UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES

**UM MÉTODO DE UTILIZAÇÃO DE DADOS DE PESQUISA
EMBARQUE/DESEMBARQUE NA CALIBRAÇÃO DE
MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO DO TIPO GRAVITACIONAL**

Eric Amaral Ferreira

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia (Área: Transportes).

*ORIENTADOR: Prof. Dr. Antônio Nélon
Rodrigues da Silva*

São Carlos
1999

Aos que me guiam:

Deus pai e mãe

“Se antes a terra, e depois o capital, eram os fatores decisivos para a produção... hoje o fator decisivo é, cada vez mais, o homem em si, ou seja, seu conhecimento.”

Pp. João Paulo II , Centesimus Annus. Encíclica 1991.

AGRADECIMENTOS

À Escola de Engenharia de São Carlos.

Ao professor e orientador Doutor Antônio Nélson Rodrigues da Silva pela confiança e orientação dispensada nos momentos finais.

À CAPES e a FAPESP pela bolsa auxílio e que estas continuem a incentivar a pesquisa no Brasil.

Ao professor Doutor Eiji Kawamoto pela orientação inicial.

Ao professor Doutor José Bernardes Felex conhecedor das boas coisas da vida.

Aos professores do Departamento de Matemática, em especial ao Doutor Marcos Arenális pela ajuda e orientação nos modelos e ao Professor Castelo pelas discussões sempre proveitosas.

Aos Professores Juan de Dios Ortúzar e Frank Southworth. Ortúzar por ter me indicado o Frank. Ao Frank por ter me indicado alguns artigos.

À Cynthia Perpétua pelo auxílio na elaboração do programa.

Ao professor Doutor João Alexandre Widmer pelas conversas nos momentos de decisão.

À todos os professores que fizeram com que meu conhecimento fosse “descoberto”.

À todos os colaboradores que fazem com que o STT exista.

Aos meus amigos de mestrado e a todas as pessoas com as quais tenho e tive contato.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	<i>i</i>
RESUMO	3
ABSTRACT	4
1 - INTRODUÇÃO	5
1.1 - Objetivos	6
1.2 - Apresentação dos capítulos	7
2 - TRANSPORTE PÚBLICO URBANO	8
2.1 - Introdução	8
2.2 - Noções sobre transporte público urbano	18
2.3 - Modos de transporte coletivo urbano	21
2.3.1 - Transporte coletivo urbano por ônibus	22
2.3.1.1 - Rotas	24
2.3.1.2 - Pontos de parada	27
3 - MÉTODOS DE OBTENÇÃO DE MATRIZES NUMA LINHA DE TRANSPORTE PÚBLICO.	29
3.1 - Representação da matriz	30
3.1.1 - Representação de uma matriz em uma linha de transporte público por ônibus	36
3.2 - Métodos diretos	38
3.2.1 - Métodos censitários	39
3.2.2 - Método de pesquisas domiciliares de autopreenchimento	39
3.2.3 - Pesquisa de entrevista pessoal domiciliar	42
3.2.4 - Pesquisas de abordagem	44
3.2.5 - Método de pesquisa de abordagem do tipo "santinho"	46
3.2.6 - Pesquisas de observação	47
3.3 - Métodos indiretos	49
3.4 - A pesquisa embarque/desembarque (E/D) como fonte de informações	51
4 - MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO	52
4.1 - Demanda por transportes	52
4.2 - Modelos de distribuição	73
4.2.1 - Abordagens dos modelos de distribuição de viagens	74
4.3 - Modelo de programação linear	78

<i>4.4 - Modelo de oportunidades</i>	80
<i>4.5 - Modelo eletrostático</i>	81
<i>4.6 - Método do fluido</i>	83
<i>4.7 - Modelos entrópicos</i>	85
<i>4.8 - Algoritmo SYNODM (matrizes sintéticas origem-destino)</i>	88
<i>4.9 - Modelo gravitacional</i>	91
<i>4.10 - Modelo de equilíbrio</i>	94
<i>4.11 - Modelo ônibus O/D</i>	99
5 - MODELO PROPOSTO	103
<i>5.1 - Introdução</i>	103
<i>5.2 - Modelo de gravidade restringido proposto</i>	93
5.2.1 - Formulação do modelo proposto	94
<i>5.3 - Calibração</i>	98
5.3.1 - Determinação do parâmetro α_i	100
<i>5.4 - Método de Gauss-Newton</i>	100
5.4.1 - Utilização do modelo de Gauss-Newton no modelo de gravidade restringido	102
<i>5.5 - Obtenção do modelo de gravidade proposto via maximização da entropia</i>	105
6 - APLICAÇÃO DO MODELO	111
<i>6.1 - Introdução</i>	111
<i>6.2 - Avaliação do desempenho do modelo</i>	104
6.2.1 - Chi-quadrado	104
6.2.2 - Índice de dissimilaridade	105
6.2.3 - Estatística phi-normalizada	105
<i>6.3 - Considerações sobre agregações de pontos de parada</i>	106
<i>6.4 - Apresentação dos resultados</i>	110
7 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118
ANEXO B	130

LISTA DE SÍMBOLOS

V_{ij}	número de viagens com início em “i” e término em “j”
X_{ij}	valores das transferências intrazonais
Z	valor mínimo da função linear das variáveis (dado pelo modelo)
$V_{P_i Q_j}$	probabilidade de movimento da zona i para a zona j
P_i	número de trabalhadores morando na zona i
Q_j	número de empregos disponíveis na zona j
R_{ij}	distância em linha reta da zona i à zona j
$V_{Q_j P_i}$	probabilidade de movimento da zona j para a zona i
A_i	constante de proporcionalidade das origens
B_j	constante de proporcionalidade dos destinos
O_i	número de viagens que têm origem na zona i
D_j	número de viagens com destino em j
C_{ij}	custo da viagem entre i e j
γ	multiplicador de Lagrange
E_t^l	média do número de passageiros que embarcam num ônibus da linha l no trecho t
D_t^l	média do número de passageiros que desembarcam de um ônibus da linha l no trecho t
O_{t_0}	ocupação média de um ônibus da linha l no trecho t_0
l	número de identificação de uma linha de ônibus
Nl	número de viagens pesquisadas na linha l
t	trecho de linha (ou <i>link</i> de uma rota de ônibus). Tem início em um ponto de ônibus t e fim no ponto imediatamente posterior (t +1)
E_t^{kl}	total de passageiros que entram no ônibus da viagem k da linha l no trecho t
TE_t^l	total de embarques de transferência na linha l trecho t
TD_t^l	total de desembarque para transferência na linha l trecho t

$f(c_{ij})$	função impedância de viagem entre i e j
K	constante a ser calibrada
P_t^{ij}	probabilidade de um passageiro com origem em i e destino em j escolher um ônibus que passe no trecho t
V_t^l	volume total de passageiros no trecho t durante o período de tempo t.
S	percentual dos ônibus pesquisados durante o período de tempo t (amostragem)
θ	porcentagem de passageiros embarcados em um ponto desembarcam no ponto seguinte
c_i	carregamento no trecho
E_k	passageiros embarcados
D_k	passageiros desembarcados
χ^2	chi quadrado
ϕ	phi-normalizado
ID	índice de dissimilaridade

RESUMO

FERREIRA, E. A. *Um método de utilização de dados de pesquisa embarque/desembarque na calibração de modelos de distribuição do tipo gravitacional*. São Carlos, 1999. 110p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O objetivo deste trabalho é testar um modelo de distribuição de viagens do tipo gravitacional para a calibração de matrizes origem/destino (O/D) em linhas de transporte público por ônibus a partir de dados de pesquisa de contagem de embarque/desembarque (E/D).

A metodologia proposta possibilita a obtenção de matrizes O/D de forma rápida e barata, pois combina um método de pesquisa simples e de baixo custo (pesquisa de contagem de usuários) com um modelo de distribuição de viagens.

O modelo associa a cada ponto de origem um valor de parâmetro. A utilização de um valor de parâmetro associado a cada origem busca neste caso reproduzir o custo médio de distribuição de viagens de uma origem em relação aos seus diferentes destinos. O modelo incorpora ainda como restrição a probabilidade de um passageiro desembarcar no ponto seguinte ao seu ponto de embarque.

Os dados de pesquisa foram cedidos pelo Departamento de Transportes da Universidade Federal do Paraná. O teste de desempenho do modelo foi realizado através da comparação entre matrizes O/D observadas e simuladas para as cidades de Curitiba e Paranaguá.

Palavras-chave: matriz O/D; distribuição de viagens, calibração, modelo gravitacional.

ABSTRACT

FERREIRA, E. A. *An on/off data utilization method in calibration of gravity models*. São Carlos, 1999. 110p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The aim of this work is to test a gravity model for trip distribution designed to estimate bus routes origin/destination (O/D) matrices based on boarding and alighting data.

The proposed method combines a simple and low-cost survey method (on/off passenger counting) with a mathematical model for trip distribution, which enables the estimation of an O/D matrix in a fast and inexpensive manner.

The model assumption that each origin point is associated to a parameter value tries to reproduce the average costs of the actual trip distribution from each origin to every single destination along the bus route. The model brings also as a built-in restriction an expected (usually low) probability of passengers getting off the vehicle in the bus stop following the boarding point.

The survey data used in this work have been collected by researchers of the Transportation Department at the Federal University of Paraná. The model performance has been tested by the comparison of observed and simulated O/D matrices in the cities of Curitiba and Paranaguá. The results found in most of the simulations showed that for an estimated trip frequencies did not statistically differ from the actual values for a required level of significance

Keywords: O/D matrix estimation, calibration, gravity models, trip distribution models

1 - INTRODUÇÃO

Com o crescimento e aglomeração dos centros urbanos surgem inúmeros problemas relacionados aos deslocamentos de pessoas e mercadorias, gerando uma infinidade de problemas para a comunidade, incluindo congestionamento de tráfego, atrasos, poluições sonoras, visuais e atmosférica. Conhecendo estes problemas e a fim de minimizar os problemas decorrentes da atividade transporte, administradores, políticos e instituições públicas vêm procurando avaliar, organizar e coordenar o transporte dentro dos centros urbanos.

A minimização destes problemas pressupõe um entendimento dos componentes do sistema de transporte, dentre eles o sistema de transporte coletivo, do padrão básico de viagens, bem como os motivos e desejos da população.

Cientes de que os deslocamentos espaciais da população de uma determinada área urbana em um determinado intervalo de tempo podem ser representados por uma matriz O/D, técnicos em transporte adotam-na como informação básica para a sua atividade de planejamento.

As matrizes são um importante meio de descrição da demanda de passageiros e têm sido utilizadas sistematicamente nas análises de, planejamento, programação e avaliação de rotas (LONDON TRANSPORT

INTERNATIONAL CONSULTANTS^{1.1} apud FURTH & NAVICK, 1993a), avaliações de pontos de parada e serviços expressos, identificação dos locais de troca de viagens os quais justifiquem serviços de integração, e integração entre serviços expressos e locais (FURTH et al.^{1.2} apud FURTH & NAVICK, 1993a).

Matrizes origem-destino indicam o número de passageiros viajando entre pares de pontos de uma linha de ônibus. As matrizes podem ser do dia todo ou somente de um período específico de interesse de determinadas viagens.

Uma matriz O/D sintetiza a demanda por viagem de uma população, embora de forma imperfeita, uma vez que ela não capta a demanda reprimida. Confrontando a demanda assim descrita com a oferta em uma determinada área, pode-se planejar algum tipo de solução para problemas detectados, ou problemas que possam ocorrer em um futuro próximo. Por meio de uma seqüência de matrizes O/D ao longo do tempo, os operadores de transporte podem ter uma idéia bastante clara do volume de serviços que deverão ofertar entre dois pontos de um espaço geográfico. O conhecimento do comportamento da demanda pode ajudar a evitar que se ofereça um volume de serviços excessivo ou insuficiente. O primeiro implicaria em realizar gastos desnecessários, e o segundo em comprometer a qualidade dos serviços. Assim muitos dos problemas de planejamento e operação (tarifas diferenciadas, serviços expressos, limitação de pontos de parada, etc.) em transportes públicos, como a eficiência e o nível de serviço, são resolvidos total ou parcialmente com a utilização de matrizes Origem-Destino (KAWAMOTO, 1994).

1.1 LONDON TRANSPORT INTERNATIONAL CONSULTANTS, INC (1987). Route, Schedule and ridership analyses. Final report/Technical report to Dallas Area Rapid Transit. apud FURTH, P. G.; NAVICK, D. S. (1993a). Bus route O-D matrix generation: relationship between biproportional and recursive methods. Transportation Research Record, n.1338. p.14-21.

1.2 FURTH, P. G. et al. (1984). Operating strategies for major radial bus routes. Report DOT I - 84 - 27. UMTA, U. S. Department of Transportation. apud FURTH, P. G.; NAVICK, D. S. (1993a). Bus route O-D matrix

O problema da obtenção de uma matriz O/D é o seu alto custo, pois a sua elaboração requer grande volume de informações que devem ser coletadas de alguma forma. Entre os métodos mais freqüentemente utilizados na coleta de dados citam-se: pesquisa domiciliar, pesquisa nos pontos de atração (locais de trabalho, comércio, escolas, cinemas, etc.), nos pontos de parada de transporte coletivo (quando o objetivo for exclusivamente o planejamento deste tipo de transporte), etc. Quanto mais elaborada e abrangente for a pesquisa, maior o volume de recursos a ser empregado na preparação (coleta) e tabulação dos dados. Não é por outra razão que se buscam métodos expeditos e baratos.

Apesar da sua importância, são poucas as cidades brasileiras que dispõem de matrizes O/D, e que mantém órgãos gerenciadores dotados de engenheiros de transporte capacitados para efetuar os serviços de planejamento e operação.

Por tudo isso, a necessidade de desenvolvimento de métodos de obtenção de matrizes O/D de forma rápida e de baixo custo tem motivado pesquisadores e técnicos em transporte.

1.1 - Objetivos

Este trabalho tem por objetivos: revisar os métodos de obtenção de matrizes O/D em linhas de transporte urbano, os quais combinem modelos de previsão de demanda de viagens e métodos simples e baratos de coleta de dados, e apresentar um método de utilização de dados de pesquisa embarque/desembarque (E/D) para calibração de matrizes O/D a partir de um modelo gravitacional.

generation: relationship between biproportional and recursive methods. Transportation Research Record, n.1338, p.14-21.

1.2 - Apresentação dos capítulos

A importância do transporte coletivo por ônibus no Brasil fica evidenciada no capítulo 2. Os transportes coletivos respondem por cerca de 50% das pessoas transportadas em nossas cidades. O planejamento de um sistema de transporte necessariamente passa pelo conhecimento das tecnologias e dos modos de transporte. Assim, o capítulo 2 introduz noções sobre as particularidades do transporte público, em especial dos ônibus urbanos.

O capítulo 3 trata da representação de uma matriz e dos métodos de obtenção de matrizes, diretos e indiretos.

O capítulo 4 apresenta os modelos de distribuição de viagens e os métodos de obtenção de matrizes a partir de dados de pesquisa embarque-desembarque.

O capítulo 5 apresenta um método de calibração de um modelo de gravidade.

O capítulo 6 apresenta a aplicação do modelo proposto para as cidades de Curitiba e Paranaguá e as análises estatísticas utilizadas para a validação do modelo proposto.

No capítulo 7 estão reunidas as conclusões e recomendações referentes ao modelo estudado.

Os anexos apresentam o programa desenvolvido em Turbo Pascal e o modelo de entrada de dados.

2 - TRANSPORTE PÚBLICO URBANO

2.1 - Introdução

O planejamento dos transportes coletivos de massa, especialmente o transporte coletivo por ônibus no Brasil, é de suma importância, visto que esse modo de transporte corresponde a quase 50% das viagens realizadas. O transporte público é um serviço essencial nas cidades, pois democratiza a mobilidade para as pessoas que não possuem automóveis; torna-se uma alternativa aos congestionamentos de tráfego, quando dotados de vias especiais ou segregadas; reduz a poluição e o uso indiscriminado da energia automotiva; reduz a construção de vias e estacionamentos, auxiliando políticas de uso e ocupação do solo, dentre outras vantagens.

O objetivo deste capítulo é apresentar os modos de transporte público, em especial o transporte público por ônibus. No modo ônibus urbano, devido a importância para a obtenção de matrizes de viagem origem-destino a partir de dados de pesquisa embarque-desembarque, são descritos os tipos de veículos, as rotas de transporte e os pontos de parada. O conhecimento dos elementos componentes de um sistema de transporte é fundamental para o planejamento e operação dos modos de transporte.

2.2 - Noções sobre transporte público urbano

O século XX experimentou o maior desenvolvimento científico e demográfico da história da humanidade, e esse desenvolvimento propiciou o crescimento dos centros urbanos de uma forma nunca vista.

Segundo MORLOK (1978), o desenvolvimento de meios de transporte mecanizados permitiu o aumento gradativo do tamanho das cidades.

No Brasil, mais de 78 milhões de viagens motorizadas são realizadas por dia; estima-se que mais de 70% sejam realizadas por meio dos transportes coletivos. Aproximadamente 62% das pessoas que utilizam os coletivos têm por motivo o trabalho. Isto comprova sua importância social e seu papel como instrumento de produção (PADILHA, 1998).

Dentre os diversos serviços essenciais à manutenção das cidades modernas (abastecimento de água, energia elétrica, coleta de resíduos sólidos e líquidos, etc.), temos o transporte como um dos principais serviços. O transporte é um dos serviços mais importantes, pois possibilita o deslocamento de mercadorias e pessoas, mantendo o suprimento de alimentos e o contato entre as pessoas. O transporte público democratiza os deslocamentos de pessoas dentro e entre cidades, contribuindo para um aumento da qualidade de vida quando atinge seus objetivos.

Segundo PASCHETTO et al. (1984) o transporte urbano estruturou o crescimento de boa parte das cidades até a metade deste século. O crescimento da rede de transporte acompanhou o crescimento das populações urbanas, tanto nas áreas centrais quanto nas zonas externas das áreas urbanas.

O transporte público desempenha um papel social e econômico de extrema relevância, pois:

- democratiza a mobilidade, proporcionando locomoção para aqueles que não possuem automóvel ou não podem dirigir (aí se incluem: pobres, idosos, crianças, adolescentes, deficientes, etc.).
- representam uma alternativa de transporte em substituição ao automóvel, fundamental para aliviar os congestionamentos, a poluição (sobretudo atmosférica) e o uso indiscriminado de energia automotiva (principalmente do petróleo, cujas fontes são finitas e não renováveis).
- ainda como substituto do automóvel, reduz a necessidade de investimentos da construção de vias, estacionamentos, etc., permitindo a alocação de recursos em setores de maior relevância social, bem como uma utilização mais racional do solo urbano.

Segundo FERRAZ (1998), dentre os diversos modos de transporte, o transporte público é o modo mais importante, sendo responsável por mais da metade das viagens urbanas motorizadas.

FERRAZ (1998) aponta que aproximadamente 75% da população vive nas cidades. Ou seja, atualmente 120 dos 160 milhões de brasileiros vivem em cidades. Considerando os estudos demográficos que apontam a estabilização do crescimento daqui a 50 anos, o Brasil terá 240 milhões de habitantes. Supondo que o índice de urbanização deverá ser de 80%, teremos uma população urbana de cerca de 192 milhões de habitantes nas cidades, sendo que 75% da população urbana vive hoje em municípios que possuem mais de 100.000 habitantes.

Esses valores mostram a importância do equacionamento adequado da questão do transporte urbano no país, pois a qualidade desse transporte afetará a qualidade de vida da grande maioria da população.

Para a ANTP (1997), os sistemas de transporte público passam por um declínio na sua importância, na sua eficiência e na sua confiabilidade

junto ao público, tornando-se um mal necessário para aqueles que não têm outra opção de deslocamento. Como consequência imediata, houve a formação de dois grupos que refletem, na prática, as desigualdades sociais e econômicas de nossa sociedade: os que têm acesso ao automóvel e os que precisam do transporte público. Ou seja, enquanto uma parcela reduzida goza das melhores condições de transporte, a maioria continua tendo o seu direito de ir e vir limitado.

As condições atuais de transporte são precárias para a maioria da população, pelo desconforto, congestionamentos e acidentes. Com o objetivo de reverter esta situação, é necessário fazer um novo exame do modelo atual de transporte e circulação das cidades brasileiras, que proporcione melhores opções de deslocamento, juntamente com uma maior eficiência geral do sistema. Isto só pode ser obtido caso o processo de desenvolvimento urbano e as políticas de transporte e trânsito sejam revistas, de forma a gerar um equilíbrio entre os vários modos, que aumente a eficiência geral do sistema e garanta condições adequadas para a maioria dos usuários (ANTP, 1997). Para se conseguir estes resultados, as políticas necessárias devem ser adotadas, de acordo com a ANTP (1997), de forma a garantir:

- melhor qualidade de vida para toda a população, traduzida por condições dignas de transporte, segurança de trânsito e acessibilidade para a realização das atividades essenciais à vida moderna;
- eficiência, demonstrada pela disponibilidade de uma rede de transportes integrada por modos complementares, trabalhando em regime de eficiência, com prioridade efetiva para os meios coletivos;
- qualidade ambiental, representada pelo controle dos níveis de poluição atmosférica e sonora, pela proteção do patrimônio histórico, arquitetônico, cultural e ambiental e das áreas residenciais e de vivência coletiva contra o trânsito indevido de veículos.

