</sub>	30	7	1 <sub>1 8 1</sub>	18	5
1 <sub>5 2</sub>	24	2	1 <sub>1 2 1</sub>	12	6	1 <sub>1 8 2</sub>	37	5
1 <sub>6 1</sub>	6	7	1 <sub>1 2 2</sub>	31	6	1 <sub>1 9 1</sub>	19	5
1 <sub>6 2</sub>	25	7	1 <sub>1 3 1</sub>	13	2	1 <sub>1 9 2</sub>	38	5
1 <sub>7 1</sub>	7	7	1 <sub>1 3 2</sub>	32	2			

TABELA 6.1.2 - n.º computacional (NC) e n.º de pares (NO/D) associados aos links da rede do exemplo 2.

LINK	NC	NO/D	LINK	NC	NO/D
1	1	3	1	4	2
1 <sup>1</sup>	2	3	1 <sup>4</sup>	5	2
1 <sup>2</sup>	3	1	1 <sub>5</sub>		
1 <sub>3</sub>					

TABELA 6.1.3 - n.º computacional (NC) e n.º de pares O-D (NO/D) associados a cada link do exemplo 3.

LINK	NC	NO/D	LINK	NC	NO/D
1	1	6	1	5	7
1 <sup>1</sup>	2	6	1 <sup>5</sup>	6	6
1 <sup>2</sup>	3	7	1 <sup>6</sup>	7	6
1 <sup>3</sup>	4	1	1 <sup>7</sup>		
1 <sub>4</sub>					

TABELA 6.1.4 - n.º computacional (NC) e n.º de pares O-D (NO/D) associados a cada link do exemplo 4.

LINK	NC	NO/D	LINK	NC	NO/D	LINK	NC	NO/D
1	1	9	1 <sub>61</sub>	6	2	1 <sub>13</sub>	13	3
1 <sub>11</sub>	22	9	1 <sub>62</sub>	27	2	1 <sub>14</sub>	14	6
1 <sub>12</sub>	23	6	1 <sub>7</sub>	7	3	1 <sub>15</sub>	15	3
1 <sub>21</sub>	2	6	1 <sub>8</sub>	8	6	1 <sub>16</sub>	16	3
1 <sub>22</sub>	24	6	1 <sub>9</sub>	9	6	1 <sub>17</sub>	17	3
1 <sub>31</sub>	3	3	1 <sub>10</sub>	10	3	1 <sub>18</sub>	18	3
1 <sub>32</sub>	25	2	1 <sub>11</sub>	11	3	1 <sub>19</sub>	19	3
1 <sub>41</sub>	4	2	1 <sub>12 1</sub>	12	5	1 <sub>20</sub>	20	3
1 <sub>42</sub>	5	5	1 <sub>12 2</sub>	28	7	1 <sub>21</sub>	21	3
1 <sub>51</sub>								

TABELA 6.1.5 - n.º computacional (NC) e n.º de pares O-D (NO/D) associados aos links da rede do exemplo 5.

As tabelas 6.2.1 a 6.2.5 apresentadas a seguir, mostram a informação seletiva ou individual associada a cada link e as respectivas classificações. Pode-se obter valores iguais para a informação seletiva, gerando, neste caso empates na classificação. Critérios de desempates, serão estabelecidos mais adiante na secção 6.2.7.

LINK	CANAL	$h(p)=-\ln p$	class. links	class. canais
$l_1$	1	0.510825	1	2
$l_2$	1	0.916290	2	1
	2	0.510825		2
$l_3$	1	0.510825	2	2
	2	0.916290		1

TABELA 6.2.1 - Informação seletiva e classificação do exemplo 1.

LINKS	CANAIS	$h(p)=-\ln p$	CL.	LINKS	CANAIS	$h(p)=-\ln p$	CL.
$l_1$	1 e 2	1.15267	4	$l_{11}$	1 e 2	1.15267	4
$l_2$	1 e 2	1.15267	4	$l_{12}$	1 e 2	2.94443	1
$l_3$	1 e 2	1.55814	3	$l_{13}$	1 e 2	1.55814	3
$l_4$	1 e 2	1.55814	3	$l_{14}$	1 e 2	1.55814	3
$l_5$	1 e 2	1.55814	3	$l_{15}$	1 e 2	2.94443	1
$l_6$	1 e 2	1.15267	4	$l_{16}$	1 e 2	2.25129	2
$l_7$	1 e 2	1.15267	4	$l_{17}$	1 e 2	1.55814	3
$l_8$	1 e 2	2.94443	1	$l_{18}$	1 e 2	1.55814	3
$l_9$	1 e 2	2.25129	2	$l_{19}$	1 e 2	1.55814	3
$l_{10}$	1 e 2	1.15267	4				

TABELA 6.2.2 - Informação seletiva e classificação dos links do exemplo 2.

LINKS	$h(p)=-\ln p$	CLASS/LINKS
$l_1$	0.916291	2
$l_2$	0.916291	2
$l_3$	1.609438	1
$l_4$	0.916291	2
$l_5$	0.916291	2

TABELA 6.2.3 - Informação seletiva e classificação dos links do ex.3.

LINKS	$h(p)=-\ln p$	CLASS
$l_1$	0.559615	3
$l_2$	0.559615	3
$l_3$	1.252763	2
$l_4$	1.945910	1
$l_5$	1.252763	2
$l_6$	0.559615	3
$l_7$	0.559615	3

TABELA 6.2.4 - Informação seletiva e classificação dos links do ex.4.

LINKS	CANAIS	$h(p)=-\ln p$	class. links	class. canais
$l_1$	1 e 2	2.639057	1	1
$l_2$	1 e 2	1.540445	3	2
$l_3$	1	1.540445	4	2
	2	0.847239		3
$l_4$	1 e 2	1.540445	3	2
	1	2.639057		1
$l_5$	2	1.540445	2	2
	1 e 2	1.540445	3	2
$l_6$	1 e 2	1.540445	3	2
$l_7$	1	0.847298	5	3
$l_8$	1	1.540445	3	2
$l_9$	1	1.540445	3	2
$l_{10}$	1	0.847298	5	3
$l_{11}$	1	0.847298	5	3
$l_{12}$	1	2.639057	2	1
	2	1.540445		2
$l_{13}$	1	0.847298	5	3
$l_{14}$	1	1.540445	3	2
$l_{15}$	1	0.847298	5	3
$l_{16}$	1	0.847298	5	3
$l_{17}$	1	0.847298	5	3
$l_{18}$	1	0.847298	5	3
$l_{19}$	1	0.847298	5	3
$l_{20}$	1	0.847298	5	3
$l_{21}$	1	0.847298	5	3

TABELA 6.2.5 - Informação seletiva e classificação dos links do ex. 5.

### 6.2.5 - Eliminação de links.

Nesta fase do método pode-se fazer uma eliminação de links. Elimina-se os links dependentes (dependência na forma discutida em 2.3.1), sempre que for possível constatá-los. A constatação pode ser feita por uma inspeção na rede, ou por mecanismos algébricos, sendo portanto difícil e demorada no caso de grandes áreas de estudo.

Caso haja "a priori" uma informação de links não atuantes (não atuantes no sentido abordado em 3.7), estes devem ser eliminados.

Poderá também ocorrer a eliminação de links que são tecnicamente considerados inadequados para a alocação de contadores. Os links que já têm contador instalado podem ser eliminados, mas as contagens volumétricas correspondentes podem ser utilizadas para a estimativa da matriz O-D de viagens, desde que estes links sejam atuantes.

Fazendo uma análise rápida dos exemplos citados, verifica-se que :

- no exemplo 2 os links  $l_3$  e  $l_5$  são dependentes;
- no exemplo 5 os pares de links:

$$(l_7, l_{17}), (l_{10}, l_{11}), (l_{15}, l_{16}),$$

$$(l_{18}, l_{19}), (l_8, l_{14}) ;$$

e o par de canais  $(l_{21}, l_{31})$  são dependentes.

Na secção 5.6.2 discutiu-se a definição de links não atuantes para o caso do modelo M2. Usando, assim, a fórmula (5.3) estabelecida, verifica-se, "a priori", a existência de links e/ou canais com boas possibilidades de serem não atuantes. Tem-se:

- no exemplo 1 -  $l_{22}$  e  $l_{31}$  ;
- no exemplo 2 -  $l_1, l_2, l_6, l_7, l_{10}, l_{11}, l_{12}, l_{15}$  ;

- no exemplo 3 -  $l_1$  e  $l_2$ ;
- no exemplo 4 -  $l_3$ ,  $l_5$  e
- no exemplo 5 -  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_8$ ,  $l_9$ ,  $l_{14}$ ,  $l_{31}$ ,  $l_{51}$ ,  $l_{121}$ .

Fazendo-se a eliminação desses links citados, obtém-se uma nova classificação, para os exemplos 1 a 5. As tabelas 6.3.1 e 6.3.2 mostram um resumo das classificações, onde os links dependentes estão colocados aos pares dentro de parênteses e os potencialmente não atuantes estão assinalados com um asterisco.

Class. LINKS	1°	2°	3°	4°	5°
EX. 1	$l_2, l_3$	$l_1$	-	-	-
EX. 2	$l_8, l_{12}^*, l_{15}^*$	$l_9, l_{16}$	$(l_3, l_5), l_4$ $l_{13}, l_{14}, l_{17}$ $l_{18}, l_{19}$	$l_1^*, l_2, l_6^*$ , $l_7^*, l_{10}^*, l_{11}^*$	-
EX. 3	$l_3$	$l_1^*, l_2^*, l_4$ $l_5$	-	-	-
EX. 4	$l_4$	$l_3^*, l_5^*$	$l_1, l_2, l_6,$ $l_7$	-	-
EX. 5	$l_1^*$	$l_5, l_{12}$	$l_2^*, l_4, l_6$  $l_9^*$  $(l_8^*, l_{14}^*)$	$l_3$	$(l_7, l_{17}),$ $(l_{10}, l_{11}),$ $(l_{15}, l_{16}),$ $(l_{18}, l_{19}),$ $l_{13}, l_{20}, l_{21}$

TABELA 6.3.1 - Classificação dos links dos exs. 1 a 5.



Class. CANAIS	1°	2°	3°	4°
EX. 1	3 e 4	1, 2*, 5*	-	-
EX. 2	8, 12*, 15* 27, 31*, 34*	9, 16, 28 35	(3, 5), 4, 13, 14, 17, 18, 19, 23 (22, 24) 32, 33, 36, 37, 38	1*, 2*, 6*, 7*, 10*, 11*, 20*, 21*, 25*, 26*, 29*, 30*
EX. 3	3	1*, 2*, 4, 5	-	-
EX. 4	4	3*, 5*	1, 2, 6, 7	-
EX. 5	1*, 22*, 5*, 12*	(23*, 24*) 2*, 4, 25, 26, 6, 27, (8*, 14*), 28, 9*	(7, 17) (10, 11) (15, 16) (18, 19) 3, 13, 20, 21	-

TABELA 6.3.2 - Classificação por canais dos exs.1 a 5.

### 6.2.6 - Setorização.

Esta etapa do método é uma etapa opcional. Quando a estimativa da matriz O-D é feita para áreas muito pequenas (com menos de 10 nós), com poucos links (menos de 20 links), a setorização pode ser dispensada, pois os resultados encontrados com o uso da setorização em muitos casos são iguais aos resultados encontrados sem o uso da setorização. Alguns modelos, como o modelo de Willumsen (definido na secção 2.4.3) e o modelo M3 (definido na secção 4.5) pela sua estrutura, apresentam melhor estimativa quando os links escolhidos estão distribuídos de uma forma mais dispersa na rede. Neste caso quando a setorização favorece uma melhor dispersão, ela se torna mais interessante.

Quando a distribuição de probabilidades definida na etapa 3 (classificação dos links), é quase uniforme, o uso da setorização vai facilitar os desempates. Geralmente a não

utilização da setorização fornece um conjunto solução viável, com mais opções.

#### 6.2.6.1 - Definição da setorização.

Entende-se por setor uma parte da rede rodoviária. Cada setor contém um único nó centróide e um conjunto de links. De um modo geral os setores são definidos fazendo-se:

- a escolha de uma variável relacionada com volume de tráfego;
- ordenação das zonas e
- definição dos links associados a cada setor.

Dentre as variáveis utilizadas para o estudo de geração de tráfego, encontram-se algumas (p.ex. número de carros, população, etc.), que são facilmente obtidas de dados censitários ou de outras fontes. Esses dados são obtidos, portanto, sem maiores custos. Assim a escolha da variável a ser usada, deve ser feita de forma a contemplar aquela cujos dados estão disponíveis, e que seja a mais adequada para refletir uma ordenação das zonas em termos do volume de tráfego.

A ordenação dos valores da variável escolhida, em ordem decrescente, define a ordenação das zonas. Obtém-se assim o conjunto  $\{ Z_1, Z_2, \dots, Z_N \}$  onde  $Z_i$  ( $i=1,2,\dots,N$ ) representa a  $i$ -ésima zona da ordenação definida.

Os setores ficarão definidos da seguinte maneira:

O SETOR 1 ficará definido com a zona  $Z_1$  e com todos os links que pertencem ao caminho mínimo entre as zonas  $Z_1$  e  $Z_i$  ( $i = 2,3,\dots,N$ ).

O SETOR 2 ficará definido com a zona  $Z_2$  e com todos os links que pertencem ao caminho mínimo entre as zonas  $Z_2$  e  $Z_i$  ( $i = 1,3,4,\dots,N$ ), exceto os já alocados ao setor 1.

E assim sucessivamente. Portanto existirão no máximo (N-1) setores.

Observa-se que quando um contador volumétrico é instalado em uma via, não faz muito sentido instalá-lo somente em uma faixa de tráfego, portanto quando o link apresenta dois canais, ambos devem ficar no mesmo setor.

A tabela 6.4 mostra a composição dos setores dos exemplos 1 a 5.

	SETOR 1	SETOR 2	SETOR 3	SETOR 4	SETOR 5
EX.1	ZONA: 2 LINKS: $l_2, l_3$	ZONA: 1 LINKS: $l_1$	-	-	-
EX.2	ZONA: 3 LINKS: $l_1, l_2, l_3, l_5, l_6, l_7, l_8, l_{10}, l_{11}, l_{15}, l_{17}, l_{18}, l_{19}$	ZONA: 2 LINKS: $l_9, l_{16}, l_{12}$	ZONA: 8 LINKS: $l_4, l_{14}$	ZONA: 1 LINKS: $l_{13}$	-
EX.3	ZONA: 1 LINKS: $l_2, l_3, l_4$	ZONA: 2 LINKS: $l_1$	ZONA: 3 LINKS: $l_5$	-	-
EX.4	ZONA: 3 LINKS: $l_1, l_3, l_6, l_7$	ZONA: 4 LINKS: $l_5$	ZONA: 1 LINKS: $l_4, l_2$	-	-
EX.5	ZONA: 6 LINKS: $l_1, l_2, l_3, l_5, l_6, l_9, l_{12}, l_{15}, l_{16}, l_{21}$	ZONA: 1 LINKS: $l_7, l_{17}, l_8, l_{14}, l_{18}, l_{19}$	ZONA: 4 LINKS: $l_{10}, l_{11}$	ZONA: 5 LINKS: $l_{13}$	ZONA: 3 LINKS: $l_{20}$

TABELA 6.4 - Setorização dos exemplos 1 a 5.

Nos exemplos 1 a 5 utilizou-se a variável "número de carros", cujos valores simulados geraram as seguintes ordenações:

- Ex.1 - { 2,1,3 }
- Ex.2 - { 3,2,8,1,4,5,6,7 }
- Ex.3 - { 1,2,3 }
- Ex.4 - { 3,4,5,1,2 }
- Ex.5 - { 6,1,4,5,2,3 }.

Observa-se que a escolha de uma outra variável pode implicar em uma outra ordenação, geralmente com pequenas diferenças. Pode ocorrer empates e neste caso utiliza-se uma outra variável para fazer os desempates.

#### 6.2.6.2 - Distribuição setorial.

Supõe-se que a área de interesse esteja dividida em  $S$  ( $1 \leq S \leq N - 1$ ) setores. Cada setor contém um centróide e um número determinado de links.

Seja

$a_1$  o número de links do setor 1;

$a_2$  o número de links do setor 2;

. . . . .

$a_s$  o número de links do setor  $S$ .

Observa-se que os links eliminados não são computados.

Necessita-se distribuir  $C$  contadores de maneira aleatória, isto é, sem privilégios, de modo que nenhum setor fique mais favorecido em relação aos outros.

A distribuição mais provável de alocação dos contadores aos links, é a mais freqüente (ver Feller, 1971). A distribuição mais freqüente é aquela na qual o número de contadores alocados em cada setor é proporcional ao número de links do setor.

Seja  $n_k$  o número de contadores que serão alocados no setor  $k$  ( $k = 1, 2, \dots, S$ ). Como  $n_k$  deve ser proporcional ao

número de links do setor  $k$ , escreve-se

$$n_k = A a_k$$

onde  $A$  é a constante de proporcionalidade. Tem-se que:

$$\sum_k n_k = C ,$$

assim

$$\sum_k A a_k = C ,$$

portanto

$$A = \frac{C}{\sum_k a_k}$$

e

$$n_k = \frac{C}{\sum_k a_k} a_k \quad (6.2)$$

O resultado (6.2) pode também ser encontrado, usando-se probabilidades (ver Flemming, 1992 ; Flemming e Ulysséa Neto, 1992a). Portanto, com a fórmula (6.2), pode-se definir uma distribuição setorial dos contadores. Vamos denotar esta distribuição por " SI ".

Dependendo do modelo a ser usado na estimativa da matriz O-D de viagens, pode-se salientar alguns links atuantes com mais informação, como por exemplo, links com informação do tipo 1 (ver secção 3.7 ). Para destacar esses links pode-se fazer uma nova distribuição setorial como mostram as etapas a seguir:

- (1) Define-se o número de links de cada setor que se queira destacar, seja  $a_{k1}$ , este número.
- (2) Dá-se peso 2 aos links listados em (1) e peso 1 para os demais.
- (3) Obtém-se um valor ponderado representativo de cada setor

$$P_k = 2 \cdot a_{k1} + (a_k - a_{k1}). \quad (6.3)$$

(3) Calcula-se

$$n_k = \frac{C}{\sum_k P_k} P_k. \quad (6.4)$$

A fórmula (6.4) é análoga à (6.2). No entanto, sua utilização valoriza os links atuantes considerados mais importantes. A distribuição setorial definida com a fórmula (6.4) será denotada por " SII ".