2.3 - Modos de transporte coletivo urbano

Existem vários modos de transporte coletivo urbano de passageiros (tabela 2.1), cada qual operando de acordo com as características (econômicas) e necessidades de cada cidade. Existe ainda um outro meio de transporte situado entre o transporte coletivo e o transporte individual, o táxi, esse possui as vantagens do carro próprio, porém com um custo geralmente superior aos demais meios de transporte coletivo.

Tabela 2.1 - Principais características técnicas dos modos de transporte público

Características	Ônibus	Bonde	Modos VLT	Metrô	Subúrbio
Largura (m)	2,4 – 2,6	2,4 – 2,6	2,4 – 2,8	2,5 – 3,2	2,5 – 3,2
Comprimento (m)	10 – 24	14 – 23	14 – 30	15 – 23	20 – 26
Capacidade (pass)	80 - 240	130 - 230	150 - 350	160 - 300	180 - 250
Unidades em	1 – 4	1 – 3	1 – 4	4 – 10	4 – 10
comboio	independente	engatada	engatada	engatada	engatada
Velocidade (km/h)	10 – 20	10 – 20	20 – 40	25 – 60	40 – 70
Capacidade (mil pass./h)	5 – 15	5 – 15	10 – 30	25 – 60	20 – 50
Distância entre paradas (m)	200 - 400	200 - 400	400 - 800	700 - 2000	1500 - 4000

Fonte: FERRAZ (1998).

Devido ao menor investimento em infra-estrutura e aquisição das unidades de transporte quando comparado aos demais modos de transporte, os ônibus tornaram-se o principal meio de transporte coletivo no Brasil.

Segundo FERRAZ (1998), cerca de 50% do transporte urbano motorizado no país é feito utilizando transporte público (95% por ônibus e outros 5% por metrô e trem) e os outros 50% com veículos particulares (carros e motocicletas).

2.3.1 - Transporte coletivo urbano por ônibus

O transporte coletivo urbano existe em função das atividades e necessidades econômicas e sociais dos habitantes de uma comunidade, sendo indispensável em comunidades carentes de recursos, uma vez que o automóvel particular não está ao alcance de todos. Já em comunidades abastadas, a falta de condições espaciais para os deslocamentos essenciais provocados por congestionamentos e estacionamentos desestimulam o uso do automóvel, desde que haja soluções alternativas. Desta forma, tem-se no Brasil o ônibus como sinônimo de transporte coletivo urbano, sendo esta a principal tecnologia utilizada para este fim.

O ônibus é provavelmente o modo de transporte mais difundido em todo o mundo. Este fato está relacionado com sua flexibilidade, sua capacidade de adaptar-se a diferentes demandas, sua tecnologia simples, sua facilidade em trocar de rotas ou criar novas rotas, além dos baixos custos de fabricação, implementação e operação quando comparados à outros modos. Tudo isto faz com que o ônibus seja, atualmente, o principal modo de transporte público disponível em cidades de pequeno e médio portes, além de um importante complemento para os modos de alta capacidade nas grandes cidades (BALASSIANO, 1997; SILVA & FERRAZ, 1991).

Segundo a MERCEDES BENZ DO BRASIL (1987), as causas do ônibus terem sido tão amplamente empregados com relação às outras modalidades de transporte são:

- Requer menor investimento inicial do que os sistemas sobre trilhos;
- Por sua natureza, ser meio essencial de transporte;
- Flexibilidade na adequação de itinerários e expansão de trajetos;
- Rapidez na implantação;

- Poder transportar demandas elevadas e atingir altas velocidades, desde que em condições prioritárias;
- Valor de revenda alto;
- Ser operado na maioria dos casos pela iniciativa privada e apenas regulamentado por órgãos públicos.

Desta maneira, o ônibus está integrado na configuração da maioria das cidades brasileiras como meio de transporte coletivo essencial. Estima-se que ele atenda cerca de 95% dos deslocamentos urbanos (trabalho, escola, compras, lazer e outras atividades) por transporte público no país, considerando-se aí também o trólebus (ANTP, 1997).

De acordo com a MERCEDES BENZ DO BRASIL (1987), as exigências do passageiro, consideradas relevantes para a qualidade do serviço de transporte coletivo por ônibus, são:

- Distâncias curtas a pé aos pontos de parada mais próximos por onde passam os ônibus que vão ao destino desejado ou à sua vizinhança;
- Segurança (redução dos riscos de acidentes entre veículos, conflitos e assaltos no interior dos veículos);
- Mínimo tempo de espera;
- Confiabilidade (cumprimento do horário preestabelecido, poucas quebras);
- Viagens rápidas (fluidez no tráfego e nos pontos de parada);
- Conforto (ausência de baldeações ou então integrações coordenadas e rápidas; número de passageiros por metro quadrado; limpeza dos ônibus, terminais, paradas, etc.);
- Tarifas baixas; e
- Atendimento dos seus desejos de deslocamentos (trabalho, estudo, etc.).

Deve-se observar que, na prática, dificilmente o passageiro tem estas exigências cumpridas satisfatoriamente. As distâncias para os pontos de

parada às vezes são inadequadas, tendo o passageiro que percorrer longas distâncias a pé para pegar o ônibus. Os tempos de espera são longos e a viagem demorada, tendo o passageiro que usar vários meios de transportes sem integração modal e tarifária, sendo obrigado a pagar mais de uma tarifa.

Embora essas exigências tenham definições próprias e objetivas, elas representam valores subjetivos que passam pela percepção do passageiro, que é influenciado por um conjunto de características próprias do indivíduo. Desta forma, torna-se essencial considerar o perfil do passageiro, podendo-se então analisar as diferentes maneiras de percepção, peculiares de cada grupo, ou seja, como os passageiros enxergam o transporte e o que desejam desse serviço.

2.3.1.1 - Rotas

Grande parte das linhas de transporte público por ônibus surgem das reivindicações de moradores junto as empresas de transporte operadoras e ao poder público. Porém as linhas do transporte público devem passar pelos pontos de atração de viagens da área que é destinada a atender, assim como proporcionar uma cobertura satisfatória das áreas habitadas.

O itinerário da linha deve permitir que todos os habitantes de uma determinada área coberta pelo sistema de transporte público possam utilizá-lo com percursos realizados a pé dentro de limites toleráveis. FERRAZ (1998) considera a acessibilidade, isto é, a distância percorrida a pé para começar e finalizar as viagens, como boa para distâncias de caminhada menores que 300 metros; acessibilidade média para distâncias entre 300 a 500 metros e ruim para distâncias superiores a 500 metros.

Em função do atendimento oferecido e do itinerário desenvolvido, as linhas de ônibus recebem uma classificação. Cada tipo de linha se ajusta melhor a um determinado padrão de atendimento. Conhecer o comportamento da demanda a ser atendida é imprescindível para determinar o tipo de linha e o tipo de ônibus que apresentarão os melhores resultados operacionais.

De acordo com SILVA & FERRAZ (1991), os tipos mais usuais de linhas de ônibus são:

- diametral: liga bairros diametralmente opostos passando pelo centro. Pode ser utilizada como opção de integração entre bairros;
- radial: liga pontos periféricos da cidade e o centro. Indicada para atender grandes fluxos de passageiros com destino final no centro da cidade;
- circular: opera continuamente em torno de uma determinada área, não possui ponto inicial ou final, pode ou não passar pelo centro da cidade;
- interbairros: faz a ligação entre subcentros de bairros, não passando pelo centro da cidade.

As linhas radiais são as mais freqüentemente encontradas na maioria das cidades brasileiras, porque servem a região central, a qual é o maior pólo de atração de viagens urbanas.

De modo geral, o comprimento médio das linhas de ônibus aumenta com o crescimento da área urbana. O caso de cidades que apresentam linhas relativamente longas pode ser causado pela forma linear da cidade, ou pela ocupação adensada de bairros afastados do centro da cidade.

Segundo SANCHES (1988) o comprimento médio das linhas varia com a extensão e a forma urbana (tabela 2.2)

Tabela 2.2 - Características das redes de ônibus em algumas cidades brasileiras

Cidade	Área (ha)	Número de linhas	Extensão média das linhas (km)	Extensão da rede (km)
Campina Grande	3712	30	9.5	285
Caruaru	1862	11	6.3	69
Ribeirão Preto	13628	39	10.3	402
Campinas	10223	71	18.2	1292
Bauru	7585	22	14.1	310
Pelotas	3828	27	7.4	200
Caixias do Sul	4165	20	8.4	168
Americana	8540	20	14.1	282
Campos	4000	41	7.3	301
Juiz de Fora	6400	64	18.9	1210
Uberlândia	6906	42	17.5	740

Fonte: SANCHES (1988)

Na elaboração da rede de transporte público em cidades médias, FERRAZ (1997) recomenda a observação de quatro aspectos, para alcançar uma eficiência satisfatória do sistema:

- Evitar a sobreposição das zonas de influência de duas ou mais linhas, com exceção da área central, ou quando uma das linhas cruzar a zona de influência de outra com o objetivo de atingir áreas mais afastadas;
- Definir adequadamente as zonas de influência de cada ligação, com a finalidade de evitar uma excessiva ociosidade na oferta nos períodos de baixo movimento;
- Estabelecer, para cada itinerário, o caminho mais direto possível e, de preferência, com os itinerários de ida e volta na mesma via ou em vias próximas. Devem ser evitados itinerários sinuosos e tortuosos, pois os traçados diretos levam, quase sempre, a um desempenho mais eficiente e eficaz do serviço, bem como são bem mais fáceis de serem compreendidos e usados pelos usuários;
- Utilizar linhas diametrais sempre que houver equilíbrio na demanda e significativo número de viagens.

2.3.1.2 - Pontos de parada

Pontos de parada são locais definidos nas vias públicas onde se realizam o embarque e desembarque de passageiros de transporte coletivo por ônibus. Geralmente esses pontos são distribuídos ao longo da linha, obedecendo a espaçamentos regulares.

O tipo e a localização dos pontos de parada influenciam a operação do transporte público, afetando a velocidade comercial, o consumo de combustível, número de veículos em operação, enfim, afetam sobremaneira a determinação dos custos e a tarifa final para o consumidor.

Devido a grande influência no desempenho da velocidade operacional dos ônibus, VUCHIC (1981) considera que as distâncias entre pontos de ônibus não deveriam ser abaixo de 300 metros, deveriam ser entre 400 e 600 metros. O manual da MERCEDES BENZ (1987) considera que as distâncias entre pontos deveriam ser entre 300 e 800 metros.

A ANTP (1995a) em entrevista a 280 municípios, identificou que a instalação dos pontos de parada considerava os seguintes critérios:

- distância mínima entre pontos, variando de 250 a 500 metros;
- áreas de concentração de demanda, adensamento residencial ou comercial;
- número de linhas, volume de ônibus que passam no local;
- possibilidade de integração;
- interferência no sistema viário, proximidade de semáforos, curvas, posição na quadra, etc.;
- topografia;

- segurança e comodidade para o usuário, iluminação, visibilidade, existência de baias, calçadas;
- normas de trânsito, Código de Trânsito Brasileiro, Sistema de Trânsito do Município.

Outros critérios bastante utilizados são: pressão da população e dos comerciantes, costume/tradição da comunidade, e em alguns municípios o critério político.

A pesquisa da ANTP (1995a) identificou que menos da metade dos municípios possuía um cadastro ou sistema de controle sobre a quantidade e localização dos pontos de parada de ônibus, principalmente nas cidades de pequeno porte. As cidades de médio e grande porte apresentaram um controle de cadastro de pontos, apesar de que na maioria das vezes o cadastro de pontos é somente parcial.

Os pontos de parada funcionam como a referência física mais visível do sistema de transporte, sendo efetivamente o local do contato inicial entre o usuário e o sistema de transporte, pois é onde o trecho do deslocamento por ônibus se inicia. Os pontos de parada podem ser caracterizados como uma simples pintura nos postes, podem ser estruturas físicas dotados de abrigo contra chuva, banco de espera, lixeira, luminária, além de informações básicas, como o número e nome das linhas de passagens, horário de operação e partida das viagens, telefone de informações, mapas das linhas, etc.

Segundo a ANTP (1995b), para a implantação de pontos de parada devem ser considerados os seguintes aspectos:

- colocar pontos de parada nos locais mais convenientes para os usuários e que ofereçam boas condições de segurança na travessia; todavia, evitar colocá-los imediatamente após cruzamento importante, em posição

inadequada em relação ao semáforo, em locais de rampa acentuadas ou junto à entrada de garagens e estacionamentos;

- em vias expressas ou vias de alta velocidade, colocar baias para a parada dos ônibus, nos pontos de parada; quando o volume de ônibus for elevado, colocar pavimentos rígidos junto aos pontos;
- cobrir o ponto de parada para a proteção contra intempéries e pavimentar e iluminar a calçada;
- dimensionar o ponto de parada para o volume máximo de demanda prevista para o local (às vezes não basta cobrir apenas o espaço da porta de embarque); adotar soluções modulares que possam ser agrupadas segundo a dimensão necessária do ponto de parada;
- dotar o ponto de parada de informações sobre as linhas de ônibus que passam no local e também outras informações de interesse dos usuários;
- prever a exploração publicitária nos pontos de parada como forma de ressarcimento dos custos de implantação e manutenção dos abrigos. Entretanto, o contrato de exploração comercial deve prever a comercialização de toda a rede de pontos, incluindo aí aqueles instalados em regiões periféricas de menor poder aquisitivo, ou pontos de menor afluxo de usuários.

Enfim, localização, dimensões, instalações e informações dos pontos de parada são fatores que devem ser considerados prioritários no intuito de reduzir o desconforto do tempo parado para embarque-desembarque, oferecer segurança e orientação aos passageiros e minimizar os efeitos que a parada provoca no tráfego em geral.

3 - MÉTODOS DE OBTENÇÃO DE MATRIZES NUMA LINHA DE TRANSPORTE PÚBLICO.

3.1 - Representação da matriz

No contexto deste trabalho vamos tratar a matriz O/D como sendo a representação do número de passageiros que viajam entre cada par de pontos ou estações em uma rota ou em uma direção particular, ou seja, neste trabalho a matriz O/D é um método descritivo da demanda de passageiros que mostra a distribuição de viagens que se originam em uma zona (ponto) i (O_i), entre vários destinos (pontos) j (D_j). Esquemáticamente tem-se:

		Zonas de destino				
		1	2	.	n	
Zonas de origem	1	v_{11}	v_{12}		v_{1j}	O_1
	2	v_{21}	v_{22}	...	v_{2j}	O_2
	.	.	.	.	.	. Viagens
	.	.	.	.	.	. originadas
	n	v_{i1}	v_{i2}	..	v_{ij}	O_n
		D_1	D_2	.	D_n	
		Viagens destinadas				

Figura 3.1 - Matriz origem-destino

A somatória na linha i representa as viagens que se iniciam no ponto i , portanto as viagens originadas nesta zona:

$$\sum_j v_{ij} = O_i \quad (3.1)$$

A somatória na coluna j representa as viagens cujos destinos são a zona j , portanto as viagens atraídas neste ponto:

$$\sum_i v_{ij} = D_j \quad (3.2)$$

3.1.1 - Representação de uma matriz em uma linha de transporte público por ônibus

No transporte público urbano por ônibus considera-se como deslocamento a viagem realizada entre dois pontos ao longo de uma rota. Os deslocamentos dos usuários em uma linha de transporte público radial ou diametral podem ser representados através de uma matriz triangular estritamente superior.

Matriz triangular estritamente superior é aquela em que os elementos da diagonal e da matriz triangular inferior são nulos (CAMPOS, 1983, p.157).

A utilização de uma matriz estritamente superior, deve-se ao fato de que na maioria das linhas de transporte público por ônibus, os pontos de parada localizados em um sentido não coincidem com os pontos de parada do outro sentido. Assim, para uma linha genérica A-B temos duas matrizes, uma matriz sentido A-B e outra sentido B-A.

Representação esquemática de uma matriz triangular estritamente superior.

$$\begin{array}{cccccc}
 \left[\begin{array}{cccccc}
 0 & V_{1,2} & \cdots & V_{1,n-2} & V_{1,n-1} & V_{1,n} \\
 0 & 0 & \cdots & V_{2,n-2} & V_{2,n-1} & V_{2,n} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & V_{n-3,n-2} & V_{n-3,n-1} & V_{n-3,n} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & V_{n-2,n-1} & V_{n-2,n} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & V_{n-1,n} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{array} \right] & \begin{array}{l} O_1 \\ O_2 \\ \vdots \\ O_{n-3} \\ O_{n-2} \\ O_{n-1} \\ O_n \end{array} \\
 D_1 & D_2 & \cdots & D_{n-2} & D_{n-1} & D_n
 \end{array}$$

Figura 3.2 - Matriz origem-destino em uma linha de transporte por ônibus

Na diagonal da matriz não se realizam deslocamentos, pois não há deslocamentos em um mesmo ponto, razão pela qual esta assume o valor zero.

A matriz triangular inferior apresenta valores iguais a zero, por ser contrário ao sentido de deslocamento do ônibus.

Através da observação do número de passageiros vizinhos à diagonal da matriz triangular superior, podemos verificar o número exato de passageiros que embarcam em um ponto e desembarcam no ponto seguinte. Desta forma, V_{12} são os passageiros que embarcaram no ponto 1 (O_1) e desembarcaram no ponto 2 (D_2), V_{23} são os passageiros que embarcam no ponto 2 e desembarcam no ponto 3, e assim sucessivamente.

O conhecimento do número de passageiros que embarcam em um ponto e desembarcam no ponto seguinte, e da distância percorrida entre esses pontos, fornece informações a respeito do comportamento dos usuários em uma linha de transporte. O conhecimento de várias linhas de transporte pode ser utilizado em conjunto com modelos seqüenciais de

previsão de demanda, auxiliando na distribuição de viagens em uma matriz O/D.

Os processos de obtenção de matrizes O/D em várias linhas de transporte público podem ser diretos ou indiretos.

3.2 - Métodos diretos

Os métodos diretos de obtenção de matrizes tradicionalmente envolvem pesquisas de origem-destino. NGUYEN (1984) considera que grandes amostragens devem ser consideradas para que as pesquisas tenham precisão na estimativa dos resultados. Mesmo as pequenas amostragens nas pesquisas origem-destino (1-5%), envolvem uma quantia de recursos financeiros relativamente grande em termos de homens-horas-trabalhadas, tempo de processamento e dificuldades de condução da pesquisa.

Os métodos diretos contam ainda com a resistência de muitos usuários em responder a questões sobre seus padrões de viagem (STOPHER et al., 1985).

Alguns métodos diretos de obtenção de matrizes, como por exemplo os métodos de contagem de tráfego, não fazem uso de entrevistas com usuários. Estes métodos não permitem o conhecimento das características sócio-econômicas dos usuários. Quando ocorrem mudanças no sistema de transporte, as características sócio-econômicas podem ser usadas para a previsão do comportamento do usuários, bem como para a avaliação de impactos causados nos diferentes estratos da população, e reciprocamente, do impacto dessa população nos empreendimentos (RICHARDSON et. al., 1995).

Dentre os métodos diretos de obtenção de matrizes origem-destino em linhas de transporte público por ônibus encontram-se as pesquisas censitárias, de autopreenchimento, de entrevista domiciliar, de abordagem (pesquisa sem entrevista do tipo santinho), e de observação.

3.2.1 - Métodos censitários

Informações a respeito das viagens poderiam ser obtidas durante o recenseamento populacional. O custo marginal de se obter informações sobre viagens seria relativamente baixo, com isso todas as cidades, principalmente as de pequeno e médio porte, seriam as beneficiadas.

A vantagem deste método é a identificação quase que total dos usuários quanto às suas origens, destinos, classe social, freqüências de viagem e modos de transporte utilizados. Permite ainda a identificação dos volumes de viagens produzidas e atraídas nas principais zonas da cidade, dados que são de fundamental importância para o planejamento da rede viária, bem como da eficiente operação dos modos de transporte utilizados.

3.2.2 - Método de pesquisas domiciliares de autopreenchimento

Segundo RICHARDSON et al. (1995), pesquisa domiciliar de autopreenchimento é uma das formas mais usadas dentre as técnicas de pesquisa em transporte. Pesquisa domiciliar de autopreenchimento é definida para ser aquela na qual as pessoas que respondem o questionário, o completam sem que haja a assistência do entrevistador. Neste tipo de pesquisa, é necessário que as pessoas desempenhem três tipos de tarefas. Estas tarefas são; a leitura e o entendimento da questão, mentalização da resposta e sua transcrição para o questionário. Nas pesquisas de entrevista,

o entrevistado somente é responsável pela segunda parte destas três tarefas; o entrevistador é responsável pela primeira e terceira questões.

Diversos tipos de formatos de pesquisa básica podem ser descritos, dependendo dos métodos usados para a coleta e distribuição dos questionários. Estas variações incluem:

a) Pesquisas de envio e retorno de questionários:

Esta é a forma mais básica de pesquisa de autopreenchimento e um dos métodos mais utilizados. O questionário é enviado para as pessoas e é solicitado que o mesmo seja devolvido via correio depois de respondidas as questões. A carta resposta geralmente é paga pela agência pesquisadora.

b) Entrega do questionário à pessoa com postagem paga:

Onde existe a suspeita de baixo índice de retorno de questionários, ou onde se acredita que haja necessidade de alguma instrução pessoal de como completar o questionário, é desejável que o questionário seja entregue pessoalmente às pessoas a serem entrevistadas. Desta maneira o propósito da pesquisa deve ser explicado, as perguntas sobre o questionário devem ser respondidas imediatamente, instruções devem ser dadas, e dúvidas sobre como preencher o questionário devem ser sanadas. O contato pessoal geralmente aumenta a taxa de resposta e também resulta em uma elevação da qualidade das respostas.

c) Entrega e coleta do questionário ao entrevistado:

Em complemento à entrega do questionário, também é possível coletá-lo em uma data posterior a sua entrega. Isso favorece o aumento da taxa de respostas através da pressão do entrevistado em responder a pesquisa antes que o questionário seja coletado. A visita do coletor permite resolver qualquer problema específico encontrado pelo entrevistado no preenchimento do questionário.

Pesquisas de autopreenchimento têm vantagens e desvantagens. As vantagens incluem:

- a) Pesquisas de autopreenchimento geralmente são mais baratas que as pesquisas de entrevistas individuais. (HITLIN^{3.3} et al. apud RICHARDSON et al. 1995).
- b) Devido a ausência de entrevistadores envolvidos na pesquisa, os efeitos do entrevistador são eliminados como uma possível fonte de viés de respostas.
- c) A pessoa que responde o questionário dispõe de um tempo relativamente longo para preenchê-lo. Também é possível à pessoa consultar documentos, caso seja necessário.
- d) Quem responde pode escolher a hora e o lugar no qual irá completar o questionário (exceto para questionário que devem ser respondidos rapidamente, tais como os feitos dentro de veículos).

As desvantagens dos formulários de autopreenchimento são:

- a) A crítica mais consistente às pesquisas de autopreenchimento é o baixo índice de respostas. Taxas de respostas em torno de 20 a 50% não são raros, e isto gera uma significativa possibilidade para desvios na entrada de dados (BRÖG & MEYBURG^{3.4} apud RICHARDSON et al. 1995).
- b) A aparência e linguagem do questionário devem ser extremamente claros e simples. Devido a ausência de entrevistador no esclarecimento das questões, as definições devem ser claras e fáceis de serem entendidas pela população em estudo (não somente para o projetista da pesquisa).
- c) Com uma pesquisa de autopreenchimento, é difícil assegurar que a pessoa certa irá preencher o questionário. Mesmo pensando que o questionário seja específico, não há garantia de que o questionário será preenchido e não existe uma maneira fácil de verificá-lo.

3.3 HITLIN, R. A. et al. (1987). A comparison of telephone and door-to-door survey results for transit market research. In: Annual Meeting of Transportation Research Board, 66^o, Washington, D. C. apud RICHARDSON, A. J., AMPT, E. S., MEYBURG, A. H. (1995). Survey methods for transport planning. Melbourne, Eucalyptus Press.

3.4 BRÖG, W; MEYBURG, A. H. (1982). Influence of survey methods on the results of representative travel surveys. In: Transportation Research Board Meeting, 61., jan. apud RICHARDSON, A. J., AMPT, E. S., MEYBURG, A. H. (1995). Survey methods for transport planning. Melbourne, Eucalyptus Press.

- d) Respostas espontâneas não são possíveis, as opiniões dadas podem não ser opiniões próprias dos entrevistados, mas sim resultados de discussões com outras pessoas, por esta razão este tipo de pesquisa não é aconselhado para pesquisas de atitudes.
- e) Em geral, somente questões simples e de um estágio podem ser perguntadas.

3.2.3 - Pesquisa de entrevista pessoal domiciliar

Uma pesquisa de entrevista pessoal é definida como aquela na qual o entrevistador faz as perguntas e anota as respostas dadas pelo entrevistado. Por esta razão, muitas das pesquisas de abordagem, bem como as pesquisas feitas por telefone, também podem estar dentro desta categoria. Porém neste caso nos interessam as pesquisas feitas nas residências.

As pesquisas de entrevistas domiciliares podem ser escolhidas em detrimento às pesquisas de autopreenchimento, devido a uma série de fatores:

- a) Em geral, podem ser obtidos índices mais altos de respostas em entrevistas pessoais do que em pesquisas de questionários de autopreenchimento. Índices de respostas da ordem de 75 a 80% não são raros. Isto tende a minimizar os efeitos de viés devido as não-respostas, embora não elimine os erros de viés.
- b) A pesquisa de entrevista pessoal permite uma considerável flexibilidade no tipo de informação coletada. Atitudes, opiniões, pesquisas orais e outras informações não qualitativas são mais facilmente coletadas em uma entrevista pessoal do que em uma pesquisa de questionário. Seqüências complexas ou filtros podem ser usados, se necessários, desde que os entrevistadores (diferentemente dos entrevistados) sejam treinados previamente.

- c) A presença de um entrevistador significa que as explicações podem ser dadas considerando o significado da questão.
- d) Pesquisas domiciliares pessoais podem ser conduzidas em um período muito curto comparado às pesquisas de autopreenchimento de questionários. Essas últimas necessitam mais de 6 semanas para incorporar avisos à população sobre os procedimentos da pesquisa.
- e) Algumas pesquisas são muito longas, e a presença do entrevistador pode manter o entrevistado interessado e assegurar que o conjunto de questões fique completo.
- f) Através da percepção do interesse do entrevistado e do modo como este responde, o entrevistador pode fazer uma avaliação da validade das respostas.

As desvantagens são:

- a) Pesquisas de entrevista são particularmente caras. Normalmente custam de três a dez vezes mais por questionário respondido do que uma pesquisa de autopreenchimento de questionário, devido ao alto custo da mão-de-obra dos pesquisadores.
- b) Para reduzir o custo de viagens e o custo do tempo perdido em deslocamentos, muitas das pesquisas de entrevistas fazem uso das amostragens sobre bases geográficas desatualizadas. Isto faz com que o “tamanho da amostra efetiva” seja reduzido, com conseqüente redução da exatidão de estimativa dos dados.
- c) A situação de entrevista é basicamente uma interação humana entre o entrevistado e o entrevistador. Tais relações raramente são neutras. O resultado da interação (freqüentemente denominada viés do entrevistador) pode afetar cada participante (e o dado coletado) de várias maneiras, incluindo:
 - i. A característica individual do entrevistador (idade, sexo, aparência geral) pode influenciar os entrevistados e vice-versa.
 - ii. Para responder às perguntas, o entrevistado altera sua rotina diária. Caso tal alteração seja inconveniente, esta pode distorcer as respostas

dadas (por exemplo, caso o entrevistado deseje voltar à sua rotina o mais rápido possível).

- iii. Um entrevistador com fortes opiniões pode subconscientemente comunicar estas opiniões ao entrevistado. Em algumas circunstâncias, alguns entrevistados podem concordar ou discordar das declarações, dependendo da percepção do temperamento do entrevistador.
- iv. Responder as questões antes da entrevista permite ao entrevistador construir uma imagem do comportamento e atitude geral das pessoas a serem entrevistadas. O entrevistador pode então interpretar respostas tardias (especialmente respostas vagas) para serem consistentes com este quadro, mesmo que o entrevistado tenha a intenção de dar uma resposta contrária ou aparentemente inconsistente.

Onde os conceitos são complexos ou se exige uma seqüência complexa de perguntas, é preferível a utilização de pesquisas de entrevistas pessoais à pesquisas de atitudes. A pesquisa de entrevista é mais cara que a pesquisa de autopreenchimento, porém, apresenta um maior índice de respostas e pode ser realizada em um curto período de tempo, sendo ideal para as pesquisas onde existe a necessidade de alta qualidade com tempo médio de preparação da pesquisa (RICHARDSON et al. 1995).

3.2.4 - Pesquisas de abordagem

Pesquisas de abordagem são aquelas as quais os locais das entrevistas não são as residências dos entrevistados, a abordagem pode ocorrer em qualquer lugar.

As pesquisas de abordagem incluem as pesquisas realizadas dentro dos veículos de transporte, nos pontos de parada e nas linhas de cordão da via, e outros locais de atividades como shopping centers, locais de trabalho, terminais de transporte como aeroportos, etc. Dependendo dos objetivos da

pesquisa e do local da abordagem, as pesquisas podem ter mais ou menos interação entre o pesquisador e pesquisado. Entretanto, de uma forma ou de outra, todas as pesquisas de abordagem envolvem um contato pessoal com o entrevistado, como por exemplo na entrega de formulários contendo questionários ou na forma de perguntas.

Esse tipo de pesquisa pode ser executada diretamente com os usuários do sistema de transporte, entrevistando uma amostra da população.

O método de entrevista dos usuários do sistema de transporte tem a vantagem de identificar as zonas de interesse dos usuários, as quais podem ou não estar em acordo com as zonas servidas pelo transporte público.

Os principais tipos de pesquisas de abordagens são:

- a) Distribuição de questionários dentro do veículo com retorno via correio - Nas pesquisas de embarque, o pesquisador embarca no veículo e distribui os questionários para os passageiros do veículo. Aos passageiros será solicitado que preencham os questionários conforme sua conveniência, e então os remetam de volta via correio.
- b) Distribuição e coleta dentro do veículo - Como uma alternativa ao método (a), pode-se recolher o questionário antes dos usuários desembarcarem do veículo, mas este tipo de pesquisa nos veículos de transporte público tem algumas dificuldades práticas. Por exemplo, nem todos os usuários estão sentados, nem todos possuem canetas, nem todos possuem o tempo necessário para preencher o questionário antes da viagem terminar e outros sequer sabem ler e escrever.
- c) Distribuição e coleta dentro do veículo mais retorno via correio - Em alguns estudos, pesquisas mistas dentro do veículo, as quais combinam elementos dos dois métodos (a) e (b), têm sido usadas com sucesso

(SHESKIN & STOPHER^{3.5} apud RICHARDSON et al. 1995). O método envolve o uso de um questionário contendo duas partes. A primeira parte assemelha-se a um cartão, claramente marcado para ser preenchido e devolvido dentro do veículo (pesquisa do santinho). A segunda parte é maior e é levada pelo usuário para ser respondida posteriormente e remetida via correio. Esse método permite coletar um maior número de informações que o obtido da pesquisa padrão de distribuição de questionários dentro do veículo com retorno via correio.

A qualidade dos resultados obtidos nas pesquisas de embarque dos tipos (a) a (c) depende dos métodos de amostragem usados na seleção dos veículos, rotas e pessoas pesquisadas.

Segundo FURTH & NAVICK (1993b), os métodos de abordagem apresentam como deficiência a impossibilidade de identificação dos usuários potenciais do sistema, pois esses não estão no universo de pessoas pesquisadas. Além disso estas pesquisas podem conter erros de informações, caso as perguntas não estejam bem formuladas e/ou os entrevistadores não executem sua tarefa adequadamente.

3.2.5 - Método de pesquisa de abordagem do tipo "santinho"

O método do cartão ou método do tipo "santinho", é um método direto de pesquisa do tipo abordagem e consiste em colocar dois pesquisadores no ônibus, sendo que um pesquisador deve ficar situado na porta de embarque e outro na porta de desembarque. O primeiro entrega a cada usuário que embarca um cartão contendo a inscrição com o horário e o nome ou código do ponto ou da estação de embarque. Ao desembarcar, o passageiro entrega ao outro pesquisador o cartão recebido no embarque, que o deposita num recipiente com a inscrição com o horário e com nome ou

3.5 SHESKIN, I. M.; STOPHER, P. R. (1982). Surveillance and monitoring of a bus system. Transportation Research Record 862, p. 9-15. apud RICHARDSON, A. J.; AMPT, E. S.;

código do ponto de ônibus ou da estação de desembarque. O total de cartões existentes num recipiente indica o volume de usuários com destino àquele ponto num determinado horário. Portanto, cada recipiente indica um destino, ou seja, uma coluna da matriz, e os cartões indicam a origem. Quando esse método é aplicado de maneira a levar em conta também as transferências, os resultados permitem a elaboração de matriz O/D bastante satisfatória. É verdade que a matriz assim obtida tem alguns defeitos, uma vez que apenas cobre as zonas de tráfego servidas pelo transporte coletivo, e também não permite identificar os usuários em potencial. Ademais, não permite identificar exatamente as zonas de origem e de destino, e sim os pontos de embarque e de desembarque.

O método do santinho permite ainda a obtenção do índice de renovação da linha de transporte estudada.

3.2.6 - Pesquisas de observação

Pesquisas de observação, enquanto são relativamente raras nas pesquisas de ciências sociais, são triviais em transporte e, mais particularmente, nas pesquisas de tráfego. Dois tipos básicos de pesquisas de observação são as pesquisas de observação direta e indireta. Exemplos de pesquisas de observação direta são:

- a) Inventário de pesquisas de transporte (exemplo, uso de técnicas tais como a gravação em vídeo, imagem digital, e veículos instrumentados);
- b) Pesquisas de contagem de embarque e desembarque (E/D) ou tipos diferentes (exemplo, contagem entre ligações, contagem em interseções, cordões de contagem, contagem em linhas de contorno, contagem em rotas de trânsito, contagem de entrada e saída, contagem de tráfego, etc.);

- c) Pesquisas de desempenho de sistema (tais como pesquisas de tempo de viagem, pesquisas de atrasos em interseções, e pesquisas de desempenho de transporte público);
- d) Pesquisas de classificação de veículos, nas quais os tipos de veículos são identificados por vários meios, tais como reconhecimento visual, perfil induzidos por laços, reconhecimento do padrão através de um contador de eixo de roda simples.

Uma característica crítica dos tipos de pesquisa (b) até (d) é que estas deveriam reconhecer que as medidas de desempenho do sistema obtidas em um dia são somente pontuais em relação as medidas de desempenho do sistema. Por exemplo, tempo de viagem varia de dia para dia para qualquer viagem, assim como o tempo de espera do passageiro do transporte público é dependente das chegadas e partidas dos diferentes modos de transporte. Nos projetos de pesquisa de desempenho de sistemas, devem ser feitas concessões para a variabilidade inerente de cada um dos parâmetros sob observação.

Exemplos de pesquisas de observações indiretas:

- a) Visual (de veículos ou pedestres) o qual pode indicar fluxos de tráfego predominantes;
- b) Restos de veículos acidentados ou marcas de frenagem para indicar locais perigosos na via; e
- c) Movimento nos postos de gasolina, e outros indicadores econômicos, a fim de estimar o total de atividade nos vários setores de transporte.

Em geral, as técnicas de observações indiretas são menos usadas que as técnicas de observação diretas em pesquisas de transporte, porém amplamente utilizadas no campo das pesquisas de ciências sociais.

3.3 - Métodos indiretos

Os processos indiretos conjugam modelos de previsão de demanda por transporte com pesquisas de campo simples, as quais não requerem grande volume de mão-de-obra e tempos de tabulação excessivamente longos e trabalhosos.

Os métodos indiretos estão sujeitos a erros por serem somente uma simplificação e uma representação imperfeita da realidade. Estes métodos reproduzem os resultados das condições existentes no local e no período em que a pesquisa foi realizada e não estão sujeitos às mudanças futuras de comportamento da sociedade. Relatam pequenas ou nenhuma informação sobre os efeitos das decisões dos viajantes quando das mudanças das circunstâncias de viagem ou em termos de alternativas competidoras de transporte.

Além disso, os modelos são baseados em dados representando zonas agregadas de viagens e condições sócio-econômicas, obscurecendo muitas das informações nos dados (DOMENCICH & MCFADDEN, 1975) e, junto com a falta de estrutura comportamental, dificultando a generalização de modelos entre cidades.

A pesquisa de observação, do tipo contagem de usuários ao longo da linha de transporte, é uma pesquisa simples e de baixo custo financeiro pois não requer pessoal especializado, além de não causar nenhuma interferência na operação. A pesquisa consiste da alocação de pesquisadores ao longo da rota para efetuar a contagem de embarque e desembarque dos usuários do sistema de transporte. Este método identifica apenas os volumes de usuários em cada ponto de uma dada linha de transporte, não informando sobre as zonas de origem e de destino. Este tipo de pesquisa, quando efetuado corretamente, permite contagem de 100 % dos usuários da linha pesquisada.

Basicamente, os modelos para obtenção de matrizes O/D a partir de dados de contagem embarque-desembarque são: os modelos de equilíbrio demanda/oferta, modelos estatísticos e os modelos de distribuição de viagens, com grande predomínio destes últimos.

Os modelos de equilíbrio demanda/oferta têm sido estudados para obtenção da matriz O/D a partir da contagem de veículos nas ligações de uma malha viária. YANG et al. (1992) revisam o esquema geral, cujo método é aplicável à obtenção de matriz O/D tanto para transporte coletivo como para transporte individual. Estes modelos, quando comparados à alguns modelos de distribuição de viagens, como por exemplo o modelo gravitacional simples, apresentam maior complexidade matemática.

Os modelos estatísticos encontrados na revisão bibliográfica abordam, em sua maioria, a obtenção de matrizes O/D a partir de contagens de tráfego em uma malha viária. Dentre os modelos encontrados, MAHER (1983) propõe uma estimativa Bayesiana para atualização de antigas matrizes O/D, CASCETTA (1984) obtém uma matriz O/D introduzindo a estimativa de mínimos quadrados, SPIESS (1987) utiliza um modelo baseado no princípio da máxima verossimilhança, LOGIE & HYND (1990) utilizam a técnica de máxima probabilidade para estimar os valores de parâmetros de um modelo de gravidade para contagens de tráfego, BELL (1991) discute o uso de mínimos quadrados, GUR & BEN-SHABAT (1997) desenvolveram um modelo que combina o modelo de mínimos quadrados ao modelo de mínima informação (Fratat), para a obtenção de matrizes O/D a partir de dados de embarque-desembarque para linhas de transporte público urbano.

Os modelos de distribuição de viagens comumente utilizados para obtenção de matrizes O/D serão tratados no capítulo 4.

3.4 - A pesquisa embarque/desembarque (E/D) como fonte de informações

A determinação de matrizes de viagens a partir de informações coletadas nas pesquisas E/D é bastante atraente em termos de economia de recursos. Os métodos convencionais de determinação de matrizes de viagens são dispendiosos, como é o caso das pesquisas domiciliares; ou requerem a participação dos usuários, como é o caso das pesquisas dentro de ônibus que identificam a origem e o destino de cada passageiro através da entrega (na entrada) e recebimento (na saída) de cartões de identificação da zona de origem.

Além disso, a pesquisa E/D permite a determinação dos totais de viagens geradas e atraídas em cada zona da área de estudo (desde que haja informações referentes aos percentuais de transferências) (DI PIERRO, 1985), além de dar subsídios para a adequação da operação à demanda, dentro de um nível desejado.

A pesquisa embarque/desembarque, ou pesquisa sobe/desce, consiste na contagem dos passageiros que embarcam e desembarcam em cada ponto de uma dada linha de ônibus. Geralmente é realizada por dois pesquisadores viajando dentro do ônibus e localizados próximos às portas de entrada e saída. É utilizada principalmente para fornecer dados de flutuação de ocupação durante o percurso. Através dela pode-se determinar a ocupação crítica de cada horário e, portanto, a frequência de viagens que deve ser oferecida (vide Figura 3.3).

Figura 3.3 – Ocupação crítica em uma linha de ônibus

4 - MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO

4.1 - Demanda por transportes

O transporte tornou-se parte integral da vida urbana. A necessidade de movimentação de pessoas e/ou mercadorias entre os diferentes locais, gera uma demanda por transportes.

A locomoção de pessoas e mercadorias dentro de uma área, mediante o uso de veículos automotores, produz uma série de problemas para a comunidade, incluindo; congestionamento de tráfego, acidentes, atrasos, poluição visual, sonora e atmosférica, e estes problemas contribuem para o declínio da qualidade de vida nas cidades. Qualquer medida para aliviar estes problemas pressupõe um entendimento dos padrões de viagens.

A análise da demanda por transporte é o processo pelo qual se procura identificar os determinantes da demanda e a maneira como eles interagem e afetam a evolução do volume de tráfego.