Observa-se que o peso estabelecido na etapa (2) pode ser aumentado, caso o planejador entenda que uma maior importância deva ser dada aos links listados. Pode-se também usar os pesos para valorizar links que já contém contadores instalados e não foram eliminados. Isto iria enquadrá-los no processo.

Como os valores calculados para os  $n_k$ , usando a expressão (6.2) ou (6.4), podem não ser números inteiros, deve-se fazer um arredondamento. Ao se fazer o arredondamento usual, pode acontecer que  $\sum_k n_k = C \pm 1$ . Isto significa que foi alocado um contador a mais ou que um contador não foi alocado. Para resolver este problema de arredondamento, gera-se as possíveis distribuições, diante de um novo critério de arredondamento (por exemplo analisando os desvios).

Supondo a alocação de 5 contadores na rede do exemplo 2, eliminando somente os links dependentes obtém-se:

$$a_1 = 12$$

$$a_2 = 4$$

$$a_3 = 2$$

$$a_4 = 1,$$

e usando a fórmula (6.2) tem-se:

$$\begin{aligned}n_1 &= 3,3333\dots \\n_2 &= 1,1111\dots \\n_3 &= 0,5555\dots \\n_4 &= 0,2777\dots\end{aligned}$$

Portanto a distribuição setorial correspondente é:

$$(3,1,1,0)$$

isto é, 3 contadores no setor 1, 1 contador no setor 2 e 1 contador no setor 3 .

Supondo a alocação de 7 contadores obtém-se:

$$\begin{aligned}n_1 &= 4,666\dots \\n_2 &= 1,555\dots \\n_3 &= 0,777\dots \\n_4 &= 0,388\dots\end{aligned}$$

Neste caso não se deve fazer o arredondamento usual, pois ficaria um contador a mais alocado. Fazendo uma análise de desvios,  $|5 - 4,666\dots| = 0,333\dots$ ,  $|2 - 1,555\dots| = 0,444\dots$ ,  $|1 - 0,777\dots| = 0,222\dots$ , opta-se pela distribuição setorial  $(5,1,1,0)$ , pois o maior desvio é encontrado com o valor de  $n_2$ .

Nas tabelas A4.1 a A4.5, do anexo II, têm-se diversas distribuições setoriais respectivamente aos exemplos 1 a 5.

### 6.2.6.3 - Classificação dos links por setores.

Os links de cada setor são novamente classificados usando-se a mesma medida da classificação anterior. A tabela 6.5 apresenta um esquema da classificação por setores dos exemplos 1 a 5. Novamente, destacam-se os links com possibilidades de serem atuantes, usando um asterisco, e os links dependentes são colocados entre parênteses.

		SETOR 1	SETOR 2	SETOR 3	SETOR 4	SETOR 5
EX.1	1. <sup>o</sup>	$l_2, l_3$	$l_1$	-	-	-
EX.2	1. <sup>o</sup>	$l_8, l_{15}^*$	$l_{12}^*$	$l_4, l_{14}$	$l_{13}$	-
	2. <sup>o</sup>	$(l_3, l_5),$ $l_{17}, l_{18}, l_{19}$	$l_9, l_{16}$	-	-	-
	3. <sup>o</sup>	$l_1^*, l_2^*, l_6^*, l_7^*$ $l_{10}^*, l_{11}^*$	-	-	-	-
EX.3	1. <sup>o</sup>	$l_3$	$l_1^*$	$l_5$	-	-
	2. <sup>o</sup>	$l_2^*, l_4$	-	-	-	-
EX.4	1. <sup>o</sup>	$l_3^*$	$l_5^*$	$l_4, l_2$	-	-
	2. <sup>o</sup>	$l_1, l_6, l_7$	-	-	-	-
EX.5	1. <sup>o</sup>	$l_1^*$	$l_4$	$(l_{10}, l_{11})$	$l_{13}$	$l_{20}$
	2. <sup>o</sup>	$l_5, l_{12}$	$(l_8^*, l_{14}^*)$	-	-	-
	3. <sup>o</sup>	$l_2^*, l_9^*,$ $l_6$	$(l_7, l_{17})$ $(l_{18}, l_{19})$	-	-	-
	4. <sup>o</sup>	$l_3$	-	-	-	-
	5. <sup>o</sup>	$(l_{15}, l_{16}),$ $l_{21}$	-	-	-	-

TABELA 6.5 - Classificação por setor dos exemplos 1 a 5.

### 6.2.7 - Escolha dos Links para Alocação dos Contadores.

Após a classificação dos links, geral ou por setores, obtém-se um conjunto de soluções viáveis para o problema de alocação de contadores numa rede. Por exemplo, no caso do exemplo 1, para alocar dois contadores tem-se:

- $l_1$  e  $l_2$
- $l_1$  e  $l_3$ ,

pois os links  $l_2$  e  $l_3$  tem a mesma classificação.

Para alocar somente um contador existem as opções:



- $l_1$  , não usando a setorização;
- $l_2$  ou  $l_3$  , usando a setorização.

O número de soluções viáveis pode aumentar no caso de grandes redes. No exemplo 5 tem-se:

- a) Não usando a setorização
  - 1 opção para alocar 3 contadores e
  - 7 opções para alocar 10 contadores.
- b) Usando a setorização
  - 1 opção para alocar 3 contadores e
  - 4 opções para alocar 10 contadores.

Observa-se, no caso do exemplo 5, uma redução do número de opções, quando usa-se a setorização para alocar 10 contadores.

Para a definição final dos links que serão escolhidos utiliza-se:

- critérios de desempates e
- redefinição do número de contadores.

#### 6.2.7.1.- Alguns critérios de desempates .

Neste momento o planejador já deve ter a definição de qual modelo usará para estimar a matriz O-D de viagens. Deve-se procurar definir o que é um "link atuante", isto é, deve-se conhecer, através da estrutura do modelo, de que maneira as contagens volumétricas obtidas num link contribuem para a calibração do modelo e/ou estimativa da matriz O-D de viagens. Isto automaticamente vai gerar um critério de desempate muito importante.

Considerando as conclusões citadas em 3.7, pode-se escrever os seguintes critérios:

- 1) Dar preferência ao link que apresenta um maior número de pares O-D associados a ele.

2) Dar preferência ao link representativo (ver secção 2.5.2).

3) Dar preferência ao link cuja equação fundamental apresenta pares O-D ainda não incluídos em outros links já escolhidos.

4) Dar preferência ao link com informação do tipo 1 ou 2.

Pode-se também estabelecer outros critérios considerando-se a viabilidade técnica de instalação:

5) Dar preferência ao link cuja instalação tem um custo menor.

6) Dar preferência ao link cuja via, que ele representa, é asfaltada ou similar.

7) Dar preferência ao link cuja via tem um posto policial ou fiscal já instalado ou em fase de instalação.

Quando já existem contadores alocados em alguns links, e estes não foram eliminados, pode-se estabelecer o critério:

8) Dar preferência ao link que já tem contador alocado.

Evidentemente, outros critérios podem ser estabelecidos, como exemplo tem-se:

9) Dar preferência ao link pertencente ao sistema arterial principal (hierarquia funcional superior).

#### **6.2.7.2 - Redefinição do número de contadores .**

Dependendo do número de contadores disponíveis para a alocação, pode-se obter uma única solução. Isto obviamente dispensará os critérios de desempates. A redefinição do número de contadores pode ser usada quando os critérios de desempates não são suficientes para a definição final de alocação dos contadores. Nos exemplos 1 a 5 pode-se citar os seguintes números de contadores ,considerados interessantes, porque induzem uma solução única de alocação:

- EX.1 : 2 e 3 ;
- EX.2 : 3, 5, 12 e 18;
- EX.3 : 1 e 5;
- EX.4 : 1, 3 e 7
- EX.5 : 1, 3, 8, 9 e 16.

De fato, observando a tabela 6.3.1, verifica-se, por exemplo, para o caso do exemplo 2 que:

- Se  $C = 3$  tem-se o conjunto de links  $\{l_8, l_{12}, l_{15}\}$ .
- Se  $C = 5$  tem-se o conjunto de links  $\{l_8, l_{12}, l_{15}, l_9, l_{16}\}$ .
- Se  $C = 12$  tem-se o conjunto de links  $\{l_8, l_{12}, l_{15}, l_9, l_{16}, l_3 \text{ ou } l_5, l_4, l_{13}, l_{14}, l_{17}, l_{18}, l_{19}\}$
- Se  $C = 18$  tem-se todos os links da rede.

Portanto, tem-se a definição do conjunto de links sem a necessidade de usar critérios de desempates.

### 6.3 - Resumo das Etapas do Método .

Segue um resumo das etapas do método apresentado neste capítulo. Procurou-se dar a forma de um algoritmo para facilitar a sua utilização. Ao final de cada item tem-se, entre parênteses, a secção deste trabalho que pode ser consultada para a obtenção de maiores detalhes.

- (1) Definir a área em estudo (6.2.1).
- (2) Fazer um zoneamento (6.2.2).
- (3) Fazer um grafo simplificado com os links e seus respectivos canais (6.2.2).
- (4) Definir a alocação de tráfego usada (2.2).
- (5) Estabelecer os valores das proporções de viagens entre

- "i" e "j" que usam o link contador  $l_k$  (2.2).
- (6) Estabelecer as equações fundamentais através da fórmula 2.1 (2.1).
  - (7) Definir o número de pares O-D associados a cada link  $l_k$  (6.2.4).
  - (8) Definir a variável aleatória X (3.2.1 e 6.2.4) .
  - (9) Definir a distribuição de probabilidades P(X) (3.2.2 e 6.2.4).
  - (10) Calcular a informação individual h(p) (3.3 e 6.2.4).
  - (11) Classificar os links (6.2.4).
  - (12) Eliminar links (6.2.5).
  - (13) Definir o modelo para estimar a matriz O-D que vai ser usado.
  - (14) Se a estimativa apresentada pelo modelo é consistente com as contagens volumétricas vá para a etapa (15). Caso contrário vá para a etapa (17).
  - (15) Se a distribuição de probabilidades P(X) é quase uniforme vá para a etapa (16). Caso contrário vá para a etapa (20).
  - (16) Iniciar o procedimento de Setorização. Vá para a etapa (29) (6.2.6).
  - (17) Se o modelo usa contagens volumétricas para a calibração e/ou estimativa da matriz O-D de viagens vá para a etapa (18). Caso contrário vá para a etapa (19).
  - (18) Se a estimativa produzida pelo modelo é consistente com os dados de geração ( $O_i$ ) e atração ( $D_j$ ) de viagens, vá para a etapa (16). Caso contrário vá para a etapa (20).
  - (19) Procurar outro modelo que utilize contagens volumétricas, portanto retorne a etapa (13).
  - (20) A setorização não vai ser usada.
  - (21) Estabelecer o número de contadores (6.2.3).
  - (22) Estabelecer o conjunto de links (6.2.7).
  - (23) Se existe empates de links vá para a etapa (24). Caso contrário vá para a etapa (42).
  - (24) Para redefinir o número de contadores vá para a etapa (25). Caso contrário vá para a etapa (27).

- (25) Definir o novo número de contadores (6.2.7).
- (26) Definir o novo conjunto de links. Vá para a etapa (43).
- (27) Selecionar os critérios de desempates (6.2.7.1).
- (28) Definir o conjunto de links. Vá para a etapa (43).
- (29) Escolher uma variável relacionada com volume de tráfego (6.2.6).
- (30) Ordenar as zonas (6.2.6).
- (31) Estabelecer o número de links de cada zona (6.2.6).
- (32) Classificar os links dentro de cada zona (6.2.6).
- (33) Estabelecer o número de contadores (6.2.3).
- (34) Se a rede tem links com informação do tipo 1 vá para a etapa (35). Caso contrário vá para a etapa (40).
- (35) Iniciar a distribuição setorial II (6.2.6).
- (36) Calcular o número ( $n_k$ ) de contadores para cada setor (6.2.6).
- (37) Estabelecer um critério de arredondamento (6.2.6).
- (38) Definir o conjunto de links.
- (39) Setorização concluída, vá para a etapa (23).
- (40) Iniciar a distribuição setorial I (6.2.6).
- (41) Calcular os  $n_k$  e vá para a etapa (37) (6.2.6).
- (42) Conjunto de contadores está definido.
- (43) PARE.

Salienta-se que, esse roteiro apresentado pode sofrer algumas alterações, de acordo com o modelo escolhido. No capítulo seguinte essas etapas são usadas para os testes realizados com o objetivo de verificar a eficiência desse método.

## CAPÍTULO VII

### TESTES PARA VERIFICAR A EFICIÊNCIA DO MÉTODO DE ALOCAÇÃO DE CONTADORES VOLUMÉTRICOS DE TRÁFEGO

#### 7.1 Introdução.

Vários exemplos foram desenvolvidos para estruturar o método descrito no capítulo VI. Neste capítulo serão apresentados os testes realizados com os exemplos 1 a 5 citados no capítulo anterior. Estes exemplos são considerados representativos de situações reais, isto é, as redes simuladas apresentam características de algumas redes reais ou parte delas.

Os modelos usados neste capítulo são os modelos :

- modelo de Willumsen (denotado por M1);
- modelo M2 e
- modelo M3,

apresentados nas secções 2.4.3, 4.4 e 4.5 respectivamente. Suas principais características estão resumidas na secção seguinte.

#### 7.2 - Modelos Usados nos Testes.

##### O Modelo M1.

Este modelo foi desenvolvido por L.G. Willumsen (1981)

(ver secção 2.4.3) . A função objetivo deste modelo é uma função do tipo entrópica e as restrições são as equações fundamentais de alguns links da rede viária. Portanto, a estimativa apresentada por este modelo é consistente com as contagens volumétricas de alguns links da rede viária.

O algoritmo de calibração, proposto pelo autor, foi implementado em Fortran 77 (programa M1 descrito no anexo I). A alocação de tráfego usada foi a alocação tudo ou nada. A matriz "a priori" usada foi uma matriz  $[t_{ij}]$  tal que  $t_{ij}=1$  para  $i \neq j$  .

Para realizar os testes, com objetivo de analisar a viabilidade de utilização da matriz W de valores máximos, definida em 4.2, como uma matriz "a priori", utilizou-se também o modelo de Willumsen, com a denotação M12.

#### **O Modelo M2.**

Este modelo foi apresentado na secção 4.4 do capítulo IV, estruturado e calibrado pela autora. Este modelo tem como função objetivo uma função entrópica condicional . A matriz O-D de viagens, estimada por este modelo, é consistente com os  $O_i$  (número de viagens com origem na zona " i ") e com os  $D_j$  (número de viagens atraídas pela zona " j").

#### **O Modelo M3.**

Este modelo foi apresentado na secção 4.5 do capítulo IV, estruturado e calibrado pela autora. A função objetivo deste modelo é a mesma função do modelo M2. A matriz O-D de viagens estimada é consistente com as contagens volumétricas de alguns links da rede viária.

### 7.3 - Seqüências de Links.

Para utilizar os modelos citados necessitam-se de contagens volumétricas em alguns links da rede. Assim, as seguintes seqüências de links foram estabelecidas:

**SS** - Seqüências formadas com links escolhidos de acordo com a classificação do método proposto no capítulo VI denotado por **MET2**, sem a eliminação prévia de links.

**AL** - Seqüências formadas com links escolhidos aleatoriamente.

**CCP** - Seqüências formadas com links escolhidos de acordo com a classificação proposta por Willumsen (1981), denotado neste texto como **MET1**, descrita na secção 2.5.1.

**CSI** - Seqüências formadas de acordo com a classificação proposta por **MET2**, usando-se a distribuição setorial **SI**, eliminando-se links dependentes detectáveis.

As seqüências **SS** foram definidas usando-se os dados das tabelas 6.3.1 e 6.3.2. As seqüências **AL** foram definidas através de sorteio dos links. As seqüências **CSI** foram definidas usando-se a tabela 6.5 e diversas distribuições setoriais estabelecidas com a fórmula (6.2). As seqüências **CCP** foram definidas usando a medida  $I_{lk}$ , definida em (2.32) na secção 2.5.1, utilizando-se uma matriz antiga simulada, considerada bem representativa pois os valores das células da matriz foram obtidos proporcionais aos da matriz observada. A classificação dos links pode ser visualizada nas tabelas 7.6.1 a 7.6.5. Nos exemplos cujos links tem dois canais, a classificação do link é igual a do canal com melhor classificação.



link-canal		$I_{1k}$	clas.
1 <sub>1</sub>	1	0.250	2°
1 <sub>2</sub>	1	0.250	2°
	2	0.125	4°
1 <sub>3</sub>	1	0.166	3°
	2	0.666	1°

TABELA 7.6.1 - Classificação dos links do ex.1 pelo MET1.

link-canal		$I_{1k}$	clas	link-canal		$I_{1k}$	clas.
1 <sub>1</sub>	1	4.82	10°	1 <sub>11</sub>	1	6.06	2°
	2	4.72	12°		2	2.57	25°
1 <sub>2</sub>	1	4.76	11°	1 <sub>12</sub>	1	2.97	22°
	2	5.29	6°		2	5.17	8°
1 <sub>3</sub>	1	2.16	26°	1 <sub>13</sub>	1	0.72	38°
	2	1.44	33°		2	1.62	32°
1 <sub>4</sub>	1	2.72	24°	1 <sub>14</sub>	1	0.75	37°
	2	3.28	19°		2	1.68	31°
1 <sub>5</sub>	1	2.16	27°	1 <sub>15</sub>	1	5.20	7°
	2	1.44	34°		2	4.96	9°
1 <sub>6</sub>	1	3.93	16°	1 <sub>16</sub>	1	1.20	35°
	2	6.02	3°		2	1.78	30°
1 <sub>7</sub>	1	2.81	23°	1 <sub>17</sub>	1	3.00	21°
	2	5.42	4°		2	4.17	14°
1 <sub>8</sub>	1	3.34	18°	1 <sub>18</sub>	1	3.17	20°
	2	4.06	15°		2	5.39	5°
1 <sub>9</sub>	1	1.95	29°	1 <sub>19</sub>	1	2.08	28°
	2	1.04	36°		2	3.80	17°
1 <sub>10</sub>	1	4.43	13°				
	2	7.80	1°				

TABELA 7.6.2 - Classificação dos links do ex.2 pelo MET1.

link	$I_{1k}$	class.
1 <sub>1</sub>	1.289	1°
1 <sub>2</sub>	0.900	2°
1 <sub>3</sub>	0.833	3°
1 <sub>4</sub>	0.100	5°
1 <sub>5</sub>	0.562	4°

TABELA 7.6.3 - Classificação dos links do ex.3 pelo MET1.

link	$I_{1k}$	class.
$l_1$	24.501	5°
$l_2$	17.782	6°
$l_3$	47.335	3°
$l_4$	2.500	7°
$l_5$	42.779	4°
$l_6$	55.279	1°
$l_7$	50.279	2°

TABELA 7.6.4 - Classificação dos links do ex.4 pelo MET1.

link-canal	$I_{1k}$	clas	link-canal	$I_{1k}$	class
$l_1$ 1	24.50	5°	$l_{11}$ -	7.38	20°
$l_1$ 2	36.05	1°	$l_{11}$ 1	15.28	8°
$l_2$ 1	28.44	3°	$l_{12}$ 2	13.80	9°
$l_2$ 2	15.57	7°	$l_{13}$ -	11.38	11°
$l_3$ 1	28.44	3°	$l_{14}$ -	10.90	12°
$l_3$ 2	8.79	17°	$l_{15}$ -	17.27	6°
$l_4$ 1	8.67	18°	$l_{16}$ -	17.27	6°
$l_4$ 2	6.33	22°	$l_{17}$ -	13.61	10°
$l_5$ 1	26.27	4°	$l_{18}$ -	8.94	16°
$l_5$ 2	9.50	14°	$l_{19}$ -	8.94	16°
$l_6$ 1	10.50	13°	$l_{20}$ -	6.79	21°
$l_6$ 2	9.11	15°	$l_{21}$ -	7.61	19°
$l_7$ -	13.61	10°			
$l_8$ -	10.90	12°			
$l_9$ -	28.66	2°			
$l_{10}$ -	7.38	20°			

TABELA 7.6.5 - Classificação dos links do ex.5 pelo MET1.