Os resultados destas análises são geralmente modelos matemáticos ou estatísticos que relacionam medidas de demanda por transportes (geralmente volume de tráfego) com medidas do nível de atividade sócio-econômicas e/ou características do usuário de transportes.

MANHEIN (1973) classifica os modelos baseados em redes de transporte em dois grandes grupos:

- a) modelos de demanda diretos;
- b) modelos de demanda seqüenciais.

A identificação do ponto de equilíbrio entre a demanda e a oferta de viagens em uma rede de transportes é um objetivo comum aos modelos de demanda. A diferença entre os modelos de demanda diretos e seqüenciais está no processo de modelagem.

Os modelos diretos são aqueles com os quais se procura representar a demanda por um dado modo e motivo de viagem, entre um determinado par de origem-destino.

O modelo seqüencial adota submodelos que implicam no seccionamento da modelagem da demanda de viagens em vários estágios sucessivos, pois considera que o viajante adota uma determinada seqüência de decisões, sem que haja, a “priori”, uma razão que justifique tal escolha dentre as seqüências alternativas (BEN-AKIVA et al., 1985).

A divisão do problema em um modelo seqüencial analisa a seqüência de decisão que se acredita que um indivíduo tome antes de efetuar uma viagem. Supõe-se primeiramente que o indivíduo decide exercer uma atividade, decide então onde exercer esta atividade, depois escolhe o modo de viagem e finalmente a rota.

Estes passos sintetizam o método de quatro etapas:

- Geração de viagens;
- Distribuição de viagens;
- Divisão modal;
- Alocação de viagens às rotas.

A abordagem no modelo seqüencial em uma determinada área deve conter os dados referentes ao zoneamento e ao sistema de redes de transporte, a coleta de regulamentos e planejamento, atividade econômica; incluindo empregos, população, espaços para comércio, educação e lazer.

Estes dados são usados para estimar as quatro etapas do modelo:

- a) produção e atração de viagens; é a etapa que tem por objetivo desenvolver modelos que permitam explicar o total de viagens produzidas em uma zona de tráfego i e o total de viagens atraídas para uma zona de tráfego j , em função das características sócio-econômicas da população e do uso do solo nas zonas de tráfego. A técnica mais comumente utilizada para o desenvolvimento destes modelos é a análise de regressão linear múltipla.
- b) distribuição espacial de viagens; é a etapa que tem o propósito de desenvolver um procedimento que sintetize o número de viagens entre zonas de tráfego. Isto é, definidos os modelos de produção e de atração de viagens e calculados os volumes futuros de viagens geradas por cada zona de tráfego, faz-se a sua distribuição, identificando o volume deslocado (pessoas ou toneladas, no caso de cargas) entre a zona de origem e de destino. O propósito desta etapa é a elaboração da matriz origem-destino utilizando modelos de distribuição, com os quais se procura expressar o volume de viagem entre pares de zonas, em função das variáveis sócio-econômicas e características de custo generalizado de transporte.

- c) divisão modal; é a etapa que tem por objetivo identificar e estimar o percentual de participação das diferentes modalidades de transportes utilizados nas viagens entre cada par de zonas i e j . Basicamente a análise investiga dois grupos, viagens de pessoas através de transporte público e viagens através de transporte particular. Existem modelos de divisão modal que fazem o uso de dados agregados e de dados desagregados. Entre estes destaca-se o modelo logit.
- d) Alocação de viagens às rotas; visa alocar o total de viagens distribuídas na etapa anterior, para as várias rotas disponíveis.

A obtenção de matrizes origem-destino no transporte público por ônibus através de dados de pesquisa embarque-desembarque, é um trabalho de distribuição de viagens, na qual se busca obter uma distribuição de fluxos (i.e. uma matriz origem-destino) que seja consistente com os dados observados em campo (pesquisa embarque-desembarque).

4.2 - Modelos de distribuição

A distribuição de viagens representa um passo na abordagem seqüencial de estimativa de tráfego urbano no qual se trata da escolha do destino, distribuindo os totais marginais das origens e destinos.

A distribuição de viagens é parte do processo de planejamento que relaciona um certo número de viagens com origem em cada zona da área de estudo com um determinado número de viagens com destino em outra zona. A distribuição sintetiza os fluxos origem-destino sem necessariamente tratar dos modos disponíveis nem das rotas utilizadas para efetuar o transporte.

A importância da distribuição de viagens está no fato de que esta dá a dimensão espacial da demanda de transporte e deste modo permite análises políticas com respeito ao planejamento das redes de transporte.

Segundo KANAFANI (1983) existem basicamente dois tipos de processo de distribuição de viagens nas áreas urbanas. Um deles pode ser chamado de processo de longo prazo, o qual inclui a distribuição das viagens de casa para o trabalho, e o outro, o processo de curto prazo, que inclui as viagens de compras ou lazer.

O primeiro processo é estável e muda somente em um longo prazo ou através da mudança de endereço da residência ou do emprego, mas diariamente o usuário seleciona o mesmo destino. Este processo caracteriza-se por ser constante, ou seja, o viajante sempre seleciona o mesmo destino, o local de trabalho.

O segundo processo é chamado de curto prazo. Dentro deste processo encontram-se as viagens para compras ou lazer; este processo quando comparado ao anterior é mais instável, já que o destino, os trajetos e tempos de viagem são bastante mutáveis, dependendo diretamente do balanceamento de diversos fatores. Portanto, na seleção de um modelo de distribuição a ser aplicado, deve-se levar em conta essas diferenças, escolhendo aquele que mais se adapta ao caso em estudo.

4.2.1 - Abordagens dos modelos de distribuição de viagens

Segundo KANAFANI (1983) os modelos de distribuições de viagens podem ser classificados em três diferentes tipos, de acordo com a abordagem da modelagem básica: modelos de demanda origem-destino, modelos de escolha e modelos físicos ou interação espacial.

- i. Modelos de demanda origem-destino: a maioria das abordagens de modelos de distribuição de viagens é para construir um modelo de demanda para viagens entre uma origem e um destino. Este modelo geralmente é estratificado por um propósito de viagem, podendo ser uma função individual ou agregada. Contudo, como outros modelos de demanda, este é derivado como uma função individual, utilizando o princípio da maximização da utilidade. O modelo de demanda normalmente é multiplicativo das variáveis sócio-econômicas e de oferta do sistema. A característica básica desta abordagem é que esta gera fluxos totais de tráfego, em vez de probabilidades de escolha. Além disso, não influencia o número de origens e destinos através da rede como outras abordagens fazem. É chamado de modelo de utilidade de distribuição de viagens e o modelo de geração/distribuição pertence a esta categoria.
- ii. Modelos de escolha (ou potencial de interação): a diferença fundamental entre o modelo de escolha e a abordagem do modelo de demanda é que este postula uma seqüência, separa o processo de decisão de viagem e trata da escolha do destino separadamente de outros passos do processo. Está interessado na porcentagem de distribuição de viagens de uma dada origem para os prováveis destinos e não diretamente no fluxo de tráfego entre eles. A escolha do destino pode ser feita com base na comparação de atributos de todas as alternativas viáveis e pode ser função da característica sócio-econômica do viajante. Alguns dos modelos de distribuição, tais como o modelo de oportunidades intervenientes e o modelo de gravidade, podem ser formulados como modelos de escolha.
- iii. Modelos físicos de interação espacial: os primeiros modelos de distribuição de viagens não eram baseados nos princípios econômicos de maximização da utilidade. Ao contrário, eram derivados de postulados considerando a interação espacial, os quais eram largamente baseados nas analogias com fenômenos físicos. Por esta

razão, os modelos derivados destas aproximações são referidos como modelos físicos de interação espacial. Com respeito ao comportamento da totalidade de viajantes no sistema de origens e destinos conectados por uma rede de transporte, três abordagens têm sido utilizadas para derivar modelos de distribuição de viagens pertencentes a esta categoria. A primeira é a abordagem gravitacional, baseada na analogia com a lei de Newton. A segunda abordagem é a entrópica, baseada na analogia com a física dos gases. A terceira é a abordagem teórica de rede, baseada na analogia com a teoria de sistemas elétricos e fluxos ótimos de rede.

A ausência explícita de um comportamento microeconômico nos modelos de interação espacial não significa que eles não contenham este comportamento. Na verdade, todos estes modelos postulam que os viajantes são atraídos para vários destinos para satisfazer seus propósitos, e que eles resistirão tanto quanto possível a estender viagens mais caras. Estes modelos tem sido relacionados aos modelos de demanda microeconômico e de comportamento de escolhas do consumidor, além disso, os modelos resultantes desta aproximação são similarmente próximos aos outros dois modelos.

Diferentes tipos de modelos de distribuição tem sido desenvolvidos para auxiliar a investigação futura dos padrões de viagens, KANAFANI (1983) relaciona três propriedades básicas para modelos de distribuição:

- a) Conservação. O tráfego estimado deve satisfazer as equações básicas de conservação ($O_i = \sum_j^n v_{ij}; D_j = \sum_i^n v_{ij}; \sum_i^n O_i = \sum_j^n D_j$). A propriedade de conservação deve ser imposta quando o modelo de distribuição for utilizado na estimativa de fluxos v_{ij} ou a soma da linha e coluna, O_i e D_j .

Todavia, quando O_i e D_j são dados exógenos, provenientes de outros modelos, tal como no caso de análises de geração de viagens, não é necessário que as equações sejam satisfeitas, pois não há porque estimativas de dois modelos separados devam ser exatamente iguais.

Dentro desta consideração, têm-se realizado muitos estudos na tentativa de encontrar nos modelos de distribuição de viagem fatores de correção que garantam que as produções e atrações de viagens previamente estabelecidas sejam iguais aos valores de entrada de O_i e D_j .

- b) Não-negatividade. Esta é uma regra simples que afirma que todos os valores de v_{ij} , estimados por um modelo, devem ser não negativos. Todavia, alguns modelos de distribuição (os lineares, por exemplo) podem produzir resultados negativos, caso não sejam tomados os devidos cuidados.
- c) Divisibilidade e compressibilidade. Esta regra se aplica ao processo de distribuição de viagens em que origens e destinos são definidas em termos de zonas de tráfego, ou seja, de áreas. A divisibilidade exige que, se uma zona é dividida em duas, então a soma das viagens originadas nestas ou atraídas por estas deve ser igual ao total observado antes da divisão. Por exemplo, se uma zona (v) de destino j é dividida em duas zonas, então a regra de divisibilidade requer que os valores de tráfego estimados pelo modelo devem satisfazer a seguinte condição:

$$v_{ij}' + v_{ij}'' = v_{ij} \text{ para todos os } i.$$

Esta propriedade garante que a soma da coluna e da linha continue a mesma, apesar da redefinição do zoneamento adotado na análise. A compressibilidade é o oposto, e exige que, se duas zonas são comprimidas em uma, o fluxo de tráfego calculado através do modelo para a nova zona deve ser igual a soma dos valores para as duas zonas originais. Deve-se notar que esta propriedade não é satisfeita, exceto em modelos lineares. Os

modelos de distribuição de viagens mais usados são funções não-lineares e não satisfazem a propriedade. Na prática, seria suficiente, todavia, que o modelo produzisse resultados que satisfizessem aproximadamente as condições de divisibilidade e compressibilidade.

Dentre os modelos de distribuição de viagens utilizados para a obtenção de matrizes O/D a partir de contagens embarque-desembarque, encontram-se os modelos de programação linear, oportunidades, eletrostáticos, modelo de analogia ao fluido, entrópicos, máxima probabilidade (algoritmo SYNODOM), modelos gravitacionais, distribuição de fluxos em uma rede, e o modelo Ônibus-O/D

4.3 - Modelo de programação linear

A programação linear é uma técnica de otimização desenvolvida originalmente para lidar com problemas militares, que trata de determinar a atribuição ótima de recursos para alcançar determinados objetivos. Basicamente a técnica determina os valores não negativos das variáveis (X_1 a X_n) que minimizem (ou maximizem) uma função linear dessas variáveis (a função objetivo) satisfazendo um conjunto de desigualdades lineares referentes às variáveis (as restrições).

A formulação geral do modelo para resolver o problema da distribuição de viagens com m origens e n destinos é minimizar a função:

$$Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} C_{ij} \quad (4.1)$$

sujeita as restrições:

$$a \quad X_{ij} \geq 0 \quad (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n)$$

$$b \quad \sum_{j=1}^n X_{ij} = O_i \quad (i = 1, \dots, m)$$

$$c \quad \sum_{i=1}^m X_{ij} = D_j \quad (j = 1, \dots, n)$$

onde:

X_{ij} = valores das transferências interzonais (a serem determinados pelo modelo);

C_{ij} = custo de se fazer a viagem, isto é, distância entre os centróides das zonas i e j ;

Z = valor da função linear das variáveis a ser minimizado;

O_i = total das viagens originadas em i ;

D_j = total das viagens atraídas por j .

O modelo de programação linear para obtenção de matriz O/D utilizando dados de pesquisas embarque-desembarque foi testado por KIKUCHI & PERINCHERRY (1992), em uma linha de trem. No método desenvolvido pelos autores, o analista tem a vantagem de poder incorporar ao modelo estimativas do número de passageiros que embarcam e desembarcam em determinados pontos de uma linha de transporte. Estas informações podem ser de conhecimento do analista familiarizado com o padrão O/D da linha ou fornecidas pelos funcionários da empresa operadora. A utilização destes dados aumenta a precisão dos resultados obtidos, além de diminuir o número necessário de interações para convergência do modelo.

O método requer conhecimentos de programação linear além do padrão de embarque-desembarque referente a alguns pontos ao longo da linha de transporte público. FERREIRA e KAWAMOTO (1998), utilizando os dados de embarque-desembarque e distâncias médias entre pontos da

pesquisa de KIKUCHI & PERINCHERRY (1992), obtiveram resultados similares utilizando um modelo gravitacional restringido.

4.4 - Modelo de oportunidades

O modelo de oportunidades introduz o conceito de probabilidade como fundamentação teórica para a distribuição de viagens. Ele foi desenvolvido na década de 40 nas pesquisas realizadas em estudos de transporte, sendo que a primeira versão destes modelos deve-se à Samuel A. Stouffer, posteriormente aprimorada por Scheider em 1959 (ORTÚZAR & WILLUMSEN, 1994).

Para STOUFFER (1940), o movimento de pessoas no espaço é um assunto básico da investigação sociológica, e assume que não existe uma relação entre a mobilidade e a distância. Stouffer verificou inicialmente que o número de pessoas que se deslocam a uma certa distância é diretamente proporcional ao número de oportunidades oferecidas àquela distância e inversamente proporcional ao número de oportunidades geograficamente intermediárias.

O modelo preconiza que: “a tendência da viagem é de ser tão curta quanto possível, mas seu comportamento é ditado pela probabilidade de terminar em qualquer destino que encontre - não é sempre possível terminar no destino mais próximo; deve-se considerar um destino alternativo e, se este não é aceitável, considera-se um outro próximo a esse e assim por diante” CHICAGO AREA TRANSPORTATION STUDY^{4.6} apud BRUTON, (1979).

KANAFANI (1983) demonstra que, quando a distribuição parcial de oportunidade de destino de viagem é conhecida, então os modelos de gravidade e oportunidade são equivalentes.

O modelo de oportunidade apresenta a vantagem de responder às políticas implantadas; sua formulação tem uma base conceitual forte, desde que seja dirigida aos interesses individuais; pode ser calibrado usando técnicas estatísticas bem estabelecidas.

Porém o modelo apresenta algumas reservas quanto ao seu uso: parâmetros de calibração têm de ser estimados para o futuro (sendo que este é desconhecido e incerto); sendo difícil a inserção de fatores sócio-econômicos para viagens dentro do modelo.

4.5 - Modelo eletrostático

Baseado na Lei da Força Eletrostática de Coulomb, R. T. Howe desenvolveu a teoria do “campo eletrostático” para distribuir os movimentos individuais. “Dada uma distribuição inicial de unidades de carga negativa, correspondendo aos centros de residência e as distribuições de centros de carga positiva, representando os locais de empregos com magnitudes que igualam o número de pessoas empregadas, a probabilidade dos movimentos entre locais de residências e de trabalho pode ser vista tendo como base a teoria do campo eletrostático” (HOWE^{4.7} apud BRUTON 1979).

A aplicação do modelo requer as seguintes hipóteses:

4.6 CHICAGO AREA TRANSPORTATION STUDY (1960). Final Report Volume II, State of Illinois, Country of Cook & City of Chicago apud BRUTON, M. J. (1979). Introdução ao planejamento dos transportes. 2. ed. Rio de Janeiro, Editora Interciência Ltda.

4.7 HOWE, R. T. (1962). A theoretical predication of work trip patters. *Highway Research Board*, nº 347 BRUTON, M. J. (1979). Introdução ao planejamento dos transportes. 2. ed. Rio de Janeiro, Editora Interciência Ltda.

- a) a área de estudo é um sistema fechado;
- b) o padrão de viagens é estável;
- c) os movimentos entre dois lugares variam em relação ao uso do solo, porém independem do modo de viagem;
- d) todos os locais de trabalho possuem uma hierarquia de emprego;
- e) a separação espacial entre zonas de residência e emprego é considerada como sendo uma distância em linha reta;
- f) os movimentos ocorrem dentro do sistema por causa do desequilíbrio inicial entre as cargas positivas (empregos) e as cargas negativas (pessoas).

As equações do modelo são:

$$V_{P_i Q_j} = \frac{\frac{Q_j}{R_{ij}} P_i}{\sum_{j=1}^m \frac{Q_j}{R_{ij}}} (i = 1, 2, \dots, m) \quad (4.2)$$

$$V_{Q_j P_i} = \frac{\frac{P_i}{R_{ij}} Q_j}{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{R_{ij}}} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4.3)$$

onde:

$V_{P_i Q_j}$ = probabilidade de movimento da zona i para a zona j;

P_i = número de trabalhadores morando na zona i;

Q_j = número de empregos disponíveis na zona j;

R_{ij} = distância em linha reta da zona i à zona j;

$V_{Q_j P_i}$ = probabilidade de movimento da zona j para a zona i;

A primeira equação assegura a obtenção do número provável de trabalhadores de cada zona de residência. A segunda assegura a alocação do número provável de trabalhadores em cada zona de emprego. Entretanto,

as duas equações fornecem diferentes conjuntos de viagens e, então, deve-se aplicar o processo de balanceamento, usando fatores de balanceamento, para se evitar a super ou a sub atribuição de viagens individuais às diferentes zonas de tráfego.

A desvantagem deste método é que lida com sistemas fechados. A semelhança com os primeiros modelos de gravidade implica que ele tem as mesmas falhas, embora nenhuma tentativa tenha sido feita para superar essas falhas.

4.6 - Método do fluido

O método trata o veículo de transporte como um container movendo-se ao longo de uma rota na qual os passageiros localizados nos pontos de parada vão embarcando, e como um fluido, são instantânea e completamente misturados. Após os passageiros terem embarcado e percorrido uma certa distância mínima requerida em relação ao seu ponto de embarque, e se não tiverem previamente desembarcado, estes estarão aptos à desembarcar. Percorrida a distância mínima requerida, uma amostra representativa de usuários é desembarcada nos pontos ao longo da rota. O método assume que, em um dado momento, todos os passageiros estarão provavelmente aptos a desembarcar.

O método de analogia com fluido ou método Tsygalnitzky foi utilizado por SIMON & FURTH (1985) para a obtenção de uma matriz O/D a partir de dados de embarque-desembarque em linhas de ônibus na Califórnia, porém BEN-AKIVA^{4.8} apud FURTH & NAVICK (1993a) chamou este método de

4.8 Ben-Akiva, et al. (1985). Alternative methods to estimate route level trip tables and expand on-board surveys. Transportation Research Record, n.1037, p. 01 - 11. apud FURTH, P.G.; NAVICK, D. S. (1993a). Bus route O-D matrix generation: relationship between biproportional and recursive methods. Transportation Research Record, n.1338. p.14 - 21.

oportunidades intervenientes, devido a este seguir a clássica lógica do modelo de oportunidades dando prioridade aos destinos mais próximos.

FURTH & NAVICK (1993a) demonstraram que o método Tsygalnitsky (método recursivo) é um caso especial do método biproporcional quando se utiliza apenas dados de embarque-desembarque para gerar uma matriz O/D, sendo que seu uso é razoável em certos tipos de rotas, as quais tenham distâncias curtas entre pontos e com pequenas interferências de outras linhas.

Esta analogia ao fluido assume uma estimativa de uma única matriz O/D muito simples. Numerando-se os pontos ao longo da rota de forma crescente, as variáveis usadas são: v_{ij} = volume de passageiros indo do ponto i para o ponto j , $i < j$; v_i = volume de passageiros embarcados no ponto i , $j > i$; $v_j = \sum v_{ij}$ = volume de passageiros desembarcando no ponto j , $i < j$; e_{ij} = volume de passageiros que embarcam em i , eleitos para desembarcar em j ; m = mínima distância de viagem, medida em número de pontos.

Passageiros embarcados em i são eleitos para desembarcar em j , se estes tiverem viajado a distância mínima requerida (isto é, se $j - i \geq m$), e se não tiverem desembarcado em um ponto anterior a j . (Enquanto não existirem prováveis complicações a uma distância mínima requerida, assume-se em um caso simples um mínimo de $m = 1$).

O cálculo segue assumindo que $e_{ij} = v_{ij} = 0$ para todo par O/D (i, j) no qual $j - i < m$. Pelo mesma suposição, $e_{ij} = v_{ij}$ para todo par (i, j) no qual $j - i = m$. A estimativa procede coluna por coluna, começando com a coluna $j = m + 1$ (o primeiro ponto no qual deva haver um desembarque). A cada ponto j , e_{ij} passageiros são eleitos para desembarcar, enquanto v_{ij} foram observados desembarcando. Esta fração é aplicada para todo ponto de embarque i no qual existem passageiros eleitos, isto é, $v_{ij} = f_{ij}e_{ij}$ para todo $i = 1, \dots, j - m$.

Antes de proceder ao próximo ponto de desembarque ($j + 1$), os passageiros eleitos são reduzidos do número que desembarcou em j .

1 - *Início*

$$v_{ij} = 0$$

$$e_{ij} = 0 \quad \text{para } i, j \text{ no qual } j < i + m$$

$$e_{i,i+m} = v_i \quad \text{para todo } i = 1, \dots, n - m$$

$$j = m + 1$$

2 - *Cálculo*

$$e_{.j} = \sum e_{ij}$$

$$f_j = \frac{v_{.j}}{e_{.j}}$$

$$V_{ij} = f_j e_{.j} \quad \text{para } i = 1, \dots, j - m$$

$$e_{i,j+1} = e_{ij} - v_{ij}$$

3 - *Voltar*

Se $j = n$, *parar*

caso contrário, fazer $j = j + 1$ e ir para 2

4.7 - Modelos entrópicos

O método de maximização da entropia foi apresentado pela primeira vez por Shannon em 1948. Em 1957, Jaynes 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 um sistema de transporte pode identificar 3 níveis: micro, meso e macronível. A descrição destes 3 níveis pode ser encontrada em FLEMMING (1993):

- Micronível: Neste nível tem-se a descrição de detalhes para cada “indivíduo”, isto é, sua origem “i”, seu destino “j”, tempo de viagem,

etc. Portanto neste nível tem-se informações sobre cada micro-estado do sistema (ou evento elementar).

- Mesonível: 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.
- Macronível: Este é considerado o nível inferior de descrição do sistema quando comparado aos demais níveis. As informações sobre o macro-estado do sistema são obtidas exogenamente. Neste contexto as informações são caracterizadas pelo número total de viagens geradas (O_i) e atraídas (D_j) em cada zona, custo total de transporte, etc.

Desde então os modelos entrópicos foram usados para criar uma ampla classe de modelos de distribuição de viagens, como o gravitacional e o modelo de oportunidades.

Considerando que existam D pessoas no sistema que efetuam viagens entre essas origens e destinos, uma determinada distribuição de viagens, dada pela matriz T , é definida como sendo um estado do sistema. Assim, uma matriz é determinada para fluxos entre origens e destinos e não é específica para viagens particulares. O modelo também descreve a conduta agregada do sistema. O número de maneiras pelas quais V viagens podem assumir um dado estado ou uma distribuição $T=[V_{ij}]$, para todos os i e j , pode ser determinada através de:

$$W(T = \{V_{ij}\}) = \frac{D!}{\prod_{ij} V_{ij}!} \quad (4.4)$$

D = total de viagens observadas no sistema, e,

V_{ij} = número de viagens de i para j.

Supondo, então, que existam D viajantes no sistema: D_{11} pessoas que viajam de 1 para 1; o número de maneiras diferentes de se ter essa situação pode ser obtido através da combinação $C_{D, D_{11}}$; dos restantes $(D - D_{11})$, D_{12} viajam de 1 para 2; a combinação $C_{(D-D_{11}), D_{12}}$, é o número de maneiras possíveis de se obter essas duas situações conjuntas.

Supõe-se, adicionalmente, que o estado associado ao menor W ocorre com maior freqüência.

A maximização de W sujeita a restrições de viagens produzidas e atraídas e de custo médio, leva ao modelo com a seguinte característica:

$$V_{ij} = A_i \cdot B_j \cdot O_i \cdot D_j \cdot e^{-\gamma \cdot C_{ij}} \quad (4.5)$$

onde:

V_{ij} = número de viagens da origem i para o destino j;

A_i = fator de balanceamento das origens;

B_j = fator de balanceamento dos destinos;

O_i = número de viagens que têm origem na zona i;

D_j = número de viagens com destino em j;

C_{ij} = custo da viagem entre i e j;

γ = multiplicador de Lagrange.

A calibração do modelo pode ser feita pelo método iterativo, método Furness, métodos de busca.

4.8 - Algoritmo SYNODM (matrizes sintéticas origem-destino)

STOKES & MORRIS (1980) descrevem o uso do programa computacional SYNODM, o qual utiliza um algoritmo derivado do modelo de gravidade para estimar o total de veículos que entram e saem de cada rampa em uma via expressa. Analogamente, pode-se imaginar que o itinerário a ser percorrido em uma linha de ônibus seja, por comparação, uma via expressa, e as rampas de entrada e saída da via sejam os pontos de embarque e desembarque. Desta forma podemos utilizar o algoritmo para estimar matrizes O/D para linhas de ônibus a partir das contagens de embarque e desembarque.

O método inicialmente considera o caso de uma matriz completa O/D (isto é, uma matriz na qual todas as entradas de células não contenham zero). Com r rampas de entrada (embarques) e c rampas de saídas (desembarques), as estimativas de viagens entre rampas podem ser obtidas de:

$$V_{ij}^* = \frac{(O_i \cdot D_{\cdot j})}{S} \quad (4.6)$$

onde:

V_{ij}^* = estimativa de viagens entre a origem i e o destino j ;

O_i = volume total entrando na origem i ;

$D_{\cdot j}$ = volume total saindo no destino j ;

$$S = \sum_{i=1}^r O_i = \sum_{j=1}^c D_{\cdot j}$$

A equação (4.6) estima a máxima probabilidade de uma célula individual para objetivos estatisticamente independentes em uma matriz origem-destino. Embora esta formulação não leve em conta qualquer método de comportamento de viagem, nem leve em consideração a separação espacial entre origens e destinos, proporciona uma medida conveniente para avaliar a precisão do método de estimativa e a aceitação da suposição da independência estatística das origens e dos destinos (HAUER & SHIN^{4.9} apud STOKER & MORRIS, 1980).

Especificamente, sob a suposição de independência, a estatística $\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \left[\frac{(V_{ij} - V_{ij}^*)}{V_{ij}^*} \right]$, onde V_{ij} é o fluxo observado da origem i para o destino j , segue uma distribuição qui-quadrado com $(r-1)$ e $(c-1)$ graus de liberdade.

O problema fundamental na equação (4.6), é que os fluxos O/D são estimados utilizando somente os totais de viagens das origens e dos destinos. Conseqüentemente, para duas matrizes O/D podem haver valores de células completamente diferentes, porém com o mesmo total nas origens e os nos destinos, desta forma a equação (4.6) é capaz de resultar duas ou mais matrizes idênticas. Então, intuitivamente, pode-se esperar erros bastante grandes nos V_{ij}^* obtidos da equação (4.6).

Uma típica matriz O/D de uma via expressa para fluxos em uma direção, pode ser representada pela figura 3.2 (matriz triangular superior). Algumas mudanças de viagens ao longo da via expressa não são permitidas (isto é, o resultado da matriz O/D não é completo). A estrutura desta matriz implica que, para as seções da via expressa onde cada rampa de entrada é acompanhada de uma rampa de saída alguns metros corrente abaixo,

4.9 Hauer, E., Shin, B. T. (1980). Estimating of origen-destination matrices from observed flows: simple systems. Research Report, nº 65, Departament of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, Canada. apud STOKES, R. W.; MORRIS, D. E. (1980). Application of an algorithm for estimating freeway trip tables. Transportation Research Record, 976, p. 21-25.

poucos veículos entrarão na via expressa e sairão logo a seguir (HAUER & SHIN apud STOKES & MORRIS, 1980).

NIHAN (1982) comenta que a estimativa da máxima probabilidade pode gerar soluções superestimadas para viagens de curta distância em vias expressas, e subestimar viagens de longa distância. Viagens de curta distância são aquelas em que os veículos (pessoas) entram por uma rampa (embarque) e saem na rampa seguinte (desembarque), e viagens de longa distância são aquelas em que os veículos entram por uma rampa e passam por diversas rampas até saírem da via.

Para a matriz mostrada na figura 3.2, está claro que $V_{12}^* = D_{.2}$ e V_{n-1}^* , $n = O_{(n-1)}$. Logo que V_{12}^* e V_{n-1}^* forem encontrados, a soma da linha e da coluna correspondente pode ser ajustado para a solução da matriz procurada. Seguindo esta abordagem, $V_{n-2,n-1}^*$ e $V_{n-2,n}^*$ podem ser obtidos por:

$$V_{n-2,n-1}^* = \left[\frac{O_{(n-2)} \cdot D_{.(n-1)}}{D_{.((n-1))} + D'_{.n}} \right] \quad (4.7)$$

$$V_{n-2,n}^* = \left[\frac{O_{(n-2)} \cdot D'_{.n}}{D_{.((n-1))} + D'_{.n}} \right] \quad (4.8)$$

onde $D'_{.n} = D_{.n} - V_{n-1}^*$. Nas equações (4.7) e (4.8) somente o segundo termo do numerador varia através da linha. Conseqüentemente, a relação entre a soma da linha atual e o total de destino atual pode ser armazenados no computador e usado como fator de distribuição para estimar os V_{ij}^* s das somas das colunas correspondentes.

Para estimativa dos V_{ij}^* s da linha O_{n-3} , estimam-se os novos totais das colunas $D'_{.n-2}$, $D'_{.n-1}$ e $D''_{.n}$, os quais serão utilizados nas equações (4.7) e (4.8). Estima-se $D'_{.n-2}$, $D'_{.n-1}$ e $D''_{.n}$, subtraindo $V_{n-3,n-2}$, $V_{n-2,n-1}^*$ e $V_{n-2,n}^*$ dos

totais das colunas D_{n-2} , D_{n-1} e D'_n . Para a linha O_{n-4} estimam-se os novos $D''_{.n-3}$, $D''_{.n-2}$, $D''_{.n-1}$ e $D'''_{.n}$ subtraindo os V_{ij} 's da linha O_{n-3} dos totais $D_{.n-3}$, $D'_{.n-2}$, $D'_{.n-1}$ e $D''_{.n}$, os quais serão utilizados novamente nas equações (4.7) e (4.8). E assim sucessivamente, até a linha O_1 .

O conhecimento do padrão de viagens e de estimativas de viagens entre dois pontos pode ser incorporado na matriz e utilizado no desenvolvimento do algoritmo, produzindo assim uma redução substancial do erro médio de viagens.

4.9 - Modelo gravitacional

O modelo de gravidade para distribuição de viagens nasceu da analogia à lei da gravitação universal de Newton, de 1686. O início da aplicação do modelo de gravidade data de 1885, quando Ravenstein estudou fluxos de imigrantes e observou que o número de pessoas que se movimentaram entre quaisquer pares de cidades parecia ser proporcional ao tamanho delas e inversamente proporcional à distância entre elas. Segundo KAWAMOTO (1994), Lille, em 1891, estudando a rede de transportes ferroviários da Alemanha, sugeriu algo semelhante.

O grande impulso ao modelo deu-se na década de 50, quando Voorhees, baseado nos trabalhos de Reilly e em oposição a lei de Newton, determinou valores do expoente diferentes de dois para a distribuição de viagens com motivos diferentes. Assim foi realçada a importância dos valores específicos de atratividade e resistência à viagem e reconhecida a influência do propósito nos padrões de viagem.

Segundo BRUTON (1979) a primeira aplicação real da técnica do modelo gravitacional ocorreu em 1955, quando H. J. Casey Jr. (CASEY^{4.5} apud BRUTON, 1979) adaptou a lei de Reilly e sugeriu uma abordagem para sintetizar viagens com objetivo de compras e áreas compreendidas entre regiões da cidade. Na sua formulação mais simples o modelo tem a seguinte forma funcional:

$$V_{ij} = \frac{\alpha P_i P_j}{d_{ij}^2} \quad (4.9)$$

onde P_i e P_j são as populações das áreas de origem e destino, respectivamente; d_{ij} é a distância entre i e j , α é um fator de proporcionalidade.

Este modelo logo foi considerado uma analogia muito simplista com a lei de gravidade e prontamente houve melhoras, incluindo o uso total de viagens (O_i e D_j) ao invés do total da população, e um parâmetro n , potência de d_{ij} , a ser calibrado. Diferentes estudos têm estimado valores de potência variando entre 0,65 e 3,50.

Posteriormente o modelo foi generalizado, assumindo que o efeito distância ou “separação” poderia ser melhor representado por uma função decrescente de distância, tempo de viagem ou custo entre zonas.

$$V_{ij} = \alpha O_i D_j f(c_{ij}) \quad (4.10)$$

onde $f(c_{ij})$ é uma função generalizada do custo de viagem com um ou mais parâmetros para calibração. Esta função geralmente recebe o nome de função de impedância, porque ela representa um obstáculo que desencoraja

4.5 CASEY, H.J. (1955). *Applications to traffic engineering of the law of retail gravitation*, Traffic Quarterly, Eno Foundation. Apud BRUTON, M. J. (1979). Introdução ao planejamento dos transportes. 2. ed. Rio de Janeiro, Editora Interciência Ltda.

a viagem, como a distância (tempo) ou aumento do custo. Versões normalmente usadas para esta função são:

$$f(c_{ij}) = \exp(-\beta c_{ij}) \quad \text{função exponencial negativa}$$

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^{-n} \quad \text{função potência inversa}$$

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^n \exp(-\beta c_{ij}) \quad \text{função combinada.}$$

A forma geral destas funções para diferentes valores de seus parâmetros é dada pela figura 4.1:

Figura 4.4 - Diferentes funções de restrição

Fonte: ORTÚZAR & WILLUMSEN (1994)

ORTÚZAR & WILLUMSEN (1994) consideram o modelo de gravidade o de maior entendimento dentre os modelos de distribuição, e tem a vantagem de estimar as viagens para cada célula da matriz sem usar diretamente uma matriz observada.

A obtenção de uma matriz ponto de origem/ponto de destino a partir de dados de pesquisa embarque-desembarque foi abordada por KAWAMOTO (1994). Este utilizou um modelo gravitacional restringido, aplicado na distribuição de viagens. A pesquisa supõe que o número de

viagens que ocorre entre i e j da linha é diretamente proporcional ao número de passageiros embarcados em i , ao número de passageiros desembarcados em j , e ao comprimento da viagem entre i e j . A diferença fundamental está nesta última suposição. Nela está implícito que o usuário de transporte coletivo tem um modo alternativo de viagem a caminhada e que, portanto, dificilmente utiliza o transporte coletivo para percorrer pequenas distâncias. Além disso, adota-se como uma restrição adicional o comprimento médio (ou total) de viagem.

O modelo gravitacional apresenta maior simplicidade matemática quando comparado a outros métodos de obtenção de matrizes a partir de pesquisas embarque-desembarque (ORTÚZAR & WILLUMSEN, 1994).

O modelo apresenta como desvantagens a necessidade de que um considerável número de ajustes e manipulações sejam feitas para que se encontre o resultado satisfatório, não garante que os fatores de tempo de viagem e os fatores sócio-econômicos assumidos no modelo permanecerão constantes ao longo do tempo e, finalmente, necessita de aferição estatística.

4.10 - Modelo de equilíbrio

DI PIERRO (1985) expõe um método de obtenção de matrizes ponto de origem/ponto de destino para passageiros de ônibus urbanos a partir de pesquisas de contagem embarque-desembarque.

O método busca determinar fluxos de passageiros nos trechos de rede de transporte públicos através das ocupações dos ônibus que utilizam cada trecho. Pressupõe-se que, para cada par de zonas de origem e destino, sabe-se por quais trechos da rede o passageiro irá viajar. Isso é

feito através de um método de alocação de viagens. Com base nessas informações constrói-se um sistema de equações, onde o fluxo de passageiros observado em cada trecho se iguala à soma das viagens entre pares de zonas que utilizam aquele trecho.

Para a determinação da matriz de viagens de ônibus a partir de dados de pesquisa E/D é necessária a estimativa de:

E_t^{kl} = total de passageiros que entram no ônibus da viagem k da linha l no trecho t

D_t^{kl} = total de passageiros que desembarcam do ônibus da viagem k da linha l no trecho t

O_{t0}^{kl} = ocupação do ônibus da viagem k da linha l no trecho t_0

$$O_{t0}^{kl} = \sum_{t=1}^{t0} [E_t^{kl} - D_t^{kl}] \quad (4.11)$$

ou

$$O_{t0}^{kl} = \sum_{t=1}^{t0} [E_t^{kl}] - \sum_{t=1}^{t0} [D_t^{kl}] \quad (4.12)$$

E_t^l = média do número de passageiros que embarcam num ônibus da linha l no trecho t

$$E_t^l = \left[\sum_{k=1}^{NI} E_t^{kl} \right] \cdot \frac{1}{NI} , \quad (k = 1, 2, 3...NI) \quad (4.13)$$

NI = número de viagens pesquisadas na linha l

D_t^l = média do número de passageiros que desembarcam de um ônibus da linha l no trecho t

$$D_t^l = \left[\sum_{k=1}^{NI} D_t^{kl} \right] \cdot \frac{1}{NI} , \quad (k = 1, 2, 3...NI) \quad (4.14)$$

O_{t0} = ocupação média de um ônibus da linha l no trecho t_0

$$O_{t0}^l = \sum_{t=1}^{t0} E_t^l - D_t^l \quad (4.15)$$

V_t^l = volume de passageiros da linha l no trecho t durante um período de tempo T (amostragem)

S = percentual dos ônibus pesquisados durante o período de tempo T (amostragem)

$$V_t^l = O_t^l Nl \frac{1}{S} \quad (4.16)$$

V_t = volume total de passageiros no trecho t durante o período de tempo T

$$V_t = \sum_l V_t^l = \sum_l O_t^l Nl \frac{1}{S} \quad (4.17)$$

P_{ij}^t = probabilidade de um passageiro com origem em i e destino em j escolher um ônibus que passe no trecho t

Equação fundamental para determinação da matriz de viagens $[T_{ij}]$ a partir da pesquisa E/D (embarque/desembarque)

$$V_t = \sum_i \sum_j T_{ij} P_{ij}^t \quad * \quad (4.18)$$

onde:

V_t = é determinável através da pesquisa E/D

P_{ij}^t = é determinável através de um método de alocação

T_{ij} = são incógnitas em número de $(Z^2 - Z)$ onde Z é o número de zonas de tráfego

Portanto, é preciso que a pesquisa E/D envolva pelo menos $(Z^2 - Z)$ trechos t, caso contrário a equação * torna-se indeterminada. Esse problema

poderá ser resolvido aproximando-se as viagens T_{ij} através de um modelo gravitacional como segue:

$$T_{ij} = KO_i D_j A_i B_j f(c_{ij}) \quad (4.19)$$

onde:

O_i = total de viagens originadas na zona i;

D_j = total de viagens destinadas à zona j;

$f(c_{ij})$ = função impedância de viagem entre i e j;

c_{ij} = custo da viagem entre i e j;

K = constante a ser calibrada;

A_i e B_j são fatores de balanceamento e dependem do tipo de restrição imposta ao modelo, como segue:

- modelo com restrição simples: $A_i = \left[\sum_j D_j \cdot f(c_{ij}) \right]^{-1}$
- modelo normalizado: $A_i = \left[\sum_j D_j \right]^{-1}$ e $B_j = 1$ para ambos os casos
- modelo com restrição dupla: $A_i = \left[\sum_j D_j B_j \cdot f(c_{ij}) \right]^{-1}$
 $B_j = \left[\sum_i O_i A_i \cdot f(c_{ij}) \right]^{-1}$

Assim, os fluxos V_t no trecho t ficam:

$$V_t = \sum_i \sum_j KO_i D_j A_i B_j f(c_{ij}) P_{ij}^t \quad ** \quad (4.20)$$

os valores de O_i e D_j podem ser obtidos através da pesquisa E/D:

$$O_i = \sum_l \sum_t (E_t^l - TE_t^l) x, \quad x = \begin{cases} 1 & \text{se } t \in i \\ 0 & \text{se } t \notin j \end{cases} \quad (4.21)$$

$$D_j = \sum_i \sum_t (D_t^i - TD_t^i) y, \quad y = \begin{cases} 1 & \text{se } t \in j \\ 0 & \text{se } t \notin j \end{cases} \quad (4.22)$$

onde:

TE_t^l = total de embarques de transferência na linha l trecho t;

TD_t^l = total de desembarque para transferência na linha l trecho t;

TE_t^l e TD_t^l são obtidos através da pesquisa.