#### 7.4 - Estatísticas Usadas.

Para avaliar as estimativas apresentadas pelos modelos, utilizaram-se as estatísticas phi-normalizada, denotada por  $\phi$ , e índice de dissimilaridade, denotado por ID,

descritas na secção 5.5.

Elaborou-se um programa computacional para encontrar os valores de  $\phi$  e ID de cada exemplo rodado. Neste caso a matriz O-D Observada de cada exemplo é também uma matriz simulada. Alguns dos resultados encontrados estão apresentados nas tabelas do anexo II.

## 7.5 - Testes para Avaliar a Etapa de Classificação dos Links.

Para avaliar se a classificação proposta é uma "boa" classificação, realizaram-se dois testes, denotados por teste 1 e teste 2, descritos a seguir.

### 7.5.1 - Descrição dos testes 1 e 2.

**Teste 1** - Formaram-se as seqüências SS e AL e foram obtidas matrizes O-D de viagens, para os três modelos em questão. As estimativas foram avaliadas (ver tabelas A1.1 a A1.5 e A2.1 a A2.5). Comparando os dados em 224 casos que envolveram as estatísticas  $\phi$  e ID e os modelos M1, M12, M2 e M3, obteve-se:

- 22,77% dos casos apresentaram melhores estimativas quando as seqüências AL foram usadas;
- 61,16 % quando usaram-se as seqüências SS e
- 16,07 % dos casos apresentaram valores iguais para  $\phi$  ou ID quando usou-se AL ou SS.

Portanto, na maioria dos casos a seqüência SS foi melhor.

Estes percentuais encontrados praticamente se mantêm

quando são separados os resultados das estatísticas  $\phi$  e ID:

a) Usando a estatística  $\phi$

AL - 24,11 %

SS - 59,82 %

IGUAL - 16,07 %

b) Usando a estatística ID

AL - 21,43 %

SS - 62,5 %

IGUAL - 16,07 %

Analisando os modelos separadamente obtém-se:

a) Usando o modelo M1

AL - 19,64 %

SS - 69,64 %

IGUAL - 10,72 %

b) Usando o modelo M12

AL - 12,5 %

SS - 76,79 %

IGUAL - 10,71 %

c) Usando o modelo M2

AL - 44,64 %

SS - 26,79 %

IGUAL - 28,57 %

d) Usando o modelo M3

AL - 14,29 %

SS - 71,42 %

IGUAL - 14,29 %.

Observa-se assim, que no caso dos modelos M1, M12 e M3, na maioria dos casos, as seqüências SS apresentaram melhores estimativas.

No caso do modelo M2, observou-se uma inversão, isto é, somente em 26,79 % das seqüências SS tiveram melhores estimativas. Observa-se também um aumento percentual de situações "IGUAIS", isto é, as seqüências SS e AL apresentaram estimativas equivalentes. Isto ocorreu pela presença dos links não atuantes.

**Teste 2** - Formaram-se seqüências SS e CCP e foram obtidas matrizes O-D de viagens usando os quatro modelos já citados. As estimativas foram avaliadas (ver tabelas A1.1 a A1.5 e A3.1 a A3.5). Comparando os dados tem-se:

CCP	- 40,09 %
SS	- 52,15 %
IGUAL	- 7,76 % .

Observa-se uma diferença percentual entre as seqüências SS e as seqüências CCP de 12,06 %. As seqüências SS tiveram 52,15 % de melhores estimativas contra 40,09 % das seqüências CCP, num total de 232 comparações.

Também neste caso analisaram-se separadamente as estatísticas  $\phi$  e ID . Observa-se que os percentuais praticamente se mantêm. Tem-se:

a) Usando a estatística  $\phi$

CCP	- 43,97 %
SS	- 48,27 %
IGUAL	- 7,76 %

b) Usando a estatística ID

CCP	- 36,21 %
SS	- 56,03 %
IGUAL	- 7,76 %

Analisando por modelo obtém-se:

a) Usando M1	
CCP	- 48,28 %
SS	- 48,28 %
IGUAL	- 3,44 %
b) Usando M12	
CCP	- 29,31 %
SS	- 67,24 %
IGUAL	- 3,45 %
c) Usando M2	
CCP	- 56,90 %
SS	- 22,41 %
IGUAL	- 20,69 %
d) Usando M3	
CCP	- 25,86 %
SS	- 70,69 %
IGUAL	- 3,45 %

Para os modelos M12 e M3 as seqüências SS geraram melhores estimativas na maioria dos casos. No caso do modelo M1 as seqüências SS e CCP apresentaram o mesmo resultado percentual. No caso do M2, as seqüências CCP apresentaram melhores estimativas. Observa-se novamente o percentual maior de "IGUAL".

#### 7.5.2 - Conclusões.

Diante dos resultados apresentados, dos testes 1 e 2, conclui-se:

1) A informação seletiva é uma medida adequada para a classificação dos links, principalmente quando são usados modelos com estruturas semelhantes às dos modelos M1 ou M12 e M3, isto é, modelos cuja estimativa é consistente com as

contagens volumétricas e cuja função objetivo é uma função entrópica.

2) A classificação dos links dada pelo MET1 e pelo MET2 são ambas "boas", pois estatisticamente obteve-se um percentual de 12,06 % de diferença favorável ao MET2. Entretanto na prática a classificação do MET2 é melhor, pois para obtê-la necessita-se apenas da "alocação de tráfego", ao passo que para a classificação do MET1 necessita-se das contagens volumétricas de todos os links da rede.

## 7.6 - Testes para Avaliar a Etapa de Setorização.

Para avaliar a etapa de setorização, que é opcional, realizou-se um teste denotado por teste 3, com 3 itens descritos a seguir.

### 7.6.1 - Descrição do teste 3.

**TESTE 3** - Formaram-se as seqüências CSI (ver tabelas A4.1 a A4.5) e foram obtidas as estimativas para as matrizes O-D de viagens, usando os quatro modelos adotados. As estimativas foram avaliadas e os valores de  $\phi$  e ID obtidos são comparados com os valores de  $\phi$  e ID obtidos com as seqüências:

- (a) SS (ver tabelas A1.1 a A1.5)
- (b) CCP (ver tabelas A3.1 a A3.5)
- (c) AL (ver tabelas A2.1 a A2.5).

Estatisticamente tem-se os seguintes resultados:

- a) Para as 752 comparações do teste 3 (a)
  - CSI - 37,10 %

SS - 52,53 %  
 IGUAL - 10,37 %.

**b) Para as 432 comparações do teste 3 (b)**

CSI - 50 %  
 CCP - 42,59 %  
 IGUAL - 7,41 %.

**c) Para as 448 comparações do teste 3 (c)**

CSI - 74,11 %  
 AL - 18,75 %  
 IGUAL - 7,14 %.

A análise separada das estatísticas  $\phi$  e ID resultou:

**a) Para o teste 3 (a)**

Usando  $\phi$ :

CSI - 36,17 %  
 SS - 53,46 %  
 IGUAL - 10,37 %

Usando ID:

CSI - 38,03 %  
 SS - 51,60 %  
 IGUAL - 10,37 %

**b) Para o teste 3 (b)**

Usando  $\phi$ :

CSI - 52,31 %  
 CCP - 40,28 %  
 IGUAL - 7,41 %

Usando ID:

CSI - 47,68 %  
 CCP - 44,91 %  
 IGUAL - 7,41 %



## c) Para o teste 3 (c)

Usando  $\phi$ :

CSI - 73,66 %  
 AL - 19,20 %  
 IGUAL - 7,14 %

Usando ID:

CSI - 74,56 %  
 AL - 18,30 %  
 IGUAL - 7,14 %

Analisando separadamente por modelos tem-se:

## a) Para o teste 3 (a)

Modelo M1:

CSI - 33,51 %  
 SS - 59,04 %  
 IGUAL - 7,45 %

Modelo M12:

CSI - 30,32 %  
 SS - 62,23 %  
 IGUAL - 7,45 %

Modelo M2:

CSI - 54,79 %  
 SS - 27,13 %  
 IGUAL - 18,08 %

Modelo M3

CSI - 29,79 %  
 SS - 61,70 %  
 IGUAL - 8,51 %.

## b) Para o teste 3 (b)

Modelo M1

CSI - 50 %  
 CCP - 44,44 %  
 IGUAL - 5,56 %

Modelo M12

CSI - 54,63 %  
 CCP - 39,81 %  
 IGUAL - 5,56 %

Modelo M2

CSI - 18,52 %  
 CCP - 68,52 %  
 IGUAL - 12,96 %

Modelo M3

CSI - 76,85 %  
 CCP - 17,59 %  
 IGUAL - 5,56 %.

## c) Para o teste 3 (c)

Modelo M1		Modelo M12	
CSI	- 91,07 %	CSI	- 89,29 %
AL	- 5,36 %	AL	- 7,14 %
IGUAL	- 3,57 %	IGUAL	- 3,57 %
Modelo M2		Modelo M3	
CSI	- 30,36 %	CSI	- 85,72 %
AL	- 51,79 %	AL	- 10,71 %
IGUAL	- 17,85 %	IGUAL	- 3,57 %

A análise desses percentuais nos mostra que os modelos M1 , M12 e M3 apresentaram melhores estimativas, na maioria dos casos analisados, quando as seqüências SS foram usadas. Para entender melhor esses resultados foi feita uma análise de dispersão, descrita na secção seguinte.

### 7.6.2 - Análise de dispersão.

Dentre os vários conjuntos de links usados para rodar esses exemplos, selecionaram-se alguns aleatoriamente, para fazer uma análise de dispersão.

Esta análise foi feita de acordo com as seguintes etapas:

(1) Alocação do grafo simplificado num sistema de coordenadas cartesianas:

O grafo simplificado foi alocado num sistema de coordenadas cartesianas  $xy$ . Dessa forma cada nó do grafo fica representado por um par de pontos  $(x,y)$ , e cada link fica representado por um segmento que une os pares de pontos correspondentes. A figura 7.1 ilustra o caso do exemplo 2.

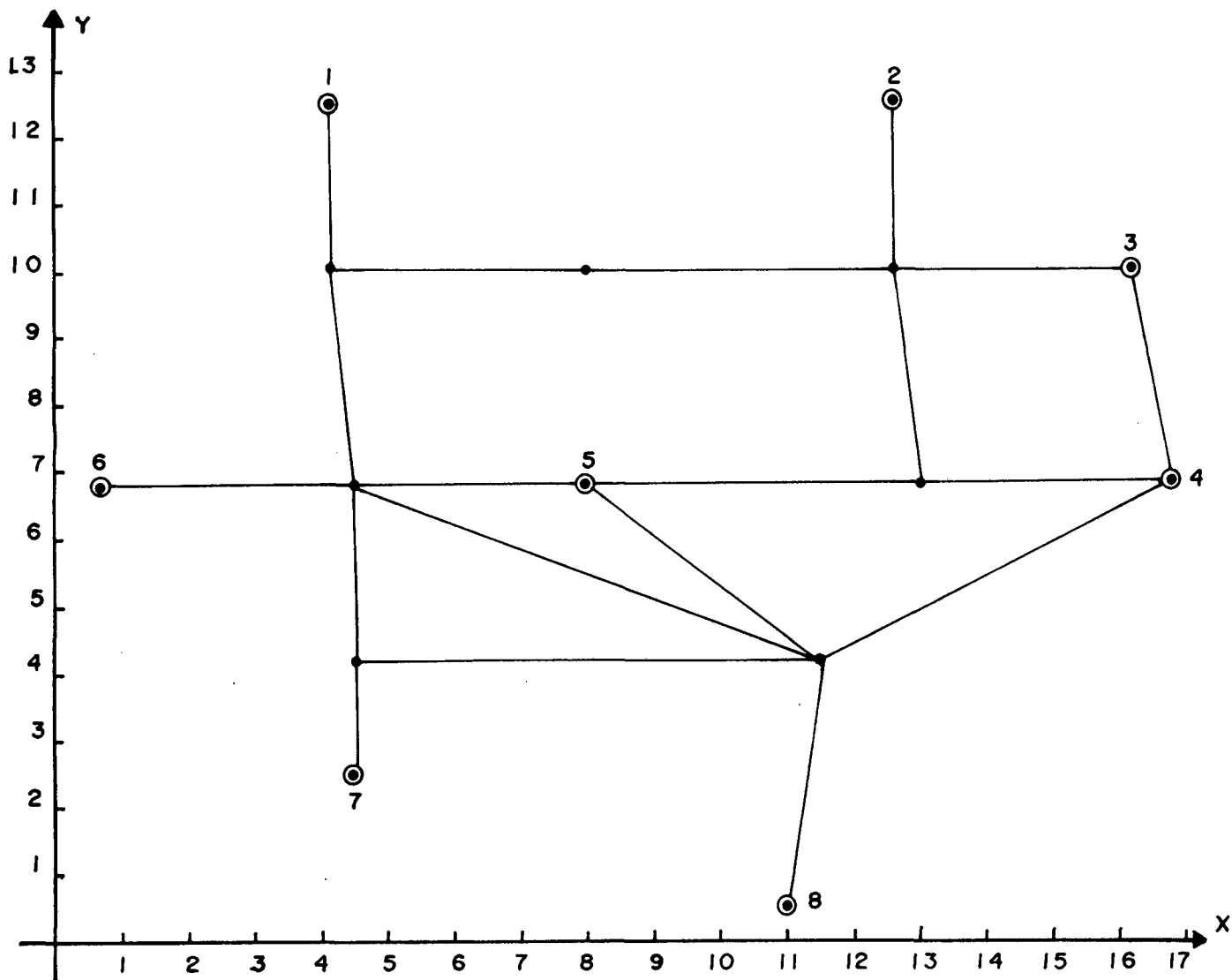


FIGURA 7.1 - Representação do exemplo 2 num sistema de coordenadas cartesianas.

(2) Representação dos links através de pontos do plano cartesiano:

Para facilitar a análise de dispersão cada segmento

representativo de links foi substituído pelo seu ponto médio. Dessa forma obtém-se um diagrama de dispersão dos links da rede viária. A figura 7.2 ilustra o exemplo 2.

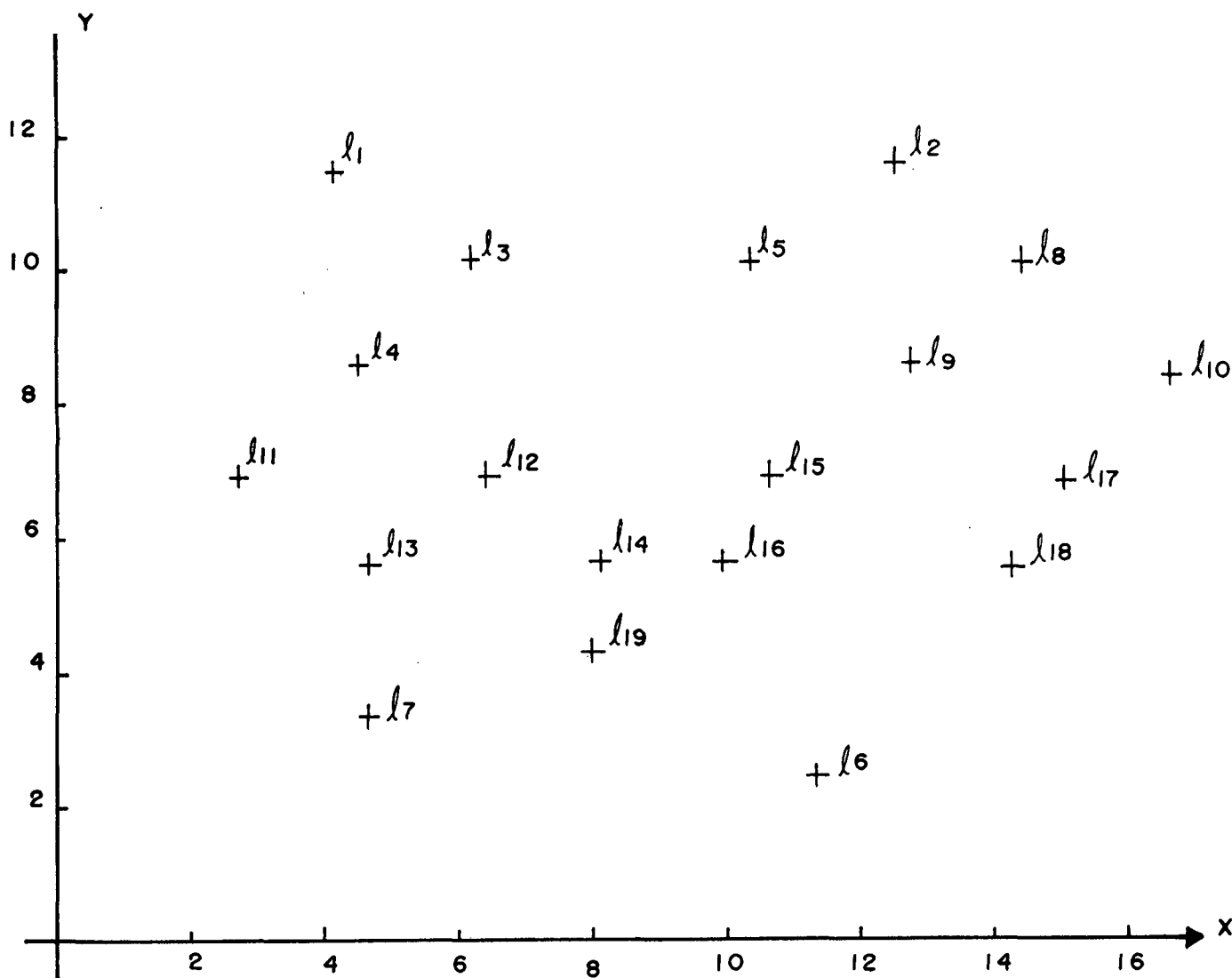


FIGURA 7.2 - Diagrama de dispersão dos links do ex. 2.