A função impedância de viagem $f(c_{ij})$ é uma função decrescente com o custo c_{ij} de viagem.

$$f(c_{ij}) = \exp(-\beta c_{ij}) \text{ ou } f(c_{ij}) = c_{ij}^{-\alpha}$$

onde β e α são obtidos por calibração

Portanto a equação * * tem apenas duas incógnitas:

K e β (ou α)

A solução pode ser obtida adotando-se valores para o parâmetro β (ou α) da função de impedância e obtendo-se K por regressão linear múltipla.

Adota-se o par de valores (k, β) ou (k, α) que fornece o melhor ajuste na regressão, ou seja, aquele que fornecer o melhor valor de S.

$$S = \sum_t (V_t - \hat{V}_t)^2 \quad (4.23)$$

onde: V_t = volumes observados

$\hat{V}_t$ = volumes modelados (com k e β ou α)

Obtidos (k, β) ou (k, α) tem-se um modelo gravitacional calibrado que permitirá determinar a matriz O/D de viagens de ônibus.

4.11 - Modelo ônibus O/D

GUR & BEN-SHABAT (1997) propõem um método de obtenção de matriz O/D a partir de dados de embarque-desembarque para linhas de transporte público urbano denominado Ônibus O/D. O método utiliza informações de contagens em veículos (embarque-desembarque) combinado com informações sobre a estrutura de desembarque dos passageiros ao longo da viagem, combinando assim modelos de mínimos quadrados e de mínima informação (Fratar).

O modelo Ônibus O/D, busca um meio de combinar três elementos que contribuem para a solução. Primeiro, usa o ajustamento dos mínimos quadrados para considerar a contagem de embarque em um ônibus. Segundo, pode aceitar como entrada uma Matriz de Probabilidade de Desembarque (MPD) básica que inclua informação adicional sobre a estrutura da MPD. Terceiro, utiliza a formulação de mínima informação para a seleção da solução final. O modelo é formulado como um programa de otimização não linear.

A análise do problema envolve a matriz de probabilidade de desembarque (MPD) $X=\{x_{ij}\}$, onde x_{ij} é a probabilidade que um passageiro que embarcou em um ponto i desembarque em um ponto j . De posse do conhecimento de X e do número de embarques em cada ponto i , q_i , pode-se estimar a matriz de embarque $B=\{b_{ij}\}$, como sendo: $b_{ij}=q_i \cdot x_{ij}$.

O problema assume que a MPD exista; sendo que cada passageiro embarcado aleatoriamente tem um destino com base na probabilidade correspondente à sua estação de embarque. Devem ser realizadas contagens de embarque para cada veículo, pois as viagens variam entre si na divisão de embarques entre estações. A distribuição de passageiros desembarcados entre estações em cada viagem depende da divisão do embarque e de X . Desta forma, a estrutura da MPD pode ser deduzida das análises destas variações usando estimativas estatísticas.

Além das contagens de embarque-desembarque, o modelo utiliza outras fontes possíveis de informações adicionais sobre a estrutura da matriz, como por exemplo o conhecimento da tendência de comportamento dos passageiros e de matrizes velhas que eventualmente existam.

A formulação do modelo considera uma linha unidirecional que consiste de S estações (pontos), numerados $1, 2, \dots, S$, onde o passageiro embarca e desembarca. Os pontos podem ser utilizados tanto para embarque quanto desembarque. A linha é servida por veículos. Um passageiro que embarca em um veículo no ponto i deve desembarcar no ponto subsequente j , $i \leq j \leq S$ (sendo permitido o agrupamento de pontos). No primeiro ponto da linha todos os veículos estão vazios, tal como no último ponto, quando os passageiros deixam o veículo. A MPD X estima a probabilidade de um passageiro que embarcou no ponto i desembarcar no ponto j . Assume-se que X é aplicado para todos os passageiros no período de análise.

Durante o período de análise, NT veículos viagem são realizados. N destes veículos são examinados; $2 \leq N \leq NT$. Os veículos examinados são numerados de $1, 2, \dots, N$. Sendo $q(t) = \{q_i(t)\}$ o número de embarque e $r(t) = \{r_i(t)\}$ o desembarque em cada estação i no ônibus t , respectivamente; q e r são assumidos para serem conhecidos sem erros para todos os veículos pesquisados. A base da matriz de probabilidade de desembarque estimada externamente é dada por $F = \{f_{ij}\}$, a qual fornece uma estimativa a priori de X .

O problema é estimar X , dados os vetores $q(t)$ e $r(t)$ para todos os veículos examinados, e a matriz F . A otimização do problema é formulada da seguinte forma:

$$\min Z(X) = A(X) + \alpha \cdot B(X) \quad (4.23)$$

onde

$$A(X) = \sum_j \sum_i [r_j(t) - y_j(t)]^2 \quad (4.24)$$

$$y_j(t) = \sum_i [q_i(t) \cdot x_{ij}] \quad (4.25)$$

$$B(X) = \beta \cdot \sum_i \sum_j \left\{ q_i \cdot x_{ij} \cdot \left[\log \left(\frac{x_{ij}}{f_{ij}} \right) - 1 \right] \right\} \quad (4.26)$$

tal que

$$\sum_j y_j(t) = \sum_j r_j(t) \quad \text{para cada } j \quad (4.27)$$

$$\sum_j x_{ij} = 1.0 \quad \text{para cada } i \quad (4.28)$$

$$x_{ij} = 0 \quad \text{para cada } i \geq j \quad (4.29)$$

$$\text{se } f_{ij} = 0 \quad \text{então } x_{ij} = 0 \quad (4.30)$$

$$\text{se } f_{ij} > 0 \quad \text{então } x_{ij} \geq 0 \quad (4.31)$$

A função objetivo (4.23) minimiza a soma dos valores das duas quantidades, A e B , sobre a variável decisória X , a qual esta sendo estimada, α é um parâmetro escalar.

O valor de A da Equação 4.24 significa a soma do quadrado da diferença entre o número de desembarques observado e o esperado em todos os pontos e veículos. O cálculo do número esperado de desembarques, y , é descrito na equação 4.25. O valor de B da Equação 4.26, é a medida da informação contida em X . O parâmetro β esta incluído na equação 4.26 para normalizar o valor de B para problemas de diferentes tamanhos e números de veículos utilizados. Isto permite que α permaneça inalterado em uma grande família de casos.

As restrições do problema são diretas. A equação 4.27 requer que o número total de embarques e desembarques em cada ponto para o período de análise seja igual. Este, por outro lado, faz com que a estimativa seja consistente com os métodos convencionais de estimação. A equação 4.28 (junto com as equações 4.30 e 4.31) especifica que X descreve as probabilidades. A base da MPD, F , tem duas funções específicas. Primeiro, é usada para especificar células estruturais zero (equação 4.30). Isto inclui todas as “viagens de volta”, e todas as outras células que não podem ter viagens. A segunda função de F é introduzir no procedimento de cálculo a informação externa sobre a estrutura da matriz solução (equação 4.25).

O problema inclui os três elementos necessários para a completa solução do modelo Ônibus O/D: considera a contagem E/D para ônibus individual, obtém e utiliza informação para a matriz básica, e usa a formulação de mínima informação para a seleção final.

O modelo considera ainda que os viajantes possuem um modo concorrente (caminhada) ao modo ônibus, quando estes percorrem pequenas distâncias. A fim de minimizar superestimativas para pequenas distâncias de viagens, o modelo assume um fator racional de impedância para viajantes que escolhem entre os modos caminhar ou pegar um ônibus. Segundo GUR & BEN-SHABAT (1997) os fatores que afetam a escolha do modo de transporte para pequenas distância incluem: a distância entre pontos e a velocidade relativa de caminhada, tarifa do ônibus, frequência, e densidade nas estações. A formulação básica do modelo não considera este problema.

Segundo os autores, em um número limitado de aplicações, a utilização do fator de impedância para pequenos deslocamentos melhorou significativamente o desempenho do modelo. Argumentam porém que o processo como um todo ainda é grosseiro e não suporta ou justifica procedimentos mais refinados para a modelagem dos efeitos dos pequenos deslocamentos.

5 - MODELO PROPOSTO

5.1 - Introdução

Os modelos de gravidade nascidos da analogia à lei gravitacional de Newton são os modelos de maior entendimento prático dentre os modelos de distribuição. Os modelos de gravidade têm sido amplamente utilizados para a predição de matrizes de viagem em planejamento de transportes e igualmente como um modelo descritivo e de otimização (HALLEFJORD & JÖRNSTEN, 1986).

O uso de modelos de demanda aliado a dados de pesquisa simples do tipo embarque-desembarque, permitem que sejam estimadas matrizes O/D para serviços de transporte urbano de ônibus de modo expedito e de baixo custo financeiro.

Diversos autores têm feito uso desses métodos para obtenção de matrizes O/D. KAWAMOTO (1994), utiliza um modelo de gravidade restringido do tipo: $V_{ij} = A_i O_i B_j D_j C_{ij}^\alpha$, para estimar a matriz ponto de origem/ponto de destino de dados de pesquisa E/D. Neste caso, a principal diferença em relação ao modelo de gravidade aplicado na distribuição de viagens é o sinal do expoente. O autor sustenta que a escolha do transporte coletivo tem como modo concorrente a caminhada. Assim, as pessoas que escolheram

transporte coletivo foram motivadas por algumas de suas vantagens em relação à caminhada, quais sejam: a rapidez e o conforto físico, os quais somente aparecem a partir de uma certa distância. E essas vantagens crescem com a distância. Assim, a probabilidade de que um passageiro que embarcou num ponto desça no próximo ponto é quase nula, e ela aumenta à medida que aumenta a distância.

NAVICK & FURTH (1993) demonstram a propensão do usuário em caminhar pequenas distâncias. Em uma matriz elaborada usando o conceito de propensão, argumentam e mostram que uma função gama ($P_{ij} = d_{ij}^{\alpha} \cdot e^{-\beta \cdot d_{ij}}$, onde P_{ij} é a propensão de viajar entre pontos i e j , d_{ij} é a distância entre i e j , e α e β são constantes) descreve adequadamente a propensão para a ocorrência de viagem com a distância. Isto significa que a propensão de se usar transporte coletivo em viagens curtíssimas é pequena, aumenta à medida em que cresce a distância, atinge o máximo para uma dada distância, e a partir daí passa a diminuir.

Sabendo das diferentes propensões de viagens, EASA (1993b) usou no modelo gravitacional um parâmetro (α_i) específico para cada zona de origem em uma função de impedância exponencial relacionada ao tempo de viagem. Testes conduzidos em três áreas indicaram que o modelo reproduziu padrões de viagens com maior precisão que o modelo gravitacional comum.

Outro que utilizou um valor de parâmetro relacionado a cada ponto de origem foi SOUTHWORTH (1978). O autor considerava que os estudos dos valores de parâmetros relacionados a cada origem deveriam ser melhor compreendidos e investigados de forma desagregada. Southworth considerava que a calibração do modelo despendia um tempo computacional excessivamente longo, e esta desvantagem inibia seu uso em relação aos outros modelos.

5.2 - Modelo de gravidade restringido proposto

O modelo proposto ($V_{ij} = A_i \cdot O_i \cdot B_j \cdot D_j \cdot C_{ij}^{\alpha_i}$) está baseado no modelo de gravidade restringido, que tem por finalidade estimar o número de viagens entre duas zonas de tráfego. Supõe-se que o número de viagens que ocorre entre pontos i e j da linha é diretamente proporcional ao número de passageiros embarcados em i e desembarcados em j , e ao comprimento da viagem. Quanto a esta última suposição, o usuário do transporte público tem como modo alternativo de viagem a caminhada e, portanto, dificilmente toma uma condução para viagens de curta distância. O modelo adota ainda como restrição adicional o comprimento médio (ou total) de viagem.

O modelo tem como característica associar a cada origem um valor de parâmetro α_i . A suposição, neste caso, está relacionada a distância de caminhada entre o ponto de embarque e o ponto de desembarque, e a probabilidade do usuário de transporte desembarcar no ponto seguinte ao ponto de embarque.

Enquanto a adoção de um único valor de α para toda matriz implica em considerarmos um custo médio para todas as viagens, a utilização de um valor de α_i associado a cada origem busca reproduzir o custo médio de distribuição de viagens de uma origem em relação aos seus diferentes destinos.

O fato de as pessoas caminharem pequenas distâncias é um indicativo para valores apresentados nas estimativas de matrizes. Estes valores podem ser observados nas células vizinhas à diagonal da matriz (V_{12} , V_{23} , etc.) estimada. Assim, caso os valores de matrizes estimados apresentem valores elevados nas células vizinhas à diagonal da matriz, estas podem não estar representando o comportamento dos usuários em uma determinada situação.

5.2.1 - Formulação do modelo proposto

Conforme o exposto no item 2.3.1.2 - Pontos de Parada, a probabilidade dos passageiros desembarcarem no ponto seguinte ao ponto de embarque é muito reduzida. Esta probabilidade pode ser estimada através de pesquisas de campo e/ou inferidas pelo analista a partir do conhecimento das distâncias entre pontos, além das características de localização dos pontos, tais como: bairros, região central, shopping centers, etc.

Analisando sete linhas de transporte coletivo, duas linhas pertencentes a cidade de Curitiba e cinco pertencentes à Paranaguá, com distância entre pontos variando de 150 a 500 m, observou-se que, em média, 0,01% dos passageiros embarcados em um ponto desembarcavam no ponto seguinte.

Admitindo que apenas uma porcentagem θ do total de passageiros embarcados em um ponto desembarcam no ponto seguinte, podemos restringir as estimativas dos valores vizinhos à diagonal da matriz (V_{12} , V_{23} ,...) à valores previamente calculados. Desta forma estamos reduzindo em n-1 graus de liberdade as distribuições de viagens a serem estimadas em cada linha da matriz.

Respeitando as imposições do modelo gravitacional duplamente restringido e impondo as restrições referentes a θ_i , fazemos:

$$V_{ij} = A_i \cdot O_i \cdot B_j \cdot D_j \cdot C_{ij}^{\alpha_i} \quad (5.1)$$

A denominação “restringido” do modelo de gravidade deve-se ao fato de que os volumes de viagens devem obedecer a duas restrições básicas: a) o total de viagens originadas em uma zona deve ser igual ao total de viagens distribuídas a partir delas; e b) o total de viagens que se dirigem a um ponto

de ônibus deve ser igual ao total de viagens com destino ao ponto de desembarque j.

As equações de restrição do modelo são:

$$\sum_{j=2}^n V_{ij} = O_i \quad (5.2.a)$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} V_{ij} = D_j \quad (5.2.b)$$

No ponto 1 (O_1), adotando o valor θ_1 em V_{12} , ou seja, a porcentagem de passageiros que embarcam no ponto 1 desembarcarem no ponto seguinte, fazemos:

$$V_{12} + V_{13} + V_{14} + \dots + V_{1n} = O_1 \quad (5.3)$$

Substituindo V_{12} por $\theta_1 \cdot O_1$

$$\begin{aligned} \theta_1 \cdot O_1 + V_{13} + V_{14} + \dots + V_{1n} &= O_1 \\ \theta_1 \cdot O_1 + A_1 \cdot O_1 \cdot \sum_j B_j \cdot D_j \cdot C_{1j}^{\alpha_1} &= O_1 \\ \theta_1 &= 1 - A_1 \cdot \sum_{j=2}^n B_j \cdot D_j \cdot C_{1j}^{\alpha_1} \end{aligned}$$

Assim, $V_{12} = \theta_1 O_1$ para a primeira linha da matriz, significa que, de V_{12} desembarca apenas uma porcentagem θ_1 do volume de passageiros embarcados em O_1 . Na segunda linha da matriz temos $V_{23} = \theta_2 O_2$, e assim sucessivamente.

Genericamente temos:

$$\theta_i = 1 - A_i \sum_{j=2}^{n-2} B_j D_j C_{ij}^{\alpha_i} \quad (5.4)$$

Respeitando as restrições do modelo (5.2) temos:

$$A_i = \frac{1 - \theta_i}{\sum_{j=2}^n B_j \cdot D_j \cdot C_{ij}^{\alpha_i}} \quad (5.5)$$

$$B_j = \frac{1 - \theta_j}{\sum_{i=1}^{n-1} A_i \cdot O_i \cdot C_{ij}^{\alpha_j}} \quad (5.6)$$

Os fatores de balanceamento A_i e B_j são, portanto, interdependentes. Isto significa que a estimativa de um conjunto requer os valores do outro conjunto.

Ao adotarmos valores de θ_i para valores vizinhos à diagonal da matriz, estamos impondo valores prévios à estas células da matriz e reduzindo as distribuições de viagens a serem estimadas em cada linha da matriz. Tomemos por exemplo a linha O_{n-2} , ao impormos o valor de θ_{n-2} em $V_{n-2, n-1}$, devemos estimar um valor de parâmetro α_{n-2} , que ajuste as distribuições de viagem da linha O_{n-2} sujeito as restrições de θ_{n-2} , (5.2a) e (5.2b). Desta forma obtemos um parâmetro que satisfaz θ_{n-2} e $V_{n-2, n}$. E assim sucessivamente para as demais linhas da matriz.

A restrição adicional θ_i às células vizinhas da diagonal da matriz, bem como as restrições $\sum_i V_{ij} = D_j$ e $\sum_j V_{ij} = O_i$ não são suficientes para garantir uma única solução, e diversas matrizes podem ser encontradas, bastando que as somatórias das viagens nas linhas e nas colunas satisfaçam as restrições impostas pelo modelo. De fato, há possibilidade de se aumentar ou diminuir o valor de uma célula sem violar as restrições, desde que as outras células sejam alteradas de modo a compensar as variações ocorridas.

Com o intuito de limitar o rearranjo interior da matriz, adota-se o tempo médio (ou total) de viagem como uma restrição complementar. Impõe-

se o tempo médio (ou total) de viagem, calculado a partir de uma amostragem, à totalidade das viagens. Embora o problema persista, sua dimensão é reduzida.

Conhecendo-se os volumes de embarque e desembarque nos pontos sucessivos de uma linha de transporte, pode-se obter o número de pessoas que viajam entre dois pontos através da fórmula:

$$c_i = \sum_{k=1}^i (E_k - D_k) \quad (5.7)$$

onde $D_1 = E_n = 0$

sendo:

c_i = carregamento no trecho;

E_k = passageiros embarcados;

D_k = passageiros desembarcados.

Conhecido o carregamento em cada trecho e o tempo de percurso correspondente, pode-se calcular o tempo total de permanência dos usuários na linha através da fórmula:

$$T = \sum_{i=1}^{n-1} c_i t_i \quad (5.8)$$

onde:

T = tempo total¹⁰

t_i = tempo de percurso do trecho i

^{5.10} Este trabalho utilizou como condição de parada o tempo total (T) de viagem da matriz, o qual é composto pela soma de n T_i 's (soma dos tempos de viagem dos passageiros embarcados no ponto i). A utilização dos diversos T_i como condição de parada no processo de calibração, está limitada a problemas de ordem teórica (visto que os fatores de balanceamento A_i e B_j são interdependentes) e computacional, razão pela qual não foi utilizada esta condição de parada.

5.3 - Calibração

No modelo gravitacional (5.1) existem os parâmetros A_i , B_j , α_i . Os parâmetros A_i B_j são calibrados durante a estimação do modelo de gravidade, como parte direta do esforço para satisfazer as restrições $\sum_i V_{ij} = D_j$ e $\sum_j V_{ij} = O_i$. Pelo menos um dos A_i ou B_j é redundante, assim como existe uma condição adicional $\sum_i O_i = \sum_j D_j = V$, e portanto uma das restrições (Equações 5.2a e 5.2b) é linearmente dependente do resto. O parâmetro α_i deve ser calibrado para assegurar que a distribuição ao longo da viagem seja reproduzida tão próxima quanto possível.

Diversas técnicas de estimativa de parâmetros alfa em modelos de gravidade foram propostas. Uma estimativa deste parâmetro é adoção inicial de um valor qualquer. Estima-se uma matriz, a qual é comparada com uma matriz de viagens observadas. Caso a matriz estimada não esteja muito próxima da matriz observada, adotam-se outros valores para o parâmetro até que o modelo convirja. NOVAES (1986) utiliza a regressão linear simples ou múltipla para estimar o valor de parâmetro a partir de dados da distância entre pontos e do fator de expansão. ORTÚZAR e WILLUMSEN (1994) descrevem o método de Hyman para sua estimativa.

No modelo proposto, a estimativa dos parâmetros assemelha-se ao primeiro caso descrito acima. Inicialmente adotam-se valores quaisquer para os diversos α_i (por exemplo, $\alpha_i = 0$ para $i = 1, 2, \dots, n$ onde n é o número de pontos), valores quaisquer para B_j (por exemplo, $B_j = 1$ para $j = 1, 2, \dots, n$ onde n é o número de pontos de parada em cada linha) e, valores para θ_i (por exemplo 0,01). Os valores de θ_i representam a probabilidade de desembarque no ponto seguinte ao ponto de embarque; estes valores podem ser determinados através de pesquisas de campo ou da sensibilidade e do conhecimento do analista.

Com a adoção de valores iniciais de α_i , θ_i e de B_j , e de posse dos valores de D_j , O_i e C_{ij} estimam-se os valores de A_i , usando a equação (5.5). De posse dos valores de A_i estimam-se os valores de B_j por (5.6).

Com os valores de D_j , O_i , C_{ij} , A_i , B_j e de α_i inicial, estimam-se os valores de V_{ij} através da equação (5.1). Com os valores estimados de V_{ij} estima-se o número de passageiros que passam por cada trecho da rota, e estima-se o tempo total de viagem através da equação (5.8). Esse valor estimado com dados de valores de parâmetros introduzidos é confrontado com a estimativa de tempo total real a partir das contagens de embarque (O_i) e desembarque (D_j) em cada ponto.

Caso a diferença entre o tempo total real e o estimado seja maior que um valor arbitrado, denominado condição de parada, adotam-se novos alfas.

A calibração pode ser resumida da seguinte forma:

- a) A partir dos volumes de embarque e desembarque de cada ponto, estima-se o número de passageiros que passa por cada trecho da rota e o tempo total real de viagem;
- b) Adotam-se valores iniciais para B_j , α_i , θ_i . Estima-se A_i , pela equação (5.5);
- c) Estimam-se os valores de B_j , (equação 5.6);
- d) Estimam-se os valores de V_{ij} (equação 5.1);
- e) Estima-se o tempo total (equação 5.8);
- f) Compara-se o tempo total real com o tempo total estimado. Caso a diferença entre os tempos seja maior que um valor arbitrado, adotam-se novos valores de alfa, caso contrário encerra-se o processo;
- g) Estimam-se pelo método Gauss-Newton os novos valores de alfa pela equação (5.4);
- h) De posse dos novos valores de alfa e de A_i , repete-se o processo a partir de c).

5.3.1 - Determinação do parâmetro α_i

A diferença fundamental do método proposto está no procedimento de adoção de novos valores de alfa. Ao invés de se adotar valores aleatórios para alfa e verificar se o modelo atinge a condição de parada, adota-se um modelo de busca que tem por objetivo orientar a estimativa de um valor de alfa que satisfaça as restrições do modelo (5.2a) e (5.2b) e atinja a condição de parada.

A estimativa do valor do coeficiente alfa para cada linha da matriz é realizada através de (5.4). Desta forma, as novas estimativas de valores α_i passam a ser um problema de resolução de uma equação não linear. Para a solução deste problema, utilizou-se o método de Gauss-Newton.

5.4 - Método de Gauss-Newton

Em muitos problemas de modelo de regressão não linear é mais prático achar as estimativas de mínimos quadrados usando um método de procura direta, em lugar de obter o sistema de equações normais e logo usar algum método numérico para resolver este sistema. O método Gauss-Newton usa a expressão de séries de Taylor para aproximar o modelo de regressão não linear com termos lineares e logo usa mínimos quadrados ordinários para estimar parâmetros. Assim, as iterações destas duas etapas conduzem a uma solução do problema de modelo de regressão não linear. O método começa com valores iniciais dos parâmetros:

$$\gamma_0^{(0)}, \dots, \gamma_{p-1}^{(0)}$$

Logo aproximamos a função resposta para as n observações usando a série de Taylor em torno de $\gamma_k^{(0)}$, $k = 0, 1, \dots, p - 1$. Assim obteremos:

$$f(X_i, \gamma) = f(X_i, \gamma^{(0)}) + \sum_{k=0}^{p-1} \frac{\partial f(X_i, \gamma)}{\partial \gamma_k} (\gamma_k - \gamma_k^{(0)})$$

(5.9)

Mudando a notação:

$$\begin{aligned} f_i^{(0)} &= f(X_i, \gamma^{(0)}) \\ \beta_k^{(0)} &= \gamma_k - \gamma_k^{(0)} \\ D_{ik}^{(0)} &= \frac{\partial f(X_i, \gamma)}{\partial \gamma_k} \end{aligned}$$

onde a derivada é estimada no ponto $\gamma_k = \gamma_k^{(0)}$

Assim, podemos escrever a aproximação de Taylor na seguinte forma:

$$f(X_i, \gamma) \approx f_i^{(0)} + \sum_{k=0}^{p-1} D_{ik}^{(0)} \beta_k^{(0)} \quad (5.10)$$

Uma aproximação do modelo de regressão não linear (5.10) é a seguinte:

$$Y_i \approx f_i^{(0)} + \sum_{k=0}^{p-1} D_{ik}^{(0)} \beta_k^{(0)} + \varepsilon_i \quad (5.11)$$

Se $Y_i^{(0)} = Y_i - f_i^{(0)}$, então:

$$Y_i^{(0)} \approx \sum_{k=0}^{p-1} D_{ik}^{(0)} \beta_k^{(0)} + \varepsilon_i \quad (5.12)$$

onde $i = 1, \dots, n$ e usando a notação matricial, temos:

$$Y^{(0)} \approx D^{(0)} b^{(0)} + \varepsilon \quad (5.13)$$

$$Y^{(0)} = \begin{bmatrix} Y_1 - f_1^{(0)} \\ \vdots \\ Y_n - f_n^{(0)} \end{bmatrix}; \quad \beta^{(0)} = \begin{bmatrix} \beta^{(0)} \\ \vdots \\ \beta_{p-1}^{(0)} \end{bmatrix}$$

$$D^{(0)} = \begin{bmatrix} D_{10}^{(0)} & \dots & D_{1,p-1}^{(0)} \\ \dots & \dots & \dots \\ D_{n,0}^{(0)} & \dots & D_{n,p-1}^{(0)} \end{bmatrix}$$

Da equação (5.13) obtém-se $b^{(0)} = ((Dt)^{(0)} D^{(0)})^{-1} ((Dt)^{(0)} Y^{(0)})$ ou seja, o vetor de estimação dos mínimos quadrados dos coeficientes de regressão.

Usa-se este vetor para obtermos os novos γ_k , ou seja os $\gamma_k^{(1)}$.

$\gamma_k^{(1)} = \gamma_k^{(0)} + b_k^{(0)}$ é a estimativa revisada de γ_k no final da primeira iteração. Assim: $\gamma^{(1)} = \gamma^{(0)} + b^{(0)}$.

5.4.1 - Utilização do modelo de Gauss-Newton no modelo de gravidade restringido

O método de Gauss-Newton é utilizado na calibração do modelo de gravidade restringido para a estimativa dos valores α_i (5.4).

Assim:

$$f_i^{(0)} = f(X_i, \gamma^{(0)})$$

$$X_i = 1 - A_i \sum_j^{n-1} B_j D_j C_{ij}^{\alpha_i}$$

$$\gamma^{(0)} = \alpha_i$$

$$D_{ik}^{(0)} = \frac{\partial f(X_i, \gamma)}{\partial \gamma_k}$$

$$D_{ij}^{(0)} = -A * \sum_{j=2}^n B_j * D_j * C_{ij}^{\alpha_i} * \ln C_{ij}$$

$$Y^{(0)} \approx D^{(0)} b^{(0)} + \varepsilon \quad (5.16)$$

$$Y^{(0)} \begin{bmatrix} Y_1 - f_1^{(0)} \\ \vdots \\ Y_n - f_n^{(0)} \end{bmatrix} ; \quad \beta^{(0)} = \begin{bmatrix} \beta^{(0)} \\ \vdots \\ \beta_{p-1}^{(0)} \end{bmatrix}$$

$$D^{(0)} = \begin{bmatrix} D_{10}^{(0)} & \dots & D_{1,p-1}^{(0)} \\ \dots & \dots & \dots \\ D_{n,0}^{(0)} & \dots & D_{n,p-1}^{(0)} \end{bmatrix}$$

$Y_n = \theta_n$ valor de teta adotado para a linha n;

$f_n^{(0)}$ = valor estimado de teta para a linha n;

Da equação (5.16) obtém-se $b^{(0)} = ((Dt)^{(0)} D^{(0)})^{-1} ((Dt)^{(0)} Y^{(0)})$, ou seja, o vetor de estimação dos mínimos quadrados dos coeficientes de regressão.

Usa-se este vetor para obtermos os novos α_i , ou seja os $\alpha_i^{(1)}$.

Desta forma $\alpha_i^{(1)} = \alpha_i^{(0)} + b_i^{(0)}$ é a estimativa revisada de α_i no final da primeira iteração. Assim: $\alpha^{(1)} = \alpha^{(0)} + b^{(0)}$, ou seja $\alpha_i^{(1)}$ é a estimativa do valor de alfa a ser utilizada no próxima iteração do modelo gravitacional. A cada iteração, os novos valores de alfa são utilizados no processo de estimativa dos valores de A_i , B_j e V_{ij} , até que os valores estimados de V_{ji} satisfaçam as restrições de tempo total impostas.

A estimativa de matrizes a partir de um modelo gravitacional utilizando dados de contagem de embarque e desembarque, distâncias entre pontos e porcentagem de passageiros desembarcados logo após o seu embarque, é iniciado pela adoção de valores quaisquer para α_i , B_j e θ_i . São estimados os valores de A_i através de (5.5) e B_j por (5.6). De posse destes valores é feita a distribuição de viagens através de (5.1). Para iniciar a segunda iteração estimam-se os valores de α_i através de (5.4) utilizando o método Gauss-Newton. De posse dos novos valores de α_i são determinados novos valores de A_i e B_j , dando seqüência ao processo iterativo até que seja atingida a condição de parada.

No nosso caso, a condição de parada foi atingida quando a diferença em módulo do tempo total da matriz real e o tempo total da matriz estimada for inferior a 0,1% do valor do tempo total da matriz real.

O fluxograma da figura 5.1 descreve os procedimentos de entradas e saídas de dados e as rotinas de cálculo para implementação do modelo proposto.

Figura 5.5 - Fluxograma do procedimento de entrada e saída de dados do modelo proposto

5.5 - Obtenção do modelo de gravidade proposto via maximização da entropia

O modelo de gravidade pode ser obtido a partir da maximização da entropia.

WILSON (1967) propôs a maximização de $W[T_{ij}] = \frac{T!}{\prod_{ij} T_{ij}!}$ sujeita a uma série de restrições (onde $T = \sum_{ij} T_{ij}$ = número total de viagens no sistema).

Segundo os procedimentos de Jaynes, Wilson estabeleceu três tipos clássicos de restrições que achava que fossem necessárias para se obter uma boa estimativa de T_{ij} , quais sejam: um conjunto de restrições sobre o número total de viagens originadas em cada zona “i” (denotado por O_i), um conjunto de restrições sobre o número total de viagens atraídas por cada zona “j” (denotado por D_j) e uma restrição sobre a despesa total com viagens no sistema (denotado por C). Estes conjuntos de restrições caracterizam um específico macroestado do sistema.

ULYSSEÁ NETO (1991) descreve a formulação matemática deste problema de maximização com função monótona de $W [T_{ij}]$ como sendo a função objetivo, é dada por:

$$\text{Max} \quad \ln W[T_{ij}] = \ln \left(\frac{T!}{\prod_{ij} T_{ij}!} \right) \quad (5.17)$$

$$\sum_i T_{ij} = D_j \quad (5.18)$$

$$\sum_j T_{ij} = O_i \quad (5.19)$$

$$\sum_{ij} T_{ij} c_{ij} = C \quad (5.20)$$

onde c_{ij} = custo generalizado de viagem entre “i” e “j”.

Usando-se a aproximação para $T_{ij}!$, dada pela fórmula de Stirling:

$$T_{ij}! = T_{ij} \ln T_{ij} - T_{ij} \quad (5.21)$$

pode-se transformar a função objetivo $\ln W[T_{ij}]$ em:

$$H = - \sum_{ij} T_{ij} \ln T_{ij} - T_{ij} \quad (5.22)$$

A função é estritamente côncava e o termo $\sum_{ij} T_{ij} = T$ é uma constante e, portanto, pode ser retirado do problema de maximização sem que a solução seja alterada.

A solução da maximização de (5.22) sujeita as restrições (5.18) a (5.20) pode, então, ser obtida através da maximização irrestrita da função Lagrangeana Ψ , dada por

$$\psi = H + \sum_i \alpha'_i (O_i - \sum_j T_{ij}) + \sum_j \alpha''_j (D_j - \sum_i T_{ij}) + \alpha''' (C - \sum_{ij} T_{ij} c_{ij}) \quad (5.23)$$

onde α'_i , α''_j e α''' são multiplicadores de Lagrange, associados com restrições (5.18), (5.19) e (5.20).

Estabelecendo-se as condições de máximo, passamos a ter um sistema de $m^2 + m + 1$ equações e $m^2 + m + 1$ incógnitas e desta maneira o sistema torna-se perfeitamente determinado.

O ótimo (máximo) pode então ser determinado como segue:

Diferenciando Ψ com relação a T_{ij} e igualando a zero, resulta:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial T_{ij}} = -\ln T_{ij} - \alpha'_i - \alpha''_j - \alpha''' c_{ij} = 0 \quad (5.24)$$

A diferenciação de Ψ reproduz as restrições (5.18) a (5.20). A solução deste problema de maximização é, então, obtida da equação (5.24) mediante o isolamento de T_{ij} . Assim, obtém-se:

$$T_{ij} = e^{-\alpha'_i - \alpha''_j - \alpha''' c_{ij}} \quad (5.25)$$

Fazendo as seguintes transformações:

$$A_i O_i = e^{-\alpha'_i} \quad (5.26)$$

$$B_j D_j = e^{-\alpha''_j} \quad (5.27)$$

obtém-se:

$$T_{ij} = A_i O_i B_j D_j e^{-\alpha''' c_{ij}} \quad (5.28)$$

O modelo (5.28) é o modelo gravitacional de distribuição de viagens obtido por Wilson.

A função de impedância $f(C_{ij}) = e^{-\alpha''' C_{ij}}$, implica que os viajantes tem uma percepção linear do custo de transporte, ou seja, a influência de um acréscimo marginal do custo de transporte é sempre a mesma, independente do custo de viagem.

Através da restrição $\sum_{ij} T_{ij} \ln c_{ij} = C$, ULYSSEA NETO (1991) utiliza uma função de impedância que incorpora a percepção logarítmica dos custos de transporte, resultando em um modelo:

$$T_{ij} = A_i O_i B_j D_j e^{-\alpha \ln C_{ij}} \quad (5.29)$$

Segundo o autor, este modelo é mais recomendado na estimativa de viagens entre localidades em nível regional ou interurbano, onde as distâncias percorridas são consideravelmente maiores do que as percorridas em nível urbano. Podemos observar que o padrão de distribuição de viagens obtido com estes modelos varia para os mesmos dados em relação a função de impedância adotada.

Devido as diferenças sócio-econômicas entre os usuários de transporte público por ônibus e das características das cidades brasileiras, as quais concentram nas periferias as pessoas de baixa renda e os serviços na área central, podemos supor que existe uma percepção diferenciada entre os usuários de um sistema de transporte ao longo de uma linha de transporte quanto ao custo e a distância viajada.

Admitindo que a cada ponto de ônibus exista uma percepção diferenciada do custo e/ou da distância de transporte a ser percorrida em relação aos seus possíveis destinos, fazemos:

$$\sum_j T_{ij} \log c_{ij} = C_i \quad (5.30)$$

$$C_i - \sum_j T_{ij} \log c_{ij} = 0 \quad (5.31)$$

Adotando a restrição (5.30), temos:

$$\psi = H + \sum_i \alpha'_i (O_i - \sum_j T_{ij}) + \sum_j \alpha''_j (D_j - \sum_i T_{ij}) + \sum_i \alpha'''_i (C_i - \sum_j T_{ij} \log c_{ij}) \quad (5.32)$$

Tomando a primeira derivada parcial com respeito a T_{ij} e igualando a zero:

$$\frac{\partial \psi}{\partial T_{ij}} = -\log T_{ij} - \alpha'_i - \alpha''_j - \alpha'''_i \log c_{ij} = 0 \quad (5.33)$$

então:

$$T_{ij} = \exp(-\alpha'_i - \alpha''_j - \alpha'''_i \log c_{ij}) = \exp(-\alpha'_i) \exp(-\alpha''_j) \exp(-\alpha'''_i \log c_{ij}) \quad (5.34)$$

Resultando no modelo:

$$T_{ij} = A_i O_i B_j D_j \exp(-\alpha_i \log c_{ij}) \quad (5.35)$$

$$V_{ij} = A_i O_i B_j D_j C_{ij}^{-\alpha_i} \quad (5.36)$$

O modelo associa para cada origem um parâmetro específico, como sugerido por WILSON^{5.11} apud SOUTHWORTH (1978). A consistência interna de distribuição das viagens é garantida pela satisfação das restrições

5.11 WILSON, A. G. (1970). Entropy in urban regional modelling. London apud SOUTHWORTH, F. (1978). The calibration of a joint trip-distribution and modal-split model with origin-specific cost decay parameters. Area, nº 10, p.252-258.

(5.18) e (5.19). A distância total de transporte é dada pela somatória ($\sum_j^n C_{ij}$) correspondente a cada origem.

6 - APLICAÇÃO DO MODELO

6.1 - Introdução

Neste capítulo, apresentam-se os dados referentes a aplicação do modelo proposto e análise estatística das simulações em 2 linhas de transporte público da cidade de Curitiba e 6 linhas da cidade de Paranaguá. Os dados utilizados nas simulações são provenientes de dados de pesquisa embarque-desembarque, realizadas pelo Departamento de Transportes da Universidade Federal do Paraná.

As características de demanda e tipo de linhas diferem entre as duas cidades. Curitiba é uma cidade com cerca de um milhão e trezentos mil habitantes e tem uma demanda caracterizada por dois picos: manhã e tarde. As linhas referentes a Curitiba são diametraais, ligando dois bairros distintos passando pelo centro da cidade.

Paranaguá situa-se na faixa de cento e vinte mil habitantes e apresenta uma demanda com três picos: manhã, meio do dia e tarde. As linhas de Paranaguá são radiais ligando bairros ao centro da cidade.

Foram realizadas duas simulações para cada conjunto de dados de uma linha. Primeiramente considerando pontos de parada de forma desagregada e em seguida com pontos de parada agregados.

6.2 - Avaliação do desempenho do modelo

Existem diversos métodos estatísticos para avaliar o desempenho de modelos gravitacionais que estimam matrizes O/D (ver por exemplo SMITH & HUTCHINSON, 1981; WILSON, 1976; FURTH & NAVICK, 1993a). Os testes estatísticos propostos são medidas de similaridade e medem a proximidade da matriz observada com a matriz estimada. Os testes estatísticos utilizados neste trabalho são o Chi-quadrado, Phi-normalizado e o Índice de dissimilaridade.

6.2.1 - Chi-quadrado

Segundo WILSON (1976), o teste chi-quadrado é um teste estatístico padrão usado na avaliação de modelos de gravidade para testar as frequências observadas (pesquisadas) e as frequências esperadas (estimadas).

SMITH & HUTCHINSON (1981) consideram o chi-quadrado como uma estatística muito suscetível, porém segundo esses autores, existe algumas dificuldades em seu uso. Para esses autores, valores menores que seis requerem agregação de entrada de matrizes e não existe um método consistente para se fazer isto. COCHRAN^{6.12} apud CONOVER (1980) sugere que nenhum dos valores de entrada deveria ser menor que 1 e não mais que 20% deveria ser menor que 5. Estudos mais recentes indicam que esta regra pode ser ainda mais relaxada (CONOVER, 1980).

O chi-quadrado é definido como:

6.12 COCHRAN, W. G. (1952) The χ^2 test of goodness of fit. *Annals of Mathematical Statistics* 23, 315-534 apud CONOVER, W. J. (1980). *Practical nonparametric statistics*. 2º ed. New York. John Wiley & Sons.

$$\chi^2 = \sum_i \sum_j \frac{(V_{ij} - V_{ij}^*)^2}{V_{ij}^*} \quad (6.1)$$

onde

V_{ij}^* = matriz O/D observada;

V_{ij} = matriz O/D estimada;

V = número total de viagens.

6.2.2 - Índice de dissimilaridade

Segundo GONÇALVES e ULYSSÉA NETO (1993), o índice de dissimilaridade mede a porcentagem de viagens que podem ser realocadas entre pares (i, j), para que a matriz observada coincida com a matriz estimada. O índice de dissimilaridade é dado por:

$$ID = \left(\frac{50}{V} \right) \sum_{ij} |V_{ij}^* - V_{ij}| \quad (6.2)$$

O valor de ID varia entre 0 e 100. Assim, quanto mais próximo de zero for o valor de ID, tanto melhor será a estimativa da matriz.