## (3) Cálculo da dispersão:

Dado um conjunto de links, tem-se agora associado a ele um conjunto de pontos do plano cartesiano, ou um diagrama de dispersão para este conjunto. Com este diagrama pode-se calcular uma medida de dispersão (ver por exemplo Moretin e Bussab, 1981). Em algumas situações, só a visualização do diagrama já possibilita um diagnóstico. No entanto pode-se calcular, por exemplo,

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (7.1)$$

onde  $S_x$  é o desvio padrão; " $x_i$ " é a abscissa do ponto que representa o link; " $\bar{x}$ " é a média e  $n$  é o número de links usados na análise.

Pode-se encontrar o desvio padrão tomando como referência o eixo dos "y", de forma semelhante.

Para o exemplo 2 em análise tem-se para o conjunto de links  $A = \{l_8, l_{12}, l_{15}, l_9, l_{16}, l_5\}$  os seguintes valores:

$$S_x = 2,79$$

$$S_y = 1,86$$

Para o conjunto de links  $B = \{l_8, l_{18}, l_{19}, l_{17}, l_{16}, l_{14}\}$  tem-se os seguintes valores:

$$S_x = 3,28$$

$$S_y = 2,01$$

Portanto o conjunto B apresenta maiores valores nas medidas de dispersão. De fato as estimativas apresentadas quando utiliza-se o conjunto B são melhores que as estimativas encontradas quando usa-se o conjunto A (ver tabelas A1.2 e A4.2(b)).

Portanto verificou-se que :

- quando as seqüências CSI apresentam uma maior

dispersão (analisada através de um gráfico de dispersão), as estimativas são melhores , no caso dos modelos M1 ou M12 e M3;

- em caso contrário, isto é, menor dispersão, as estimativas são melhores, no caso do modelo M2.

Como o modelo M2 não usa as contagens volumétricas nas restrições, uma maior dispersão não é obviamente necessária, como no caso dos modelos M1 , M12 e M3. Observa-se aqui, que a maior ou menor dispersão , não serve isoladamente como um bom parâmetro para identificar se uma seqüência de links , é "melhor" ou "pior" que outra, para um determinado modelo. Isto foi observado, diante de vários exemplos analisados. No entanto, esta análise mostrou-se válida para ajudar a decisão de usar ou não a setorização.

### 7.6.3 - Conclusões.

Diante dos testes acima pode-se concluir que:

1) A setorização pode ser usada para modelos com estrutura e comportamento semelhantes aos modelos M1 , M12 e M3, somente quando a seqüência de links definida apresenta uma dispersão maior que a seqüência de links definida sem a setorização.

2) Usando a setorização, indiretamente pode-se concluir que mais contadores serão alocados aos setores com maior potencial de produção e/ou atração de viagens. Portanto a setorização pode ser usada para modelos com a estrutura semelhante ao M2, pois este apresenta uma estimativa de matriz O-D de viagens que é consistente com o potencial de produção e\ou atração de viagens .

## 7.7 - Considerações Finais.

Neste capítulo apresentaram-se vários testes que foram utilizados para a verificação da eficiência do novo método, proposto no capítulo anterior. Várias conclusões e observações foram feitas no decorrer de todo o capítulo. Essas considerações foram sempre baseadas em resultados estatísticos, portanto válidas para a presente situação.

Verificou-se através destes testes que cada etapa do método atinge plenamente seus objetivos.

Pode-se, portanto, dizer que o novo método é:

- operacional, pois foi facilmente aplicado e implementado à vários exemplos representativos.

- flexível, pois pode ser usado com qualquer modelo para estimar matrizes O-D de viagens (em particular foi testado com 3 modelos).

- simples, pois as medidas e considerações usadas são conceitos simples da Teoria da Informação e da Estatística.

A sistemática introduzida pelo novo método permite utilizá-lo praticamente para qualquer rede viária. Não é recomendável em redes, cuja distribuição de probabilidades  $P(X)$ , definida em 6.2.4 é uniforme, pois neste caso todos os links tem a mesma classificação. Assim, a escolha dos links seria baseada somente no referencial qualitativo. Na prática é muito difícil esta situação ocorrer. Portanto, este novo método apresenta uma sistemática que não atinge uma solução otimizada, mas é capaz de levar a soluções práticas satisfatórias.

## **CAPÍTULO VIII**

### **CONCLUSÕES**

Este trabalho situou bem o sistema de transporte como um sistema complexo. Constatada a complexidade do sistema de transporte, procurou-se identificar e reconhecer as limitações e dificuldades, decorrentes do estudo de um sistema complexo. A partir daí diagnosticou-se que a implantação de um sistema de transporte deve ser baseada em um plano que racionalize a aplicação dos recursos disponíveis, otimizando os investimentos.

Neste capítulo apresenta-se uma avaliação geral deste trabalho, destacando-se as contribuições científicas para a área na qual está inserido, e as futuras pesquisas que poderão ser desenvolvidas baseadas nos novos modelos do capítulo IV e no novo método do capítulo VI.

#### **8.1 - Contribuições Oriundas dos Novos Modelos.**

No capítulo IV introduziram-se novos modelos para estimar matrizes O-D de viagens que utilizam as contagens volumétricas de tráfego. Os modelos que utilizam as contagens volumétricas de tráfego, na sua calibração, são, geralmente atraentes pois esses dados podem ser obtidos com poucos recursos humanos e financeiros. Os novos modelos, do



ponto de vista da autora, são atraentes pois trazem as seguintes contribuições, além da utilização das contagens volumétricas de tráfego:

( 1 ) - Utilização da entropia condicional  $H(Y/X)$  para reduzir a dificuldade existente em modelos que consideram todos os micro-estados com a mesma probabilidade de ocorrência (ver por exemplo Wilson, 1970).

De fato, usando a entropia condicional  $H(Y/X)$  ao invés da entropia  $H(X)$ , a probabilidade de ocorrência de uma distribuição (ver secção 4.6) é definida com probabilidades condicionais. Isto limita o número de micro-estados, isto é, os  $T_{ij}$  têm os seus valores limitados a valores máximos diante de dados disponíveis ( $W_{ij}$ ).

( 2 ) - Utilização de contagens volumétricas para melhorar a precisão da estimativa em modelos consistentes com os dados de produção e atração de viagens.

Os modelos mais simples, que são consistentes com os dados de produção ( $O_i$ ) e atração ( $D_j$ ), utilizam uma restrição de custo para obter uma melhor precisão. O modelo M2 não usa restrições de custos. A melhoria da precisão é obtida pela introdução das contagens volumétricas de alguns links da rede viária, na forma de uma matriz de valores máximos (matriz definida na secção 4.2), introduzida na função objetivo.

( 3 ) - Utilização de dados de produção e atração para melhorar a precisão das estimativas geradas por modelos consistentes com as contagens volumétricas.

O modelo de Willumsen, consagrado na literatura, neste trabalho denotado por M1, não usa os dados de produção e atração de viagens. O modelo M3, que tem uma estrutura semelhante, prevê a utilização desses dados, quando disponíveis, através da matriz de valores máximos ( $W_{ij}$ ). Isto evidentemente acrescenta mais informações para efeitos

da estimativa da matriz O-D de viagens.

A matriz de valores máximos, introduzida neste trabalho pode ser usada para definir uma matriz "a priori". As estimativas geradas são melhores e isto significa uma melhoria na precisão (ver testes com o modelo M1 na secção 5.7).

( 4 ) - Adaptação da teoria de problemas multi-proporcionais (ver Murchland, 1977 e 1978) para calibrar modelos, quando utiliza-se uma alocação tudo ou nada.

A teoria de problemas multi-proporcionais já é usada na calibração do modelo M1. Este trabalho apresenta uma adaptação para a calibração do M3.

De fato, pode-se escrever do modelo M1 que

$$T_{ij} = t_{ij} f(u) \quad (8.1)$$

onde

$$f(u) = u \text{ e}$$

$$u = \prod_k X_k^p \quad (\text{ver secção 2.4.3}).$$

Do modelo M3 tem-se:

$$T_{ij} = W_{ij} f(u) \quad (8.2)$$

onde

$$f(u) = \frac{1}{1 + u} \text{ e}$$

$$u = \prod_k X_k^p .$$

Portanto a calibração do novo modelo apresenta uma adaptação para este caso onde a função  $f(u) = u$  foi trocada por  $f(u) = 1/(1+u)$  (ver secção 4.5).

Essas são as contribuições básicas oriundas dos novos modelos. Em decorrência dessas contribuições, obtém-se uma

visão para novas pesquisas, descritas na secção seguinte.

## 8.2 - Novas Pesquisas Baseadas nas Novas Contribuições.

É natural que os resultados trazidos por uma pesquisa científica, abram novas visões para pesquisas futuras. Neste contexto destacam-se:

( 1 ) - Incorporação total ou parcial de informações "macro-estados" na função objetivo de modelos que utilizam a maximização da entropia. Isto é viável considerando-se que a entropia condicional foi usada de forma conveniente e operacional nos modelos M2 e M3.

( 2 ) - Adaptação da teoria sobre problemas multi-proporcionais para calibrar o M3 usando-se outros tipos de alocação de tráfego ( por exemplo uma alocação equilibrada).

( 3 ) - Generalização da teoria de problemas multi-proporcionais.

Um problema multi-proporcional pode ser escrito como:

Encontrar  $T_j$ ,  $j \in J$ , sabendo-se que

$$\sum_j p_{kj} T_j = S_k$$

$$T_j = f(u) C_j$$

onde

$T_j$  é um valor ajustado de  $C_j$ ,  $C_j > 0$  e  $j \in J$ .

$$p_{kj} = \begin{cases} 1, & \text{se } T_j \text{ é uma parcela da soma } S_k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$f(u) = u \quad \text{e} \quad u = \prod_{k \in K_j} a_k^{p_{kj}} .$$

Uma generalização seria usar  $f(u)$  como uma função qualquer definida convenientemente.

Salienta-se que essa seria uma pesquisa que envolveria muita ferramenta matemática (por exemplo um estudo sobre os resultados de programação convexa como os apresentados em Rockafellar, 1973).

Os resultados dessa pesquisa poderiam ser úteis na calibração de outros modelos.

### **8.3 - Contribuições Oriundas do Novo Método.**

Sabe-se que os métodos encontrados na literatura, que definem uma localização de postos de contagens volumétricas, não apresentam uma sistemática, que atendam os diversos modelos que estimam uma matriz O-D de viagens.

Este novo método, na opinião da autora, é um método interessante e atraente pois atinge o seu objetivo principal (alocar postos de contagens volumétricas para coletar dados que contenham mais informações para a estimativa de matrizes O-D de viagens), e possui algumas propriedades que o tornam aplicável em qualquer região. Essas propriedades básicas são:

**Simplicidade** - é um método simples pois não introduz na sua sistemática ferramentas complicadas. Todas as ferramentas usadas são oriundas da Teoria da Informação e da Estatística.

**Operacionalidade** - Sua operacionalidade foi constatada através da implementação simples de vários exemplos

simulados. Em todos os exemplos, as soluções práticas apresentadas são boas, isto é, as contagens volumétricas dos conjuntos de links definidos produzem boas estimativas.

**Flexibilidade** - A flexibilidade deste método é evidenciada em vários momentos. Por exemplo, quando incorpora o fato de utilizar-se qualquer modelo para estimar a matriz O-D de viagens. Também a flexibilidade é evidenciada quando admite a incorporação de links que já tem contadores instalados; quando o planejador define seus critérios de eliminação e seus critérios de desempates.

**Praticidade** - Usa-se o termo "prático" para caracterizar a propriedade do novo método de usar informações disponíveis, preocupando-se com a sistematização dos recursos disponíveis.

**Utilidade** - Este método será "útil" para o planejador e/ou pesquisador que optar por modelos para estimar uma matriz O-D de viagens que usam as contagens volumétricas de tráfego. De fato a sistemática introduzida neste método produz um conjunto de links, adequado aos recursos disponíveis, cujas contagens volumétricas aplicadas nos modelos, levam a uma maior precisão.

Portanto, o método como um "todo". já é uma contribuição científica para o contexto em análise .

Pode-se especificamente destacar:

( 1 ) - A sistemática usada induz o planejador ou pesquisador a detalhar alguns aspectos referentes ao modelo para estimar matrizes O-D de viagens que está sendo usado. Isto, ocorre quando solicitam-se algumas características estruturais do modelo para a tomada de algumas decisões ( por exemplo para usar ou não a setorização); também quando solicita-se a definição de um "link atuante". Esta reflexão

proposta pelo método é muito importante, pois pode desincentivar a utilização indiscriminada de pacotes computacionais não adequados a realidade existente.

( 2 ) - A utilização da Teoria da Informação, neste contexto, é uma outra contribuição importante, pois esta teoria já é utilizada na área de transporte e portanto já é acessível.

A secção que segue lista algumas pesquisas futuras que podem ser realizadas decorrentes das contribuições listadas.

#### **8.4 - Novas Pesquisas Baseadas nas Contribuições do Novo Método.**

A sistemática introduzida neste método traz a abertura de vários pontos na modelagem para estimar matrizes O-D de viagens, sobre os quais pode-se fazer as seguintes reflexões.

( 1 ) Sobre Links atuantes - Para saber o que é um link atuante para um determinado modelo é necessário, em alguns casos, um estudo detalhado da estrutura do modelo. Este trabalho analisou somente os modelos M1, M2 e M3 que são modelos entrópicos. Vários outros modelos não entrópicos podem ser analisados.

( 2 ) A definição de outras variáveis aleatórias - Na secção 6.2.4 introduziu-se uma variável aleatória X com sua respectiva distribuição de probabilidades, que se tornou um ponto básico da sistemática do método. Reconhece-se, no entanto, que o estudo detalhado para a obtenção da definição de um link atuante numa específica classe de modelos pode resultar na definição de uma nova variável aleatória. Isto

evidentemente traria novas contribuições.

#### 8.5 - Outras Sugestões.

Tem-se tornado uma preocupação da área de planejamento de transportes o uso indiscriminado de modelos não adequados a realidade existente (ver por exemplo Ulysséa Neto 1992). Para países com dificuldades econômicas, como é o caso do Brasil, deve-se dar muita atenção a este fato, pois a inadequação de modelos além de levar a resultados com pouca precisão, vai trazer ônus financeiros desnecessários.

Um método como o desenvolvido pelo pacote "MVESTM" (ver Logie e Hynd, 1990) pode trazer algumas dificuldades para ser aplicado, por exemplo no Brasil, pois exige uma variedade de dados muito grande, que na maioria das vezes não estão disponíveis. A sua aplicação necessitaria de muitos recursos financeiros além de recursos humanos para a coleta de dados.

Diante dessas colocações, salienta-se a importância de uma "classificação geral dos modelos para estimar uma matriz O-D de viagens que utilizam as contagens volumétricas de tráfego". Esta classificação poderia ser feita de acordo com as propriedades estruturais dos modelos. A partir daí, novos modelos poderiam ser enquadrados numa determinada classe automaticamente. Isto evidentemente iria auxiliar a escolha de modelos mais adequados para situações específicas, obtendo-se assim bons resultados e otimizando os investimentos.

## ANEXO I

### DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS

#### A1 - Introdução.

No decorrer deste trabalho várias redes simuladas foram criadas para exemplificar diversas situações. Vários programas foram desenvolvidos para facilitar a implementação dos modelos propostos e do método de alocação de contadores volumétricos de tráfego. Isto resultou uma seqüência de programas auxiliares mostrados na figura A.1 e descritos na secção A2.

Na secção A3 descreve-se o programa COB, que implementa o algoritmo de cobertura proposto em Flemming (1993).

Os diversos programas auxiliares descritos na secção A2 foram agrupados convenientemente gerando o programa SOFT que prepara os dados dos exemplos simulados, isto é, gera os arquivos de entrada para os modelos M1, M2 e M3. Este programa está descrito na secção A4.

As secções finais A5, A6, e A7 descrevem os programas M1, M2 e M3 respectivamente. Esses programas implementam os modelos M1, M2 e M3 (ver secções 2.4.3, 4.4.2 e 4.5.2 respectivamente).



## A2 - Descrição dos programas auxiliares.

A figura A.1 lista os programas auxiliares com suas respectivas ligações. As ligações de entrada e saída da figura representam arquivos de entrada e saída respectivamente.

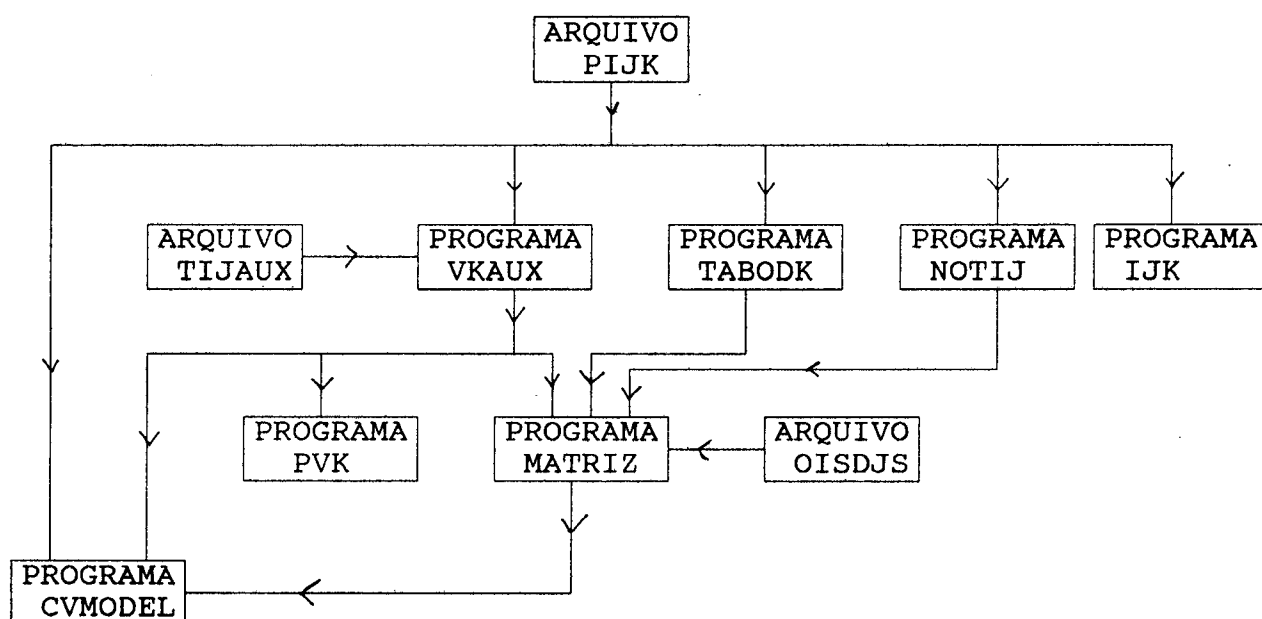


FIGURA A.1 -Ligações entre os programas auxiliares.

Os programas listados utilizam pelo menos um dos seguintes arquivos de dados de entrada:

- (1) - PIJK = arquivo que contém as proporções de viagens entre "i" e "j" que usam o link  $l_k(p_{ij}^k)$ .
- (2) - OISDJS = arquivo que contém os dados de produção ( $O_i$ ) e atração de viagens ( $D_j$ ).
- (3) - TIJAUX = arquivo que contém a matriz O-D de viagem observada.

Todos esses arquivos são de acesso seqüencial e não

formatados.

Os programas listados na figura A.1 são usados como subprogramas de outros programas que serão descritos nas secções seguintes. Uma descrição resumida de cada um é feita nas subsecções seguintes.

#### A2.1 - Programa VKAUX.

**Objetivo:** Encontrar as contagens volumétricas a partir de uma alocação de tráfego conhecida e de uma matriz O-D observada.

**Dados de entrada:**

- (1) N = número de zonas;
- (2) M = número de links da rede viária;
- (3)  $p_{ij}^k$  = proporção de viagens entre "i" e "j" que usam o link  $l_k$  ( $i, j = 1, \dots, N$  e  $k = 1, \dots, M$ ).
- (4)  $[T_{ij}]$  = matriz O-D de viagens observada.

Os dados (3) e (4) são fornecidos pelos arquivos PIJK e TIJAUX respectivamente.

**Descrição:** Este programa usa as equações fundamentais

$$Vl_k = \sum_{ij} p_{ij}^k T_{ij} \quad (k = 1, \dots, M)$$

para calcular os  $Vl_k$  (contagens volumétricas observadas). Os valores encontrados são arquivados num arquivo de saída denotado por AUXVK. Este arquivo é usado pelos programas PVK, MATRIZ e CVMODEL.

## A2.2 - Programa IJK.

**Objetivo:** Dado um conjunto de links selecionar os valores das proporções de viagens entre "i" e "j" que usam estes links.

### Dados de entrada:

- (1) N = número de zonas;
- (2) M = número de links da rede viária;
- (3)  $p_{ij}^k$  = proporção de viagens entre "i" e "j" que usam o link  $l_k$  ( $k = 1, \dots, M$ ) (arquivo PIJK);
- (4) NL = número de links selecionados e
- (5) {k} = conjunto dos "k" correspondentes aos links selecionados.

Os dados (4) e (5) são fornecidos via teclado.

**Descrição:** Este programa cria uma seqüência de links, denotada por  $KL(L)$ ,  $L = 1, \dots, NL$ , referentes aos links selecionados. Com esta nova seqüência define um arquivo PIHK com os valores dos  $p_{ij}^k$  correspondentes aos links  $KL(L)$ ,  $L = 1, \dots, NL$ .

O arquivo PIHK é usado pelos programas que implementam os modelos M1 e M3 .

## A2.3 - Programa TABODK.

**Objetivo:** Listar os pares O-D associados a cada link  $l_k$  da rede viária.

**Dados de entrada:**

- (1) N = número de zonas da área em estudo;
- (2) M = número de links da rede viária;
- (3)  $p_{ij}^k$  = proporção de viagens entre "i" e "j" que usam o link  $l_k$  ( $k=1, \dots, M$ ) (arquivo PIJK).

**Descrição:** Este é um programa simples que gera um arquivo muito importante, o arquivo ODVK. A lista fornecida pelo arquivo PIJK é percorrida M vezes, para selecionar os pares associados a cada link  $l_k$ , isto é, para selecionar os (i,j) tais que  $p_{ij}^k = 1$ .

Este programa fornece uma nova lista, onde se tem para cada link os seus respectivos pares O-D associados. Esta lista fica armazenada no arquivo ODVK.

O arquivo ODVK é usado nos programas "MATRIZ".

O programa TABODK é usado como subprograma em COB e SOFT, que serão descritos nas secções A3 e A4 respectivamente.

**A2.4 - Programa NOTIJ.**

**Objetivo:** Calcular o número de pares O-D associados a cada link da rede viária.

**Dados de Entrada:**

- (1) N = número de zonas da área em estudo;
- (2) M = número de links da rede viária e
- (3)  $p_{ij}^k$  = proporção de viagens entre "i" e "j" que usam o link  $l_k$  ( $k = 1, \dots, M$ ).

Os dados (3) são fornecidos através do arquivo PIJK.

**Descrição:** Este programa realiza simplesmente a contagem dos pares  $(i,j)$  associados a cada link  $l_k$ . A variável  $NV(K)$ ,  $k = 1, \dots, M$  é criada para armazenar o número de pares associados a cada link  $l_k$  da rede viária. Um arquivo de saída, denotado por TAB3, armazena esses dados.

Este programa, apesar de simples, foi utilizado em vários momentos deste trabalho. Na secção 6.2.4 os dados fornecidos por este programa foram utilizados para definir a variável aleatória "X". Esta variável aleatória é usada na classificação dos links, numa das etapas do método de alocação de contadores volumétricos de tráfego, descrito no capítulo VI.

O programa COB, descrito a seguir na secção A3, utiliza este programa como um subprograma.

O programa MW2SH utiliza, também, o arquivo TAB3 como arquivo de entrada.

#### A2.5 - Programa PVK.

**Objetivo:** Dado um conjunto de links, selecionar as contagens volumétricas de tráfego desses links.

**Dados de entrada:**

- (1)  $M$  = número de links da rede viária;
- (2)  $NL$  = número de links selecionados;
- (3)  $\{k\}$  = conjunto dos "k" correspondentes aos links selecionados.
- (4)  $Vl_k$  = contagens volumétricas de todos os links da rede viária

Os dados (2) e (3) são fornecidos via teclado. Os dados (4) são fornecidos através do arquivo AUXVK gerado pelo programa VKAUX.

**Descrição:** Este programa cria uma seqüência de links, denotada por  $KL(L)$   $L = 1, \dots, NL$ , referentes aos links selecionados. Com esta nova seqüência, separa as contagens volumétricas, criando um arquivo de saída, denotado por VR, para armazenar a nova lista de contagens volumétricas. Este arquivo de saída é usado pelo programa M1.

## A2.6 - Programas MATRIZ.

Nesta secção serão descritos os programas que definem as matrizes O-D de valores máximos definidas na secção 4.2.

### Programa MATRIZW1.

**Objetivo:** definir a matriz O-D de valores máximos denotada por W1, de acordo com a definição 1 da secção 4.2.1.

### Dados de entrada:

- (1) M = número de links da rede viária;
- (2) N = número de zonas;
- (3) MN = número total de pares associados a todos os links da rede;
- (4)  $O_i$  = número de viagens originadas na zona "i" e
- (5)  $D_j$  = número de viagens destinadas à zona "j".

Os dados (4) e (5) são fornecidos pelo arquivo OISDJS.

**Descrição:** Este programa encontra os  $a_{ij}$  da matriz W1, de acordo com (4.1) da secção 4.2. A matriz encontrada é apresentada via teclado.

### Programa MW2SH.

**Objetivo:** Definir a matriz O-D de valores máximos, denotada por  $W_2$ , de acordo com a definição 2 da secção 4.2.1.

#### Dados de entrada:

- (1)  $M$  = número de links;
- (2)  $N$  = número de zonas;
- (3)  $MN$  = número total de pares associados a todos os links da rede;
- (4)  $O_i$  = número de viagens originadas em "i";
- (5)  $D_j$  = número de viagens destinadas à "j";
- (6)  $NL$  = número de links que serão usados;
- (7)  $\{k\}$  = conjunto dos "k" dos links usados;
- (8) Contagens volumétricas dos links selecionados;
- (9) Pares associados a cada link selecionado;
- (10) número de pares associados a cada um dos links selecionados.

Os dados (4) e (5) são fornecidos pelo arquivo OISDJS, os dados (8) pelo arquivo AUXVK, os dados (9) pelo arquivo ODVK e os dados (10) pelo arquivo TAB3.

**Descrição:** Este programa encontra a matriz  $W_2$ , de acordo com (4.2) da secção 4.2. Os arquivos de saída são:

WIJ - apresenta a matriz  $W_2$  e  
 TIJI - apresenta a matriz  $W_2/2$ .

O arquivo WIJ é usado nos programas CVMODEL, M2 e M3 e o arquivo TIJI é usado no programa M3.

### Programa MATRIZW2.

**Objetivo:** definir a matriz O-D de valores máximos, denotada por  $W_2$ , de acordo com a definição 2 da secção 4.2.1,

incorporando as alterações previstas na secção 4.2.2.

**Dados de entrada:** Para este programa utiliza-se a mesma lista de dados de entrada do programa anterior.

**Descrição:** Este programa complementa o programa MW2SH, descrito anteriormente. Neste caso as alterações previstas na secção 4.2.2 são incorporadas. A matriz de saída W2 (arquivo WIJ ) é uma matriz mais refinada, isto é, obtém-se uma matriz mais próxima da matriz observada.

### **Programa MATRIZW3**

**Objetivo:** Definir a matriz O-D de valores máximos, denotada por W3, de acordo com a definição 3 da secção 4.2.1, incorporando as alterações previstas na secção 4.2.2.

**Dados de entrada:** Esse programa utiliza a listagem de dados do programa MW2SH, com exceção dos dados de produção e atração de viagens listados nos itens (4) e (5). Quanto ao conjunto de links selecionados tem-se uma diferença , isto é; os links selecionados devem pertencer a um conjunto cobertura (ver secção 4.2.1). Este conjunto cobertura fica armazenado no arquivo COLINKS do programa COB (ver A3).

**Descrição:** Este programa encontra a matriz W3, de acordo com a definição 3 de 4.2.1. Salienta-se que, neste caso, não são utilizados os dados de produção e atração de viagens. Os arquivos de saída são WIJ e TIJI, que contém a matriz W3 e a matriz W3/2 respectivamente. Esses arquivos são usados pelos modelos M1, M2 e M3.

### **A2.7 - Programa CVMODEL.**

**Objetivo:** Este programa encontra a somas  $DV1_k$  do algoritmo



de calibração do modelo M3 (item (c) da secção 4.5.2).

**Dados de entrada:**

- (1) N = número de zonas;
- (2) M = número de links da rede viária;
- (3)  $p_{ij}^k$  = proporção de viagens entre "i" e "j" que usam o link  $l_k$  ( $k=1, \dots, M$ );
- (4) matriz O-D de valores máximos;
- (5)  $Vl_k$  = contagens volumétricas de tráfego dos links da rede viária e
- (6) links selecionados.

O arquivo PIJK fornece os dados (3), o arquivo WIJ os dados (4), o arquivo AUXVK os dados (5) e os dados (6) são fornecidos via teclado.

**Descrição:** Para implementar o algoritmo descrito em 4.5.2, necessitam-se dos valores  $DVl_k$  que são definidos por

$$DVl_k = \sum_{ij} p_{ij}^k W_{ij} - Vl_k$$

Portanto, este programa calcula os  $DVl_k$  para os "k" selecionados. Os valores encontrados são armazenados no arquivo M5CV que é usado pelo programa M3.

**A3 - Descrição do programa COB.**

**Objetivo:** Definir os links que formam o conjunto cobertura de uma matriz O-D de viagens.

**Dados de entrada:**

- (1) N = número de zonas da área em estudo;
- (2) M = número de links da rede viária;

- (3) MN = número total de pares associados a todos os links da rede;
- (4) NV(K) = número de pares associados a cada link  $l_k$  e
- (5) pares O-D associados a cada link.

Os dados (4) e (5) são fornecidos através dos arquivos TAB3 e ODVK respectivamente. O arquivo TAB3 é gerado pelo programa NOTIJ (ver secção A2.4) e o arquivo ODVK é gerado pelo programa TABODK (ver secção A2.3).

**Descrição do algoritmo:** O algoritmo deste programa é o algoritmo apresentado em Flemming (1993). Neste algoritmo os links são escolhidos um a um, conforme uma determinada ordenação. A ordenação é revisada a cada etapa, e é feita considerando-se o número de pares associados a cada link (NV(K),  $K = 1, \dots, M$ ) e o número de intersecções de pares de um link com os demais links ainda não escolhidos (INT(K)). O processo termina quando todos os pares O-D estão cobertos.

O conjunto cobertura encontrado é armazenado no arquivo COLINKS. Este arquivo é utilizado pelo programa MATRIZW3 (ver secção A2.6).

A figura A.2 (no final deste anexo) apresenta o fluxograma do algoritmo.

#### **A4 - Descrição do programa que prepara os dados dos exemplos simulados.**

Vários exemplos simulados foram usados para o desenvolvimento deste trabalho. Para facilitar a preparação desses exemplos, desenvolveu-se um programa computacional que a partir de três arquivos básicos (PIJK, TIJAUX, OISDJS), define os arquivos de saída WIJ, TIJI e M5CV, que são usados nos programas que implementam os modelos M1, M2 e M3.

Para estruturar esse programa utilizaram-se os programas auxiliares descritos na secção A2 como subprogramas secundários.

Este programa foi desenvolvido para preparar os dados de exemplos simulados, mas pode ser adequado também para exemplos reais.

O programa tem três subprogramas principais que são ativados, conforme a opção do usuário, de usar a definição 1,2 ou 3 da secção 4.2 (matriz de valores máximos).

#### Estrutura geral do programa SOFT.

O quadro apresentado na figura A.3 mostra a seqüência principal das operações do programa SOFT.

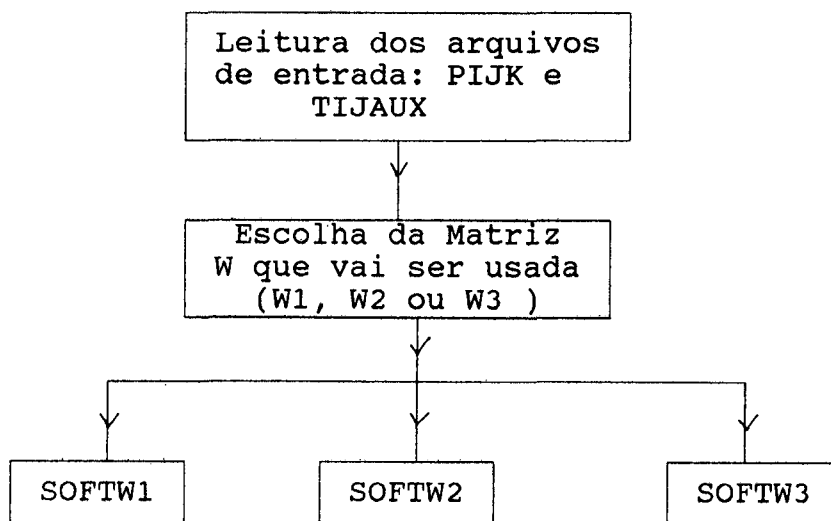


FIGURA A.3 - Seqüência do programa SOFT

A seguir, lista-se as tarefas realizadas pelos três subprogramas principais:

- (1) Leitura do arquivo OISDJS que contém os dados de produção ( $O_i$ ) e atração ( $D_j$ ) de viagens;

- (2) cálculo das contagens volumétricas de todos os links da rede (ver programa VKAUX);
- (3) cálculo da matriz O-D de valores máximos
  - (3.1) Cálculo de  $W_1$  (ver programa MATRIZW1);
  - (3.2) Cálculo de  $W_2$  (ver programa MATRIZW2) ou
  - (3.3) Cálculo de  $W_3$  (ver programa MATRIZW3);
- (4) estabelecimento do arquivo de saída WIJ que contém a matriz O-D de valores máximos .
- (5) cálculo de  $W/2$ , onde  $W$  é a matriz  $W_1$ ,  $W_2$  ou  $W_3$ ;
- (6) estabelecimento do arquivo de saída TIJI que contém a matriz  $W/2$ ;
- (7) leitura do número de links que serão usados nas restrições dos modelos e leitura dos "k" respectivos;
- (8) estabelecimento do arquivo VR (ver programa PVK) que contém as contagens volumétricas dos links selecionados;
- (9) estabelecimento do arquivo PIHK (ver programa IJK) que contém os pares associados a cada link escolhido e
- (10) estabelecimento do arquivo M5CV (ver programa CVMODEL) que contem as somas  $DV_1$  usadas no modelo M3.

Observa-se que a etapa (1) é usada somente pelos subprogramas SOFTW1 e SOFTW2, pois o SOFTW3 não usa os dados de produção e atração de viagens. A etapa (3.1) é específica do SOFTW1, a etapa (3.2) do SOFTW2 e a etapa (3.3) do SOTW3.

Este programa fornece também uma lista com os links não atuantes (ver secção 5.6.2).

**A5 - Descrição do programa que implementa o modelo M1.**

**Objetivos:** - Implementar o algoritmo de calibração proposto por Willumsen (1981a), do modelo denotado neste trabalho por M1.

- Comparar a matriz estimada com a matriz observada através das estatísticas phi-normalizada ( $\phi$ ) e índice de dissimilaridade (ID).

**Dados de entrada:**

- (1) N = número de zonas;
- (2) LINK = caracter que identifica o exemplo, no arquivo de saída DAM1;
- (3) matriz "a priori";
- (4) Z = número de contagens volumétricas usadas nas restrições;
- (5) contagens Volumétricas dos links escolhidos (arquivo VR);
- (6) proporções das viagens entre "i" e "j" que usam os links escolhidos (arquivo PIHK);
- (7) DELTA = Valor de tolerância para o critério de parada e
- (8) Matriz O-D observada ( arquivo TIJAUX).

**Descrição:** Este programa está estruturado de acordo com as seguintes etapas:

- (1) Leitura dos dados de entrada (1) a (7);
- (2) desenvolvimento do algoritmo de implementação do modelo M1 (ver por exemplo secção 5.2.3 de Willumsen (1981a); Lam e Lo (1991) p.88 a 90);
- (3) leitura dos dados de entrada (8);
- (4) cálculo das estatísticas phi-normalizada e índice de dissimilaridade e
- (5) criação dos arquivos de saída:

- DAM1 - contém os valores das estatísticas e número de iterações
- TIJ - contém a matriz estimada.

#### A6 - Descrição do programa que implementa o modelo M2.

**Objetivos:** - Implementar o algoritmo iterativo apresentado na secção 4.4.2, do capítulo IV, para encontrar a matriz O-D de viagens, estimada pelo modelo M2.

- Comparar a matriz estimada com a matriz observada através das estatísticas phi-normalizada e índice de dissimilaridade.

#### Dados de entrada:

- (1) N = número de zonas;
- (2) LINK = caracter que identifica o exemplo, no arquivo de saída DAM2;
- (3) matriz O-D de valores máximos (arquivo WIJ);
- (4) dados de produção e atração de viagens ( arquivo OISDJS);
- (5)  $\epsilon$  = valor de tolerância para o critério de parada;
- (6) ITE = número de iterações de tolerância para critério de parada e
- (7) matriz O-D observada ( arquivo TIJAUX).

**Descrição:** Este programa pode ser sumarizado nas seguintes etapas:

- (1) Leitura dos dados de entrada (1) a (6);
- (2) etapas do procedimento descrito na secção 4.4.2;
- (3) leitura do arquivo TIJAUX que contém os dados de entrada (7) ;
- (4) cálculo das estatísticas phi-normalizada e índice de

dissimilaridade e

(4) estabelecimento dos arquivos de saídas:

- DAM2 - contém as estatísticas phi-normalizada e índice de dissimilaridade e o número de iterações;
- TIJ - contém a matriz estimada.

Observa-se que, nesta implementação, acrescentou-se um critério de parada, em função do número de iterações.

#### A7 - Descrição do programa que implementa o modelo M3.

**Objetivo:** - Implementar o algoritmo apresentado na secção 4.5.2, para encontrar a matriz O-D de viagens, estimada pelo modelo M3;

- Comparar a matriz estimada com a matriz observada através das estatísticas phi-normalizada e índice de dissimilaridade.

#### Dados de entrada:

- (1) N = número de zonas;
- (2) Z = número de links que serão usados nas restrições;
- (3) LINK = caracter para identificar o exemplo no arquivo de saída DAM3;
- (4) proporções de viagens entre "i" e "j" que usam os links escolhidos (arquivo PIHK);
- (5) matriz inicial (arquivo TIJI);
- (6) somas  $DVl_x$  (arquivo M5CV);
- (7) matriz O-D de valores máximos (arquivo WIJ);
- (8) DELTA = valor de tolerância para o critério de parada e
- (9) Matriz observada ( arquivo TIJAUX ).

**Descrição:** A estrutura deste programa pode ser sumarizada nas

seguintes etapas:

- (1) Leitura dos dados de entrada (1) a (8);
- (2) etapas do algoritmo da secção 4.5.2 do item (d) até o final (os itens (a) a (c) foram incluídos em (1) na leitura dos dados);
- (3) leitura da matriz observada (arquivo TIJAUX);
- (4) cálculo das estatísticas phi-normalizada e índice de dissimilaridade e
- (5) estabelecimento dos arquivos de saída:
  - DAM3 - contém dos dados das estatísticas e o número de iterações e
  - TIJ - contém a matriz estimada.



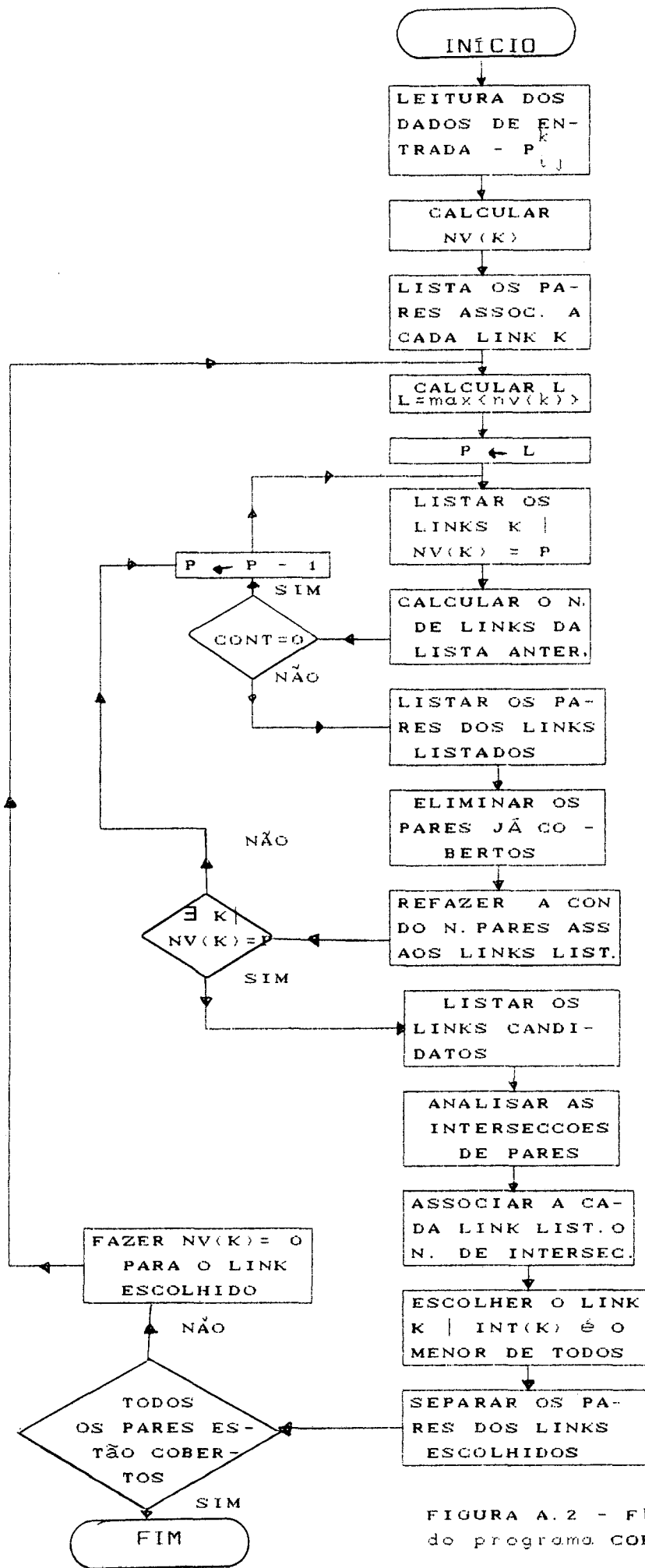


FIGURA A.2 - Fluxograma do programa COB.

ANEXO II

TABELAS

SS		2	3	2, 3	2, 3, 1
LINKS					
M <sup>1</sup>	Φ	0.81968	0.40555	0.09099	0.02798
	ID	29.54550	13.63640	3.77056	1.49783
M <sup>1,2</sup>	Φ	0.45766	0.20580	0.17083	0.10782
	ID	18.93940	11.36360	9.77369	7.50097
M <sup>2</sup>	Φ	0.00005	0.00006	0.00001	0.00001
	ID	0.00244	0.00332	0.00049	0.00049
M <sup>3</sup>	Φ	0.40695	0.26959	0.12684	0.06383
	ID	17.80300	11.83160	5.16682	2.89410

TABELA A1.1 - Sequências SS do exemplo 1.

SS		8, 12, 15 9, 16	8, 12, 15, 9, 16, 5	8, 12, 15, 9, 16, 5, 13	8, 12, 15, 9 16, 5, 13, 4 14, 17	TODOS
M <sup>1</sup>	Φ	1.29789	1.24799	1.12900	1.03048	0.59772
	ID	29.58930	28.37220	27.67590	26.56690	23.78740
M <sup>1,2</sup>	Φ	0.65974	0.62623	0.60627	0.41806	0.42212
	ID	55.94870	52.93230	48.60700	24.03740	24.01750
M <sup>2</sup>	Φ	0.39991	0.40953	0.44504	0.40829	0.41377
	ID	19.34130	19.82750	20.83210	19.70860	20.49800
M <sup>3</sup>	Φ	0.71079	0.66605	0.64646	0.48436	0.51654
	ID	58.82650	55.25750	50.86660	26.51900	28.06920

TABELA A1.2 - Sequências SS do exemplo 2

SS LINKS	3	3, 1	3, 1, 2	3, 1, 2, 4	TODOS
M <sup>1</sup> $\Phi$	1.08723	0.36355	0.35104	0.34226	0.33726
ID	24.35900	15.81200	14.47030	13.93320	13.52870
M <sup>1,2</sup> $\Phi$	0.30734	0.16255	0.17347	0.17165	0.19049
ID	11.53850	6.01578	6.78117	6.76764	8.45156
M <sup>2</sup> $\Phi$	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003
ID	0.00171	0.00171	0.00171	0.00171	0.00171
M <sup>3</sup> $\Phi$	0.25898	0.14743	0.14570	0.14570	0.14832
ID	10.25640	6.14910	6.30883	6.30883	6.88486

TABELA A1.3 (A) - Sequências SS do exemplo 3

SS LINKS	3	3, 4	3, 4, 5	3, 4, 5 2	TODOS
M <sup>1</sup> $\Phi$	1.08723	0.99264	0.75235	0.75254	0.33726
ID	24.35900	21.79490	16.66670	16.66670	13.52870
M <sup>1,2</sup> $\Phi$	0.30734	0.25805	0.22494	0.22494	0.19049
ID	11.53850	9.82906	9.57265	9.57265	8.45156
M <sup>2</sup> $\Phi$	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003
ID	0.00171	0.00171	0.00171	0.00171	0.00171
M <sup>3</sup> $\Phi$	0.25898	0.24008	0.20208	0.20208	0.14832
ID	10.25640	9.79853	8.69131	8.69131	6.88486

TABELA A1.3 (B) - Sequências SS do exemplo 3

SS LINKS	4, 3, 5	4, 3, 5 6, 7	4, 3, 5, 6, 7, 1	TODOS
M <sup>1</sup> $\Phi$	3.04475	1.06759	1.06845	0.95109
ID	39.53590	30.34340	30.18860	23.15640
M <sup>1,2</sup> $\Phi$	0.31662	0.32230	0.31898	0.30793
ID	20.35150	20.35890	19.91300	17.97960
M <sup>2</sup> $\Phi$	0.36061	0.36061	0.36061	0.36061
ID	18.95580	18.95580	18.95580	18.95580
M <sup>3</sup> $\Phi$	0.32195	0.32695	0.32909	0.33728
ID	20.68820	20.62800	20.42320	19.16880

TABELA A1.4 (A) - Sequências SS do exemplo 4

SS	4, 3, 5	4, 3, 5, 1, 2	4, 3, 5, 1, 2, 6	TODOS
M <sup>1</sup>	$\Phi$ 3.04475 ID 39.53590	$\Phi$ 2.74434 ID 38.52830	$\Phi$ 2.34600 ID 45.36700	$\Phi$ 0.95109 ID 23.15640
M <sup>12</sup>	$\Phi$ 0.31662 ID 20.35150	$\Phi$ 0.34248 ID 19.12220	$\Phi$ 0.32893 ID 18.69330	$\Phi$ 0.30793 ID 17.97960
M <sup>2</sup>	$\Phi$ 0.36061 ID 18.95580	$\Phi$ 0.36061 ID 18.95580	$\Phi$ 0.36061 ID 18.95580	$\Phi$ 0.36061 ID 18.95580
M <sup>3</sup>	$\Phi$ 0.32195 ID 20.68820	$\Phi$ 0.36093 ID 20.06060	$\Phi$ 0.35083 ID 19.58280	$\Phi$ 0.33728 ID 19.16880

TABELA A1.4 (B) - Sequências SS do exemplo 4

SS	1, 5, 12 22, 2	1, 5, 12, 22, 2, 4	1, 5, 12, 22, 2, 4, 6	1, 5, 12, 22 2, 4, 6, 27, 8, 14	TODOS
M <sup>1</sup>	$\Phi$ 2.24971 ID 37.97680	$\Phi$ 2.06724 ID 34.99160	$\Phi$ 1.65284 ID 30.47350	$\Phi$ 1.27337 ID 23.57630	$\Phi$ 0.87799 ID 25.39410
M <sup>12</sup>	$\Phi$ 0.43591 ID 26.69070	$\Phi$ 0.39677 ID 24.19700	$\Phi$ 0.33767 ID 20.00520	$\Phi$ 0.26234 ID 15.99840	$\Phi$ 0.19502 ID 10.31320
M <sup>2</sup>	$\Phi$ 0.26242 ID 13.45430	$\Phi$ 0.30031 ID 15.11710	$\Phi$ 0.30866 ID 15.53370	$\Phi$ 0.29948 ID 15.12440	$\Phi$ 0.28336 ID 14.31000
M <sup>3</sup>	$\Phi$ 0.47052 ID 28.70100	$\Phi$ 0.41585 ID 25.26250	$\Phi$ 0.35651 ID 21.04570	$\Phi$ 0.28555 ID 17.05110	$\Phi$ 0.20268 ID 10.72080

TABELA A1.5 (A) - Sequências SS do exemplo 5

SS	1, 5, 12 22, 6	1, 5, 12, 22, 6, 27	1, 5, 12, 22, 4, 6, 2	1, 5, 12, 22, 4, 6, 27, 14, 2, 8	TODOS
M <sup>1</sup>	$\Phi$ 1.83800 ID 33.47600	$\Phi$ 1.52276 ID 28.07340	$\Phi$ 1.65284 ID 30.47350	$\Phi$ 1.27337 ID 23.57630	$\Phi$ 0.87799 ID 25.39410
M <sup>12</sup>	$\Phi$ 0.37472 ID 22.44630	$\Phi$ 0.36155 ID 21.48390	$\Phi$ 0.33767 ID 20.00520	$\Phi$ 0.26234 ID 15.99840	$\Phi$ 0.19502 ID 10.31320
M <sup>2</sup>	$\Phi$ 0.28128 ID 14.41640	$\Phi$ 0.31607 ID 16.10080	$\Phi$ 0.30866 ID 15.53370	$\Phi$ 0.29948 ID 15.12440	$\Phi$ 0.28336 ID 14.31000
M <sup>3</sup>	$\Phi$ 0.40660 ID 24.42610	$\Phi$ 0.37117 ID 22.37140	$\Phi$ 0.35651 ID 21.04570	$\Phi$ 0.28556 ID 17.05110	$\Phi$ 0.20268 ID 10.72080

TABELA A1.5 (B) - Sequências SS do exemplo 5

AL		1	1, 2	1, 2, 3
M1	$\Phi$	1.38680	0.75667	0.02798
	ID	34.09090	27.27270	1.49783
M12	$\Phi$	0.53612	0.48917	0.10782
	ID	20.45450	18.93940	7.50097
M2	$\Phi$	0.00009	0.00004	0.00001
	ID	0.00444	0.00173	0.00049
M3	$\Phi$	0.45406	0.38317	0.06383
	ID	18.18180	16.66667	2,89410

TABELA A2.1 - Sequências AL do exemplo 1

AL		5, 8, 9,	5, 8, 9,	5, 8, 9,	5, 8, 9,
M1	$\Phi$	16, 13	16, 13, 14	16, 13,	16, 13, 14
	ID	14, 3	3, 19, 1, 7		
M12	$\Phi$	1.66138	1.56266	1.56243	1.36269
	ID	35.22650	34.01550	33.98210	34.24830
M2	$\Phi$	0.70670	0.65745	0.65684	0.52656
	ID	62.75980	55.57950	55.59820	40.04810
M3	$\Phi$	0.43760	0.42910	0.42910	0.42689
	ID	20.41790	20.59540	20.59540	20.70200
M3	$\Phi$	0.70084	0.65140	0.65178	0.54240
	ID	62.69350	55.47040	55.50180	40.76280

TABELA A2.2 - Sequências AL do exemplo 2

AL		3	3, 2	3, 2, 4	3, 2,
M1	$\Phi$	4, 1			
	ID				
M12	$\Phi$	1.08723	1.00178	0.99264	0.34226
	ID	24.35900	22.17680	21.79490	13.93320
M2	$\Phi$	0.30734	0.26287	0.28805	0.17165
	ID	11.53850	10.03280	9.82906	6.76764
M3	$\Phi$	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003
	ID	0.00171	0.00171	0.00171	0.00171
M3	$\Phi$	0.25898	0.24008	0.24008	0.14570
	ID	10.25640	9.79853	9.79853	6.30883

TABELA A2.3 - Sequências AL do exemplo 3

AL LINKS	2, 1	2, 1, 6	2, 1, 6 7, 5	2, 1, 6 5, 3
M1 $\Phi$	4.11206	2.66241	1.76430	1.02291
M1 ID	48.74850	47.49590	41.72030	23.57150
M12 $\Phi$	0.36219	0.36241	0.32795	0.32165
M12 ID	22.59710	22.06300	19.71540	18.90040
M2 $\Phi$	0.35717	0.35717	0.35717	0.35717
M2 ID	18.74820	18.74820	18.74820	18.74820
M3 $\Phi$	0.37360	0.36772	0.34945	0.35805
M3 ID	22.84350	22.15300	21.02300	20.57410

TABELA A2.4 - Sequências AL do exemplo 4

AL CANAIS	3, 12, 5, 17, 23	3, 12, 5, 17, 23, 18	3, 12, 5, 17, 23, 18 7	3, 12, 5, 17 23, 18, 7, 1, 26, 13
M1 $\Phi$	2.25427	2.24312	2.24312	1.88223
M1 ID	34.20110	33.99270	33.99260	30.43410
M12 $\Phi$	0.50548	0.49822	0.49819	0.36088
M12 ID	36.80950	35.27940	35.27820	24.50400
M2 $\Phi$	0.27912	0.26637	0.26637	0.29595
M2 ID	14.24260	13.41330	13.41330	15.19920
M3 $\Phi$	0.52475	0.51113	0.51112	0.46017
M3 ID	38.12100	36.36640	36.36600	28.18350

TABELA A2.5 - Sequências AL do exemplo 5

CCP LINKS	3	3, 1	1, 2, 3
M1 $\Phi$	0.40555	0.34253	0.02798
M1 ID	13.63640	11.36360	1.49783
M12 $\Phi$	0.20580	0.21651	0.10782
M12 ID	11.36363	11.36363	7.50097
M2 $\Phi$	0.00007	0.00002	0.00001
M2 ID	0.00333	0.00090	0.00049
M3 $\Phi$	0.26596	0.28030	0.06383
M3 ID	11.83160	11.83160	2.89410

TABELA A3.1 - Sequências CCP do exemplo 1

CCP LINKS	10, 11, 6 7, 18	10, 11, 6, 7, 18, 2	10, 11, 6, 18, 2, 15 7	10, 11, 6, 7, 18, 2, 15, 12, 1, 17
M1 $\Phi$	1.15384	1.06011	1.00351	0.70221
M1 ID	29.25010	29.60430	29.89610	27.04560
M12 $\Phi$	0.60944	0.53610	0.47747	0.44552
M12 ID	43.89630	35.84310	30.48360	24.85270
M2 $\Phi$	0.37881	0.37881	0.37306	0.38362
M2 ID	19.52930	19.52930	19.21660	19.78960
M3 $\Phi$	0.94022	0.73742	0.82358	0.66977
M3 ID	52.67880	44.36480	41.50100	33.17520

TABELA A3.2 - Sequências CCP do exemplo 2

CCP LINKS	1	1, 2	1, 2, 3	1, 2, 3, 5
M1 $\Phi$	1.40511	1.14771	0.34424	0.34303
M1 ID	33.76070	43.36530	14.14620	14.01860
M12 $\Phi$	0.30639	0.19209	0.17354	0.20062
M12 ID	12.42600	9.93742	6.93304	8.98278
M2 $\Phi$	0.10795	0.10795	0.00003	0.00003
M2 ID	5.42814	5.42814	0.00171	0.00171
M3 $\Phi$	0.31059	0.20559	0.14628	0.15102
M3 ID	13.20040	10.73100	6.32582	6.99603

TABELA A3.3 - Sequências CCP do exemplo 3

CCP LINKS	6, 7	6, 7, 3	6, 7, 3, 5	6, 7, 3, 5, 1	6, 7, 3, 5, 1, 2
M1 $\Phi$	2.44510	1.13249	1.13404	1.13859	1.02291
M1 ID	42.82630	30.06490	30.67120	30.48790	23.57150
M12 $\Phi$	0.42793	0.35444	0.35299	0.33079	0.32165
M12 ID	29.08820	22.88090	22.56890	20.82100	18.90040
M2 $\Phi$	0.35717	0.35717	0.35717	0.35717	0.35717
M2 ID	18.74820	18.74820	18.74820	18.74820	18.74820
M3 $\Phi$	0.43173	0.35667	0.35901	0.35393	0.35805
M3 ID	29.33950	23.01890	22.81070	21.91390	20.57410

TABELA A3.4 - Sequências CCP do exemplo 4

CCP	22, 9, 23	22, 9, 23,	22, 9, 23,	22, 9, 23, 5,
CANAIS	5, 1	5, 1, 15	5, 1, 15	1, 15, 2, 12, 28, 7
M1 $\Phi$	2.23775	2.22546	2.22316	1.55052
M1 ID	34.42410	34.19110	34.19090	27.48860
M12 $\Phi$	0.44874	0.45420	0.45664	0.32908
M12 ID	26.94730	27.16250	27.26180	20.08200
M2 $\Phi$	0.26104	0.23491	0.23692	0.26733
M2 ID	13.38910	11.71070	11.82030	13.25960
M3 $\Phi$	0.46645	0.47054	0.47316	0.40149
M3 ID	28.48760	28.42830	28.52490	23.77980

TABELA A3.5 - Sequências CCP do exemplo 5

CSI	2	3	2, 1	3, 1
LINKS				
M1 $\Phi$	0.81968	0.40555	0.75667	0.34254
M1 ID	29.54550	13.63640	27.27272	11.36363
M12 $\Phi$	0.45766	0.20580	0.48917	0.21651
M12 ID	18.93940	11.36363	18.93940	11.36363
M2 $\Phi$	0.00005	0.00007	0.00003	0.00002
M2 ID	0.002442	0.00333	0.00173	0.00089
M3 $\Phi$	0.406945	0.26959	0.38316	0.28029
M3 ID	17.803000	11.83160	16.66667	11.83160

TABELA A4.1 - Sequências CSI do ex. 1 com distribuição setorial (1,0), (1,0), (1,1) e (1,1)

CSI	8, 15, 3,	8, 15, 18	8, 3, 17,	8, 18, 19
LINKS	12, 4	9, 14	9, 4	16, 14
M1 $\Phi$	1.14500	1.19127	1.39739	1.55686
M1 ID	26.33720	32.84090	31.44830	37.62320
M12 $\Phi$	0.63087	0.58123	0.62147	0.69860
M12 ID	48.48270	46.69660	48.29380	59.79790
M2 $\Phi$	0.39503	0.39168	0.36547	0.42173
M2 ID	20.02590	19.31830	18.17720	21.55010
M3 $\Phi$	0.68009	0.66807	0.67433	0.73065
M3 ID	49.86310	48.56440	49.02010	61.90360

TABELA A4.2 (A) - Sequências CSI com distribuição setorial (3,1,1,0) do ex. 2



CSI	8, 15, 3	8, 15, 18	8, 3, 17,	8, 18, 19
LINKS	17, 12, 4	19, 9, 14	18, 9, 4	17, 16, 14
M <sup>1</sup> $\Phi$	1.31919	1.10768	1.08865	1.16111
ID	29.98470	31.13890	30.64510	32.43290
M <sup>12</sup> $\Phi$	0.60733	0.57579	0.58565	0.57604
ID	47.43000	43.55900	41.05090	46.56360
M <sup>2</sup> $\Phi$	0.39689	0.40083	0.36978	0.42042
ID	20.14890	19.67950	18.37080	21.57800
M <sup>3</sup> $\Phi$	0.66177	0.62381	0.70236	0.60704
ID	48.34680	46.11780	43.41240	48.53950

TABELA A4.2(B) - Seqüências CSI com distribuição setorial (4,1,1,0) do ex. 2

CSI	8, 15, 3,	8, 15, 18,	8, 3, 17,	8, 18, 19,
LINKS	17, 18, 12	19, 17, 9,	18, 19, 9,	17, 6, 16,
	4	14	4	14
M <sup>1</sup> $\Phi$	1.00969	1.16859	1.01829	1.14317
ID	29.12980	30.91370	29.18880	32.08880
M <sup>12</sup> $\Phi$	0.57182	0.54733	0.57430	0.55856
ID	40.24160	42.99720	37.62170	45.43040
M <sup>2</sup> $\Phi$	0.39763	0.39749	0.37294	0.42042
ID	20.16590	19.68810	18.46340	21.57800
M <sup>3</sup> $\Phi$	0.67976	0.56863	0.67528	0.61329
ID	42.85930	44.33380	40.90690	47.47290

TABELA A4.2 (C) - Seqüências CSI com distribuição setorial (5,1,1,0) do ex.2

CSI	8, 15, 3, 17,	8, 15, 18, 19	8, 3, 17, 18,	8, 18, 19,
LINKS	18, 19, 12,	17, 3, 6, 9,	19, 7, 6,	17, 6, 2,
	9, 4	16, 14	9, 16, 4	7, 16, 14
M <sup>1</sup> $\Phi$	0.93503	0.93119	0.82139	0.89422
ID	27.38680	27.87730	28.19860	28.91090
M <sup>12</sup> $\Phi$	0.57560	0.49738	0.45078	0.44630
ID	37.44670	36.75410	27.51630	31.76980
M <sup>2</sup> $\Phi$	0.37294	0.42037	0.39665	0.42169
ID	18.46340	20.64850	19.45910	20.77777
M <sup>3</sup> $\Phi$	0.63152	0.53356	0.57495	0.59576
ID	40.24630	38.4247	31.57777	34.34040

TABELA A4.2 (D) - Seqüências CSI com distribuição setorial (7,2,1,0) do ex.2

CSI		3	3, 1	3, 1, 2	3, 1, 4	3, 4
LINKS						1, 5
M <sup>1</sup>	$\Phi$	1.08723	0.36355	0.35104	0.34065	0.33581
	ID	24.35900	15.81200	14.47030	13.92490	13.51320
M <sup>1 2</sup>	$\Phi$	0.30734	0.16255	0.17347	0.16960	0.19262
	ID	11.53850	6.01578	6.78117	6.65750	8.52825
M <sup>2</sup>	$\Phi$	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003
	ID	0.00171	0.00171	0.00171	0.00171	0.00171
M <sup>3</sup>	$\Phi$	0.25898	0.14743	0.14570	0.14584	0.14876
	ID	10.25640	6.14910	6.30883	6.31467	6.89693

TABELA A4.3 (A) - Seqüências CSI do ex. 3 com distribuição setorial (1,0,0), (1,1,0), (2,1,0) e (2,1,1) respectivamente

CSI		3, 5	3, 5, 2	3, 5, 4
LINKS				
M <sup>1</sup>	$\Phi$	0.84712	0.76167	0.75254
	ID	19.23080	17.04860	16.66667
M <sup>1 2</sup>	$\Phi$	0.27422	0.22975	0.22494
	ID	11.28210	9.77637	9.57265
M <sup>2</sup>	$\Phi$	0.00003	0.00003	0.00003
	ID	0.00171	0.00171	0.00171
M <sup>3</sup>	$\Phi$	0.22098	0.20208	0.20208
	ID	9.14918	8.69131	8.69131

TABELA A4.3 (B) - Seqüências do ex.3 com distribuição setorial (1,0,1), (2,0,1) e (2,0,1) respectivamente

CSI		3, 4	3, 2	3, 1, 6	3, 1, 7,	3, 6, 7,
LINKS				5, 4, 2	5, 4, 2	5, 4, 2
M <sup>1</sup>	$\Phi$	3.11107	3.14233	2.34600	1.06160	0.94880
	ID	36.04810	40.59810	45.36700	25.67820	23.20470
M <sup>1 2</sup>	$\Phi$	0.31108	0.34806	0.32893	0.31171	0.31312
	ID	20.69669	20.64720	18.69330	18.08500	18.23250
M <sup>2</sup>	$\Phi$	0.36061	0.35717	0.36061	0.36061	0.36061
	ID	18.95580	18.74820	18.95580	18.95580	18.95580
M <sup>3</sup>	$\Phi$	0.31114	0.39032	0.35083	0.34475	0.35106
	ID	20.77760	21.57150	19.5828	19.5861	19.72380

TABELA A4.4 (A) - Seqüências CSI do ex. 4 com dit. setorial (1,0,1), (1,0,1), (3,1,2), (3,1,2) e (3,1,2) respectivamente

CSI	3, 1, 4	3, 1, 2	3, 6, 4	3, 6, 2	3, 7, 4
LINKS					
M <sub>1</sub> Φ	3.10816	3.14622	2.50666	2.44153	1.20787
M <sub>1</sub> ID	36.72690	42.92580	47.29050	46.43550	31.70230
M <sub>12</sub> Φ	0.30752	0.33529	0.31583	0.35195	0.32554
M <sub>12</sub> ID	20.07100	19.93500	20.62240	20.77550	20.76020
M <sub>2</sub> Φ	0.36061	0.35716	0.36061	0.35716	0.36061
M <sub>2</sub> ID	18.95580	18.74820	18.95580	18.74820	18.95580
M <sub>3</sub> Φ	0.30344	0.35280	0.31960	0.39064	0.32637
M <sub>3</sub> ID	19.97730	20.65520	20.83770	21.80800	20.84080

TABELA A4.4 (B) - Sequências CSI do ex. 4 com distribuição setorial (2,0,1)

CSI	3, 1, 6,	3, 1, 6,	3, 1, 7,	3, 1, 7,	3, 6, 7,
LINKS	5, 4	5, 2	5, 4	5, 2	5, 4
M <sub>1</sub> Φ	2.41322	2.42076	1.17485	1.14165	1.06759
M <sub>1</sub> ID	43.61570	46.37990	31.37320	26.70620	30.34340
M <sub>12</sub> Φ	0.31558	0.34386	0.32314	0.32374	0.32229
M <sub>12</sub> ID	19.96390	19.70050	20.02930	18.99230	20.35890
M <sub>2</sub> Φ	0.36061	0.35717	0.36061	0.35716	0.36061
M <sub>2</sub> ID	18.95580	18.74820	18.95580	18.74820	18.95580
M <sub>3</sub> Φ	0.32729	0.37037	0.33564	0.36230	0.32695
M <sub>3</sub> ID	20.69720	21.14720	20.67040	20.82020	20.62800

TABELA A4.4 (C) - Sequências CSI do ex. 4 com distribuição setorial (3,1,1)

CSI	1, 5, 12,	1, 5, 12,	1, 5, 12,	1, 5, 12,	1, 5, 12,
LINKS	4, 10	4, 13	4, 20	2, 4, 8	9, 8, 4
M <sub>1</sub> Φ	1.27630	1.28036	1.28248	1.06859	1.06929
M <sub>1</sub> ID	29.46130	29.74970	29.91430	25.15650	24.95860
M <sub>12</sub> Φ	0.29160	0.30788	0.30059	0.23302	0.23638
M <sub>12</sub> ID	16.54050	18.00790	17.63650	14.13070	13.87460
M <sub>2</sub> Φ	0.34082	0.40275	0.35542	0.34264	0.33761
M <sub>2</sub> ID	16.92510	19.65930	17.40410	16.96780	16.67777
M <sub>3</sub> Φ	0.30845	0.32089	0.31133	0.27905	0.26829
M <sub>3</sub> ID	17.50870	18.76610	18.3246	16.20420	15.5191

TABELA A4.5 (A) - Sequências CSI do ex. 5 com distribuição setorial (3,1,1,0,0), (3,1,0,1,0), (3,1,0,0,1), (4,2,0,0,0) e (4,2,0,0,0) respectivamente

CSI	1, 5, 12, 6,	1, 5, 12,	1, 5, 12,	1, 5, 12,	1, 5, 12,
LINKS	4, 8	4, 8, 10	4, 8, 13	4, 8, 20	2, 4, 8, 10
M <sub>1</sub> $\Phi$	0.91824	1.06845	1.07186	1.06981	1.05922
M <sub>1</sub> ID	27.06810	24.92900	25.18830	25.00970	24.63450
M <sub>12</sub> $\Phi$	0.19114	0.23847	0.25475	0.24462	0.22333
M <sub>12</sub> ID	11.04990	13.81330	15.28060	14.78180	12.97220
M <sub>2</sub> $\Phi$	0.38521	0.29910	0.35262	0.32307	0.30354
M <sub>2</sub> ID	18.88710	15.10790	17.42710	16.05850	15.33300
M <sub>3</sub> $\Phi$	0.21020	0.27677	0.28774	0.28321	0.26910
M <sub>3</sub> ID	11.91810	15.50760	16.70920	16.39830	15.06930

TABELA A4.5 (B) - Sequências CSI do exemplo 5 com distribuição setorial (4,2,0,0,0), (3,2,1,0,0), (3,2,0,1,0), (3,2,0,0,1) e (4,2,1,0,0,) respectivamente

CSI	1, 5, 12, 9,	1, 5, 12,	1, 5, 12, 2,	1, 5, 12, 9,	1, 5, 12,
LINKS	4, 8, 10	6, 4, 8, 10	4, 8, 13	4, 8, 13	6, 4, 8, 13
M <sub>1</sub> $\Phi$	1.06936	1.07484	1.06148	1.04670	1.07714
M <sub>1</sub> ID	24.97730	28.55760	24.91860	24.09830	28.80350
M <sub>12</sub> $\Phi$	1.23925	0.20310	0.23751	0.23653	0.21937
M <sub>12</sub> ID	13.85000	11.27230	14.32760	13.60100	12.73960
M <sub>2</sub> $\Phi$	0.29910	0.32233	0.35790	0.35262	0.34721
M <sub>2</sub> ID	15.10790	15.99160	17.72610	17.42710	17.16070
M <sub>3</sub> $\Phi$	0.27677	0.24098	0.28396	0.26366	0.25194
M <sub>3</sub> ID	15.57060	12.93190	16.35890	14.94820	14.13340

TABELA A4.5 (C) - Sequências CSI do ex. 5 com distribuição setorial (4,2,1,0,0), (4,2,1,0,0), (4,2,0,1,0), (4,2,0,1,0) e (4,2,0,1,0) respectivamente

CSI	1, 5, 12, 2	1, 5, 12, 9	1, 5, 12, 6	1, 5, 12, 2,	1, 5, 12, 2,
LINKS	4, 8, 20	4, 8, 20	4, 8, 20	9, 6, 4, 8,	9, 6, 4, 8,
				7, 10	18, 10
M <sub>1</sub> $\Phi$	1.06217	1.06162	1.07482	1.06659	1.06671
M <sub>1</sub> ID	24.83838	24.58460	28.59900	28.27370	28.27820
M <sub>12</sub> $\Phi$	0.22676	0.23403	0.20925	0.19265	0.19889
M <sub>12</sub> ID	13.80910	13.76767	12.2408	10.72370	11.01470
M <sub>2</sub> $\Phi$	0.32332	0.32307	0.32977	0.30892	0.31345
M <sub>2</sub> ID	16.11080	16.05850	16.35210	15.40590	15.65540
M <sub>3</sub> $\Phi$	0.27082	0.26575	0.24741	0.23739	0.26756
M <sub>3</sub> ID	15.73140	15.32740	13.82260	12.82790	13.38150

TABELA A4.5 (D) - Sequências CSI do ex. 5 com distribuição setorial (4,2,0,0,1), (4,2,0,0,1), (4,2,0,0,1), (6,3,1,0,0) e (6,3,1,0,0) respectivamente

CSI	1, 5, 12, 2,	1, 5, 12, 2,	1, 5, 12, 2,	1, 5, 12, 2,	
LINKS	9, 6, 4, 8, 7,	9, 6, 4, 8,	9, 6, 4, 8,	9, 6, 4, 8,	
	13	18, 13	7, 20	18, 20	
M <sup>1</sup>	$\Phi$	1.04717	1.04721	1.06208	1.06208
	ID	27.49300	27.49450	27.99580	27.99580
M <sup>1 2</sup>	$\Phi$	0.19619	0.20296	0.18302	0.18302
	ID	10.76670	11.08840	10.33180	10.33180
M <sup>2</sup>	$\Phi$	0.33285	0.32924	0.31468	0.31468
	ID	16.54240	16.40510	15.66600	15.66600
M <sup>3</sup>	$\Phi$	0.22894	0.25634	0.21949	0.21949
	ID	12.38630	13.19240	12.18880	12.18880

TABELA A4.5 (E) - Sequências CSI do ex. 5 com distribuição setorial (6,3,0,1,0), (6,3,0,1,0), (6,3,0,0,1) e (6,3,0,0,1) respectivamente

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACZÉL, J. e DAROCZY, Z. - On Measures of Information and Their Characterizations. New York. Academic Press, 1975.
- ALONSO, W., - Location and Land Use. Estados Unidos. The MIT Press, 1964.
- ASH, R.B., - Information Theory. New York, Wiley Inter Science, 1965.
- AYENI, B. - "Algorithm 11: Information Statistics for Comparing Predicted and Observed Trip Matrices". ENVIRONMENT AND PLANNING A, Vol. 15, p.1259-1266, 1983.
- BATTY, M., - Urban Modelling - Algorithms, Calibrations, Predictions. Cambridge, Cambridge University Press, 1976.
- BATTY, M. - Paradoxes of Science in Public Policy: The Baffling Case of Land Use Models. Inglaterra, Universidade de Reading, 1978.
- BATTY, M. e MARCH, L. - "The Method of Residues in Urban Modelling". ENVIRONMENT AND PLANNING A, Vol. 8, p. 189-214, 1976.
- BAZARAA, M.S. e SHETTY, C.M. - Non Linear Programming. New York. John Wiley & Sons, 1979.
- BECKMANN, M., MCGUIRE, C.B. e WINSTEN, C. - Studies in the Economics of Transportation. Yale University Press, 1956.
- BELL, M.G.H.- "The Estimation of an Origin-Destination Matrix from Traffic Counts". TRANSPORTATION SCIENCE, Vol 17, N. 2, p. 198-217, 1983.
- BEN-AKIVA, M.E.- "Structure of Passenger Travel Demand Models". TRANSPORTATION RESEARCH RECORD, N. 526, p. 26-42, 1975.

- BOLDRINI, J.L., COSTA, S.I.R., FIGUEIREDO, V.L. e WETZLER, H.G. - Álgebra Linear. São Paulo, Harper & Row do Brasil, 1980.
- BRILLOUIN, L. - Science and Information Theory. New York, Academic Press, 1956.
- BURRELL, J.E.- "Multiple Route Assignment and its Application to Capacity Restraint". Proceedings, 4th International Conference on the Theory for Traffic Flow, Karlsruhe, 1968.
- CASCETTA, E. e NGUYEN, S.- "A Unified Framework for Estimating or Updating Origin/Destination Matrices from Traffic Counts". TRANSPORTATION RESEARCH-B, Vol. 22B, N. 6, p. 437-455, 1988.
- CHORLEY, R.J. - Geography and Analog Theory. In: Spatial Analysis - a Reader in Statistical Geography, B.J.L. Berry & D.F. Marble, New Jersey, Prentice-Hall, 1968.
- CHRISTOFIDES, N. - Graph Theory an Algorithmic Approach, New York, Academic Press, 1975.
- D.E.R. - Sistema Representativo Integrado de Postos de Contagem de Rede Rodoviária do Estado de Santa Catarina, DPC/COPROVI, Vol. 1, 1987.
- DIAL, R.B.- "A Probabilistic Multipath Assignment Model Which Obviates Path Enumeration". TRANSPORTATION RESEARCH, N. 5, p. 83-111, 1972.
- DRAPER, N. and SMITH, H. - Applied Regression Analysis. E.U.A., John Wiley and Sons, 1966.
- EVANS, A.W.- "The Calibration of Trip Distribution Models with Exponential or Similar Cost Functions". TRANSPORTATION RESEARCH, Vol. 5, p. 15-38, 1971.
- FELLER, W.- Introduction to Probability Theory and its Applications, Vol. 2, New York, John Wiley, 1971.
- FISK, C.S. e BOYCE, D.E.- "A Note on Trip Matrix Estimation from Link Traffic Count Data". TRANSPORTATION RESEARCH, Vol.17B, N. 3, p. 245-250, 1983.
- FLEMMING, D.M. e TANEJA, I.J. - "An Algorithm for Calculating the Weighted Capacity". JOURNAL OF COMBINATORICS,

- INFORMATION & SYSTEM SCIENCES, Vol. 9, N. 4, p. 260-270, 1984.
- FLEMMING, D.M. e STANGE, P. - "Teoria da Informação Aplicada num Sistema de Produção". Caderno de Resumos do X ENEGEP, p. 35, 1990.
- FLEMMING, D.M. - Um Método de Alocação de Contadores Volumétricos de Tráfego numa Rede Rodoviária. Monografia do Exame de Qualificação ao Doutorado - UFSC, 1992.
- FLEMMING, D.M. e ULYSSÉA NETO, I. - "Um Método Simplificado de Alocação de Contadores Volumétricos de Tráfego numa Rede Rodoviária". Anais do VI ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Vol. I, p. 247-260, Rio de Janeiro, 1992a.
- FLEMMING, D.M. e ULYSSÉA NETO, I. - "Um Modelo de distribuição de viagens que utiliza contagens volumétricas de tráfego". Resumos do XV CNMAC - Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, p. 108, São Carlos, 1992b.
- FLEMMING, D.M. - "Um Algoritmo para Resolver um Problema de Cobertura Aplicado na Estimativa de Matrizes O-D de Viagens". Anais do XIII ENEGEP e I Congresso Latino Americano de Engenharia Industrial, Vol. II, p. 987-992, Florianópolis, 1993.
- GÖTHE, M.B., JÖRNSTEN, K.O. e LUNDGREN, J.T. - "Estimation of Origin-Destination Matrices from Traffic Counts Using Multi objective Programming Formulations." TRANSPORTATION RESEARCH, B, Vol. 23B, N. 4, p. 257-269, 1989.
- HALL, A.D. - A Methodology for Systems Engineering, Princeton, New Jersey, D. Van Nostrand, 1962.
- HOGBERG, P. - "Planning of Traffic Counts". UNIVERSITY OF GÖTEBORG, DEPARTMENT OF STATISTICS RESEARCH REPORT, N. 3, 1975.
- HOGBERG, P.- "Estimation of Parameters in Models for Traffic Prediction: a Non-linear Regression Approach".



- TRANSPORTATION RESEARCH, Vol. 10, p. 263-265, 1976.
- HOLM, J., JENSEN, T., NIELSEN, S., CHRISTENSEN, A., JOHNSON, B. e RONBY, G.- "Calibrating Traffic Models on Traffic Census Results Only". TRAFFIC ENGINEERING & CONTROL, Vol.17,1976.
- HUTCHINSON, B.G. - Principles of Urban Transport Systems Planning, New York, McGraw-Hill, 1974.
- HYMAN, G. M. - "The Calibration of Trip Distribution Models". ENVIRONMENT AND PLANNING, Vol. 1, p. 105-112, 1969.
- JAYNES, E.T. - "Information Theory and Statistical Mechanics. PHYSICAL REVIEW, Vol. 106, N.4, p. 620-630, 1957.
- JENSEN, T. e NIELSEN, S.K. - "Calibrating Gravity Models and Estimating its Parameters using Traffic Volume Counts". Technical University of Denmark,1973.
- JUMARIE, G.M. - Studies in Cybernetics: 12 - Subjectivity, Information, Systems. New York, Gordon an Breach Science Publishers, 1986.
- KAPUR, J.N. - Maximum Entropy Models in Science and Engineering. New Delhi, Wiley Eastern Limited, 1989.
- KHAN, A.M. -"Cost-Benefit Analysis of Information Acquisition in Transportation Planning". ENVIRONMENT AND PLANNING, Vol. 3, N. 3, p. 327-342, 1971.
- KHAN, A.M. - "Transport Policy Decision Analysis: Recent Developments in the Techniques of Investment Planning". HIGH SPEED GROUND TRANSPORTATION JOURNAL, Vol. 6, N. 1, p. 7-26, 1972.
- LAM, W.H.K R LO, H.P. - "Estimation of Origin-Destination Matrix from Traffic Counts: A Comparison of Entropy Maximizing and Information Minimizing Models". TRANSPORTATION PLANNING AND TECHNOLOGY. Vol. 16, p. 85-104, 1991.
- LEE, D.B. - "Requiem for Large-Scale Models". JOURNAL OF THE AMERICAN INSTITUTE OF PLANNERS, p. 163-178, 1973.
- LOGIE, M. E HYND, A. - "MVESTM Matrix Estimation". TRAFFIC ENGINEERING & CONTROL, p. 454-459 e p. 534-545, 1990.
- LOW, D.E. - "A New Approach to Transportation Systems

- Modelling, TRAFFIC QUARTERLY, Vol. 26, p. 391-404, 1972.
- MAHER, M.J. - "Inferences on Trip Matrices from Observations on Link Volumes: A Bayesian Statistical Approach". TRANSFORMATION RESEARCH, B, Vol. 17B, N.6, p. 435-447, 1983.
- MANHEIM, M.L.- "Practical Implications of Some Fundamental Properties of Travel Demand Models". HIGHWAY RESEARCH RECORD, N. 422, p. 21-38, 1973.
- MÁRQUEZ, M.- Control de Tránsito Urbano. México, Limusa, 1979.
- MORETTIN, P.A. E BUSSAB, W.O. - Estatística Básica. São Paulo, Atual, 1985.
- MURCHLAND, J.D. - "The Multi proportional Problem". UNIVERSITY COLLEGE LONDON, TRANSPORT STUDIES GROUP NOTE JDM-263, 1977.
- MURCHLAND, J.D. - "Applications, History and Properties of Bi-and Multi-proportional Models". Seminar at the London School of Economics, London, 1978
- NGUYEN, S. - "Estimating an O-D Matrix from Network Data: a Network Equilibrium Approach". CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORT, UNIVERSITY OF MONTREAL, PUBLICATION 87, 1977.
- NGUYEN, S., MORELLO, E., PALLOTTINO, S.- "Discrete Time Dynamic Estimation Model for Passenger Origin/Destination Matrices on Transit Networks". TRANSPORTATION RESEARCH-B, Vol. 22B, N. 4, p. 251-260, 1988.
- NOVAES, A.G. - Métodos de Otimização - Aplicações aos Transportes. São Paulo. Edgard Blücher, 1978.
- NOVAES, A.G. - Modelos em Planejamento Urbano, Regional e de Transportes. São Paulo, Edgard Blücher, 1981.
- OUTRAM, V.F. e THOMPSON, E. - "Drivers Perceived Cost in Route Choice". PROCEEDINGS PTRC SUMMER ANNUAL MEETING, UNIVERSITY OF WARWICK JULY 1978. London, PTRC Education and Research Services, 1978.
- QUANDT, R.E. e BAUMOL, W.J. - "The Demand for Abstract

- Transports Modes: Theory and Measurement". THE DEMAND FOR TRAVEL: THEORY AND MEASUREMENT, Heath Lexington Books, Lexington, 1970.
- ROBERTS, F.S. - "Weighted Digraph Models for Assessment of Energy Use and Air Pollution in Transportation Systems". ENVIRONMENT AND PLANNING, A, Vol.7, p. 703-724, 1975.
- ROCKAFELLAR, R.T. - "A Dual Approach to Solving Nonlinear Programming Problems by Unconstrained Optimization". MATHEMATICAL PROGRAMMING, Vol 5, p. 354-373, 1973.
- ROBILLARD, P. - "Estimating the O-D Matrices from Observed Link Volumes". TRANSPORTATION RESEARCH, Vol. 9, p. 123-128, 1975.
- SANTOS, M.P.S. e GILBERT, D.A.M. - "The Utility of Structural Modelling Techniques in Transportation Planning". Universities Transport Studies Group, UK, 1985.
- SCHAECHTERLE, K., HAMPE, H., LANG, H. e SCHMITZ, P. - Aufbau eines Integrierten Repräsentanzsystems von Verkehrszählstellen im klassifizierten Landstraßennetz, STRASSENBAU UND STRASSENVERKEHRSTECHNIK, heft 142, Bonn/RFA, 1973.
- SHANNON, C.E. - "A Mathematical theory of Communication". BELL SYSTEM TECHNOLOGY, Vol 27, p. 379-423, 623-656, 1948.
- SIMON, H.A. - "A Arquitetura da Complexidade, As Ciências do Artificial, Sucessor, p. 285-338, 1981.
- SMITH, D.P. E HUTCHINSON, B.G. - "Goodness Of Fit Statistics for Trip Distribution Models". TRANSPORTATION RESEARCH, Vol 15A, p. 295-303, 1981.
- STOPHER, P.R. e MEYBURG, A.H. - "Urban Transportation Modelling e Planning, Lexington, Lexington Books, 1975.
- SYMONS, J., WILSON, R. e PATERSON, J. - "A Model of Inter-city Motor Travel Estimated by Link Volumes". PROCEEDINGS OF THE AUSTRALIAN ROAD RESEARCH BOARD, Vol.8, p. 53-58, 1976.
- TANEJA, I.J. - "On generalized Information Measures an their Applications - Ad. Elect. and Elect. Physics, Vol. 76, p. 327-413, 1992.

- THEIL, H. - Statistical Decomposition Analysis With Applications in the Social and Administrative Science. North Holland Publishing Company, Amsterdam, 1972.
- THOMAS, R.W. - "An Interpretation of the Journey-to-work on Merseyside using Entropy-Maximizing Methods". ENVIRONMENT AND PLANNING A, Vol. 9, p. 817-834, 1977.
- TURNKIST, M. e GUR, Y. - "Estimation of Trip Tables from Observed Link Volumes". TRANSPORTATION RESEARCH RECORD 730, 1-6, TRB Issues in Transportation Planning for Small and Medium-sized Communities, 1979.
- ULYSSEÁ NETO, I.-The Development and Testing of a Non-recursive Aggregate Passenger Travel Demand Modelling Approach, Tese de doutorado, Universidade de Bristol, 1988.
- ULYSSEÁ NETO, I.- "Modelos Simplificados de Planejamento de Transportes de Passageiros - Uma Necessidade de Curto Prazo em Países em Desenvolvimento". III Encontro Nacional da ANPET, Salvador, 1989.
- ULYSSEÁ NETO, I. - "Identificação e Caracterização de um Contexto de Planejamento de Transporte mais Adequado aos Países em Desenvolvimento", GEOSUL, Ano 4, N. 7, p. 90-91, 1990a.
- ULYSSEÁ NETO, I.- "Especificação e Calibração dos Fatores de Impedância de Viagens, no Âmbito da Modelagem da Demanda Agregada de Transporte de Passageiros" .IV Encontro Nacional da ANPET, Porto Alegre, 1990b.
- ULYSSEÁ NETO, I. -"O Processo de Planejamento de Transportes e sua Adequação ao Contexto Sócio-econômico dos Países em Desenvolvimento". REVISTA DE TRANSPORTE E TECNOLOGIA, ano IV, N. 8, p. 11-26, 1992.
- VAN VLIET, D. - "Road Assignment". TRANSPORTATION RESEARCH, Vol. 10, p. 137 - 143, 1976.
- VAN VLIET, D. - "Improved Shortest Path Algorithm for Transport Net Works". TRANSPORTATION RESEARCH, Vol. 12, p. 7 - 20, 1978.
- VAN VLIET, D. e DOW, P.D.C. - "Capacity-restrained Road

- Assignment", Traffic Engineering and Control, Vol.20, p. 296-305, 1979.
- VAN ZUYLEN, H.J. - "A Method to Estimate a Trip Matrix from Traffic Volume Counts". Proceedings PTRC Summer Annual, University of Warwick, London, PTRC Education and Research Services, 1978.
- VAN ZUYLEN, H.J. e WILLUMSEN, L.G. - "The Most Likely Trip Matrix Estimated from Traffic Counts", TRANSPORTATION RESEARCH B, Vol. 14B, p. 281-293, 1980.
- VAN ZUYLEN H.J. e BRONSTON, D.M. - "Consistent Link Flow Estimation from Counts". TRANSPORTATION RESEARCH, 14B, p.281-293, 1982.
- WARDROP, J.G. - "Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research". PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS, Vol. 1, p. 325-378, 1952.
- WILLUMSEN, L.G. - "An Entropy Maximizing Model for Estimating Trip Matrices from Traffic Counts". Tese de Doutorado - Department of Civil Engineering, University of Leeds, 1981a.
- WILLUMSEN, L.G. - "Simplified Transport Models Based on Traffic Counts". TRANSPORTATION, Vol. 10, p. 257-278, 1981b.
- WILSON, A.G.- Entropy in Urban and Regional Modelling, London, Pion, 1970.
- WILSON, A.G. - "Some new Forms of Spatial Interaction Model: a Review". TRANSPORTATION RESEARCH, Vol.9, p. 167-179, 1975.
- WRIGHT, C.C. e ORROM, H. - "The Westminster Route Choice Survey: a New Technique for Traffic Studies". TRAFFIC ENGINEERING & CONTROL, Vol.17, p. 348, 1976.
- YANG, H., SASAKI, T., IIDA, Y. E ASAKURA, Y. - "Estimation of Origin-Destination Matrices from Link Traffic Counts in Congested Networks". TRANSPORTATION RESEARCH - B, Vol. 26B, N. 6, p. 417-434, 1992.
- YANG, H. e SASAKI, T. - "An Analysis of the Reliability of an O-D Trip Matrix Estimated for Traffic Control". TRANSPORTATION RESEARCH, 25 B, p. 351-363, 1991.