6.2.3 - Estatística phi-normalizada

Esta estatística é baseada na Teoria da Informação e segundo SMITH e HUTCHINSON (1981), a estatística phi-normalizada mostra-se adequada para a avaliação de modelos de distribuição de viagens. GONÇALVES e ULYSSÉA NETO (1993) definem a estatística phi-normalizada por:

$$\phi = \sum_{ij} \left(\frac{V_{ij}^*}{V} \right) \left| \ln \left(\frac{V_{ij}^*}{V_{ij}} \right) \right| \quad (6.3)$$

O valor de ϕ igual a zero indica que as matrizes observadas e estimadas são idênticas. Assim, quanto menor o valor de ϕ tanto melhor será a matriz O/D de viagens estimadas.

6.3 - Considerações sobre agregações de pontos de parada

Para aplicar o modelo proposto nas linhas de Curitiba e Paranaguá, desenvolveu-se um programa em linguagem Turbo Pascal, descrito no anexo A e apresentado na figura 5.1. O programa foi instalado em um microcomputador com velocidade de 133 megahertz, o tempo de processamento dos dados para a convergência do modelo é próximo a 1 segundo. Os resultados obtidos foram dispostos na forma de matrizes agregadas e desagregadas, e então, avaliadas através das medidas χ^2 , ϕ e ID, definidas nas seções anteriores.

As células das matrizes desagregadas observadas e simuladas representam o número de passageiros em cada par origem-destino, enquanto que, nas matrizes agregadas, cada célula da matriz representa a soma do conjunto de passageiros de diversos pontos de parada.

Devido ao elevado número de pontos de parada em cada linha de transporte público urbano, as matrizes O/D apresentam valores iguais a zero em grande parte de suas células. Isto ocorre porque geralmente não existem mais que 120 embarques por viagem, porém o número de pares origem-destino (O/D) por linha é cerca de algumas dezenas. Para linhas onde existem 30 pontos de parada, os números de pares O/D possíveis são $0,5 \cdot 29 \cdot 30 = 435$. Como resultado, o número de passageiros esperado para a maioria dos pares O/D será muito baixo e, muitas das células da matriz conterão zeros.

Cada linha analisada em Paranaguá teve seus pontos de parada agregados. A agregação de pontos levou em conta as características sócioeconômicas, zoneamento da cidade, total de viagens com origem e destino de cada zona, barreiras físicas e distância de caminhada entre pontos (figura 6.1). Levando em consideração as referências contidas no item 2.3.3, procurou-se agregar pontos de parada de modo que a soma das distâncias entre pontos fosse em torno de 800 metros.

A figura 6.2 mostra as linhas de transporte coletivo e os pontos de parada correspondentes a cada linha.

Na cidade de Paranaguá as distâncias entre pontos nas zonas coletoras (bairros) muitas vezes não excedem a 150 m e muitas vezes os itinerários são circulares dentro bairro. Desta forma, procurou-se agregar em média de 3 a 5 pontos de parada, sempre respeitando os zoneamentos, e características sócioeconômicas. O mesmo procedimento foi realizado para as zonas de penetração e de destino (centro da cidade).

Em Curitiba, onde as linhas simuladas são diametrais, a agregação ocorreu da mesma forma como em Paranaguá. Agregou-se os pontos de parada das zonas coletoras (bairro), zonas de penetração, zona central (centro da cidade), zona de penetração e zona de destino (bairro).

6.4 - Apresentação dos resultados

A tabela 6.1 apresenta os valores para as estatísticas x^2 , ϕ e ID estimados das matrizes O/D obtidas pelo modelo proposto. São apresentados valores de testes estatísticos para linhas de transporte público a partir de matrizes com pontos de parada desagregados e com pontos de parada agregados.

A tabela 6.2 apresenta os valores do teste estatístico x^2 estimado e o valor crítico do x^2 para as linhas de transporte público por ônibus de Curitiba e Paranaguá. São apresentados resultados para linhas de transporte sem agregação de pontos de parada e com agregação pontos de parada.

As linhas pertencentes a cidade de Curitiba são; Água Verde e Taboão. As demais linhas fazem parte do conjunto de linhas da cidade de Paranaguá. As matrizes referentes aos dados de pesquisa do tipo “Santinho”, ou seja, as matrizes reais e as matrizes estimadas através do método proposto encontram-se no Apêndice.

Tabela 6.1 - Valores de ϕ , X^2 e ID estimados com pontos de parada desagregados e agregados

LINHA	ϕ agregado	ϕ desagregado	X^2 agregado	X^2 desagregado	ID agregado	ID desagregado
Água Verde	0,4	1,1	43,4	270,6	22,9	56,0
Água Verde 1	0,6	1,0	34,0	62,2	42,9	53,7
Água Verde 2	0,3	0,8	41,5	230,6	15,4	86,8
Água Verde 3	0,5	1,1	29,2	142,1	27,5	58,1
Água Verde 4	0,3	0,9	49,1	253,3	18,8	60,4
Água Verde 5	0,6	0,6	38,9	43,1	50,4	62,9
Taboão	0,5	1,0	40,5	272,3	31,7	53,0
Taboão 1	0,4	0,9	56,2	122,5	28,7	51,3
Taboão 2	0,5	1,1	55,7	243,9	29,3	57,6
Taboão 3	0,6	1,0	41,2	153,4	32,3	55,1
Taboão 4	0,2	0,9	11,9	145,0	14,4	53,6
Samambaia	0,5	1,0	62,9	205,7	23,3	51,1
Samambaia 1	0,6	1,3	59,0	183,8	38,4	73,4
Samambaia 2	0,4	0,8	68,0	246,4	21,6	42,5
Divinéia	0,4	1,1	48,8	126,0	22,4	50,3
Divinéia 1	0,5	1,2	16,9	56,5	26,2	55,5
Horizonte	0,4	0,6	8,5	32,7	19,4	37,4
Horizonte 1	0,6	1,1	45,3	154,0	34,5	60,0
Horizonte 2	0,7	1,1	17,9	47,5	41,8	58,2
Primavera	0,0	0,8	0,0	6,7	0,0	44,0
Primavera 1	0,2	0,8	8,5	79,8	9,7	42,7
Populares	0,1	0,2	11,8	42,5	6,7	23,1
Populares 1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Vila Garcia	0,5	1,9	36,6	104,6	57,9	85,6
Vila Garcia 1	0,3	0,8	65,7	292,5	25,2	43,7
Vila Garcia 2	0,6	1,1	73,7	229,2	37,9	62,6
Vila Garcia 3	0,5	1,4	42,5	214,1	36,9	59,7

Tabela 6.2 - Valores de X^2 simulados e tabelados $\alpha=(0,05)$

LINHA	X^2 crítico agregado	X^2 estimado agregado	X^2 crítico desagregado	X^2 estimado desagregado
Água Verde	67,5	43,4	353,9	270,6
Água Verde 1	40,1	34,0	90,5	62,2
Água Verde 2	55,7	41,5	234,0	230,6
Água Verde 3	55,7	29,2	179,6	142,1
Água Verde 4	54,5	49,1	272,5	253,3
Água Verde 5	41,3	38,9	79,1	43,1
Taboão	61,6	40,5	326,2	272,3
Taboão 1	47,4	56,2	179,6	122,5
Taboão 2	61,6	55,7	273,6	243,9
Taboão 3	44,7	41,2	154,0	153,4
Taboão 4	48,6	11,9	234,0	145,0
Samambaia	67,5	62,9	279,0	205,7
Samambaia 1	67,5	59,0	234,0	183,8
Samambaia 2	67,5	68,0	246,6	246,4
Divinéia	79,1	48,8	146,6	126,0
Divinéia 1	33,9	16,9	67,5	56,5
Horizonte	31,4	8,5	67,5	32,7
Horizonte 1	55,7	45,3	165,0	154,0
Horizonte 2	25,0	17,9	48,6	47,5
Primavera	7,8	0,0	19,7	6,7
Primavera 1	35,3	8,5	101,1	79,8
Populares	23,7	11,8	79,8	42,5
Populares 1	7,8	0,0	7,8	0,0
Vila Garcia	57,8	36,6	126,3	104,6
Vila Garcia 1	79,1	65,7	279,0	292,5
Vila Garcia 2	81,1	73,7	314,4	229,2
Vila Garcia 3	50,7	42,5	192,4	214,1

Os resultados da estatística x^2 para simulações de matrizes com pontos de parada desagregados mostram que os valores são menores que os valores críticos em 26 das 27 simulações, ou seja, para o nível de significância desejado, as frequências estimadas não diferem estatisticamente das frequências observadas na grande maioria das

simulações e, as diferenças entre as frequências observadas e estimadas, nestes casos, podem ser atribuídas ao acaso.

Quando os pontos de parada são agregados, os valores da estatística χ^2 para todas as linhas simuladas são menores que os valores críticos, conseqüentemente as frequências estimadas não diferem estatisticamente das frequências observadas e, as diferenças entre os valores observados e estimados podem ser atribuídas ao acaso para todas as linhas simuladas.

Os resultados listados na tabela 6.1 apresentam os valores dos testes ϕ e ID para linhas com pontos de parada agregados e pontos de parada desagregados. Os maiores valores de ϕ e ID correspondem às piores estimativas e os menores valores correspondem as melhores estimativas, respectivamente.

Os valores extremos (máximos e mínimos) para o teste ϕ para todas as simulações foram de 0,0 e 1,9 para pontos desagregados e 0,0 e 0,68 para pontos agregados, enquanto que o teste ID apresentou resultados de 0,0 e 86,8 para pontos desagregados e 0,0 e 57,9 para pontos agregados.

O valor 0,0 encontrado na linha Populares 1 para os testes χ^2 , ϕ e ID pode ser devido ao baixo número passageiros na amostra estimada (4 passageiros) e a ausência de pontos coincidentes de embarque e desembarque. A ausência de pontos de embarque e desembarque coincidentes faz com que os valores das somatórias para todas as linhas e colunas seja sempre igual a 0,0 ou 1,0.

A linha Vila Garcia 3 apresentou valor estimado de χ^2 maior que o valor crítico para pontos desagregados, porém esta linha não apresentou os maiores valores para as estatísticas ϕ e ID quando comparado aos valores extremos da tabela 6.1. Apesar de ter apresentado o pior resultado na estatística χ^2 o mesmo não apresentou os piores resultados nos outros

testes, os valores de ϕ e ID para Vila Garcia 3 (1,4 e 59,7), são menores que os valores extremos simulados para esta mesma linha ($\phi=1,9$ e ID=85,6).

Das 27 linhas simuladas, 18 representam o período de pico (manhã, ao meio-dia e tarde) e 9 linhas representam o período de entre pico. Os resultados apresentados não permitem identificar a influência da utilização de dados amostrados nos períodos de pico e de entre pico.

O valor 0,0 para a estatística ϕ indica que a matriz estimada é igual a matriz observada. Este resultado pode ser observado na linha Populares 1. Os dados de E/D utilizados nesta simulação são referentes ao entre pico da manhã, porém o maior valor encontrado para a estatística ϕ também ocorreu no entre pico (Vila Garcia = 1,9).

7 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A obtenção de matrizes O/D de modo expedito e de baixo custo é particularmente interessante para órgãos de planejamento e gestão de transportes, sejam estes municipais, estaduais ou federais, bem como para as empresas operadoras de transporte. Atualmente têm-se observado grande interesse por parte das empresas operadoras em obter este tipo de informação, pois muitas estão buscando planejar a oferta para aumentar a eficiência da operação, melhorando assim o atendimento ao cliente e maximizando seus lucros.

O modelo gravitacional utilizado para a obtenção de matrizes O/D a partir de dados E/D é de fácil aplicação, e as informações necessárias para a implementação do mesmo podem ser facilmente coletadas em campo de

forma rápida e pouco dispendiosa em termos de tempo e recursos financeiros. As informações referentes às contagens de embarque-desembarque não necessitam de pessoal especializado para serem realizadas, e podem ser obtidas por pesquisadores sem grande experiência ou pelos próprios operadores no momento da operação. As distâncias entre pontos de parada podem ser obtidas durante a própria operação dos serviços de transporte.

A utilização do programa desenvolvido em Turbo Pascal é simples de ser realizada e não necessita de pessoal especializado. Este procedimento pode ser adaptado para planilhas eletrônicas do tipo EXCEL através da utilização de macros, tornando-o assim mais “atraente” visualmente.

Quando comparado aos outros modelos de obtenção de matrizes listados no capítulo 4, o modelo proposto mostrou-se de fácil entendimento e de operacionalização. Os modelos do fluido e o algoritmo SYNODM mostraram-se de fácil utilização, podendo ser implementados facilmente em planilhas eletrônicas, porém estes modelos não fazem uso da informação *distância viajada*, utilizam somente a probabilidade de desembarque de cada passageiro após percorrido um determinado número de pontos.

A diferença entre o modelo proposto e os demais modelos de gravidade, é que a grande maioria dos modelos de gravidade utilizam somente um valor de parâmetro de impedimento da função distância viajada para toda matriz. Enquanto que o modelo proposto utiliza $n - 1$ valores de parâmetros em função da distância viajada, buscando assim reproduzir o custo médio de distribuição de viagens de uma origem em relação aos seus diferentes destinos.

Alguns autores (WILSON, 1970; SOUTHWORH, 1978) comentam que a desagregação dos valores de parâmetros da função custo permitem aos analistas incorporar fatores de penalidade e ajuste aos parâmetros de custo, produzindo assim uma redução do erro médio de viagens. Na década de 70 Southworth considerava que o tempo computacional era um empecilho a utilização deste modelo. Como o problema do tempo computacional encontra-se praticamente resolvido, recomenda-se que sejam realizadas pesquisas a fim de aprofundar o conhecimento nesta área.

Seria interessante comparar o desempenho entre o modelo proposto com outros modelos de gravidade os quais contenham outros tipos de funções de impedância, como por exemplo a função exponencial negativa, comparar os modelos que utilizam outros métodos de calibração e os modelos que utilizam apenas um único valor de parâmetro em relação a função de impedimento *distância viajada*.

Antes de prosseguir com os estudos, no entanto, é fundamental que seja feita uma revisão no processo de calibração do modelo proposto, de forma a assegurar que os coeficientes de cada linha da matriz sejam calibrados separadamente. Isto requer, sem dúvida, um esforço considerável de programação, que não foi possível contemplar neste trabalho, mas que deve ser conduzido antes de qualquer análise comparativa.

Uma sugestão para trabalhos futuros seria a comparação entre desempenho dos diversos modelos de obtenção de matrizes a partir da utilização de dados de pesquisa E/D. Estas comparações poderiam permitir a identificação dos modelos que melhor se adaptariam aos diferentes padrões de comportamento da demanda, características sócioeconômicas, características de ocupação e uso do solo, etc.

O planejamento do sistema de transporte por ônibus requer o conhecimento do padrão de deslocamento de seus usuários, porém o método proposto não possibilita identificação e estimativa do número de usuários que fazem uso da transferência de ônibus, bem como de suas origens e destinos “reais” (a pesquisa E/D não identifica os passageiros que realizam transferências de linhas de ônibus). O conhecimento da rede de transporte pelo analista poderia ser utilizado para identificar os pontos onde ocorrem as maiores porcentagens de transferência no sistema. Nestes pontos poderiam ser realizadas pesquisas de entrevista com os usuários identificando seus verdadeiros pontos de origem e destino. Este procedimento poderia permitir que parte do conhecimento dos totais de transferência fosse incorporado a matriz O/D. O modelo proposto não contempla esta informação adicional, é imperativa a realização de novos estudos para a verificação dessa hipótese.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTP - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS (1995a). *Pontos de parada de ônibus*. São Paulo. Relatório de pesquisa ANTP.
- ANTP - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS (1995b). *Pontos de parada de ônibus urbano - Contribuição para a sua implantação*. Caderno técnico n.º 2, São Paulo.
- ANTP - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS (1997). *Transporte Humano - Cidades com Qualidade de Vida*. São Paulo.
- BALASSIANO, B. (1997). Planejamento Estratégico de Transportes Considerando Sistemas de Média e Baixa Capacidade. *In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET*, 11, Rio de Janeiro, 1997. Anais. v.1, p.203-216.
- BELL, M. G. H. (1983). The estimation of an origin-destination matrix from traffic counts. *Transportation Science*, Vol. 17, n. 2, p. 198-217.
- BELL, M. G. H. (1991). The estimation of origin-destination matrices by constrained generalized least squares. *Transportation Research*, 25B (1), p.13-22.
- BEN-AKIVA, M.; MACKE, P. P; and HSU, P. S. (1985). Alternative methods to estimate route level trip tables and expand on-board surveys. *Transportation Research Record*, n.1037, p. 01-11.
- BEN-AKIVA, M.; MORIKAWA, T. (1988). Data combination and updating methods for travel survey. *Transportation Research Record*, n.1203, p. 40-47.
- BRUTON, M. J. (1979). *Introdução ao planejamento dos transportes*. 2. ed. Rio de Janeiro, Editora Interciência Ltda.
- CAMPOS, L. B. (1983). *Álgebra Matricial – Volume 1*, Curitiba, Universidade Federal do Paraná.
- CASCETTA, E. (1984). Estimation of trip matrices from traffic counts and survey data: A generalized least squares estimator. *Transportation Research*, 18(B), n 4/5, p. 289-299.
- CASCETTA, E.; INUDI, D.; MARQUIS, G. (1993). Dynamic estimators of origin-destination matrices using traffic counts. *Transportation Science*, v. 27, p.363 - 373.
- CONOVER, W. J. (1980). *Nonparametric statistics*. 2º Ed. New York. John Wiley & Sons.

- DI PIERRO, L. F. (1985). Determinação de matrizes de viagens de passageiros de ônibus a partir de uma pesquisa embarque/desembarque. *Revista dos Transportes Públicos*. 7(27), p.49-68. S. Paulo, SP.
- DOMENCICH T. A.; MCFADDEN, D. (1975). *Urban travel demand a behavioural analysis*. North-Holland - Amsterdam.
- EASA, S. M. (1993a). Urban trip distribution in practice. I: conventional analysis. *Journal of Transportation Engineering*, v. 119, n 6, p 793-815.
- EASA, S. M. (1993b). Urban trip distribution in practice. II: quick response and special topics. *Journal of Transportation Engineering*, v. 119, n. 6, p. 816-834.
- ERLANDER, S.; JÖRNSTEN, O. K.; LUNDGREN, J. T. (1985). On the estimation of trip matrices in the case of missing and uncertain data. *Transportation Research*, 19B (2), p.123-141.
- ERLANDER, S.; Stewart, N. F. (1990). The gravity model in transportation analysis - theory and extensions. Utrecht, Netherlands.
- FERRAZ, A. C. P. (1998). *Escritos sobre transporte, trânsito e urbanismo*. São Carlos, SP. Projeto REENGE USP, 218 p.
- FERRAZ, A. C. P. (1997). *Transporte Público Urbano. Notas de Aula do Curso de pós graduação em Transportes*. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- FERREIRA, E. A.; KAWAMOTO. E. (1998). Elaboração de matriz O/D das linhas de transporte público de passageiros usando dados de embarque-desembarque: análise comparativa de três métodos. In: *IX Congreso Latino Americano del Transporte Público y Urbano*. Guadalajara, México. Anais em CD ROM.
- FISK, C. S. (1989). Trip matrix estimation from link traffic counts: The congested network case. *Transportation Research*. 23B (5): 331-336.
- FLEMMING, D. M. (1993). *Um método de alocação de contadores volumétricos de tráfego numa rede rodoviária para estimar matrizes origem - destino*. Florianópolis, 201p. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal de Santa Catarina.
- FURTH, P. G. (1990). Model of turning movement propensity. *Transportation Research Record*, n. 1287, TRB, National Council, Washington, D. C. p.195-204.
- FURTH, P.G.; NAVICK, D. S. (1993a). Bus route O-D matrix generation: relationship between biproportional and recursive methods. *Transportation Research Record*, n.1338. p.14-21.

- FURTH, P.G.; NAVICK, D. S. (1993b). Distance-based model for estimating a bus route origin-destination matrix. *Transportation Research Record*, n.1433. p.16-23.
- GEVA, I.; HAUER, E.; LANDAU, U. (1983). Maximum-Likelihood and Bayesian methods for the estimation of origin-destination flows. *Transportation Research Record*, n.944, p.101-105.
- GONÇALVES, M. B.; ULYSSÉA NETO, I. (1993). Análise comparativa do desempenho de alguns modelos de distribuição de viagens usados para estimar fluxos intermunicipais de passageiros. In: *Anais do VII Encontro Nacional da ANPET*. São Paulo - SP, Vol. I, p.337-348.
- GUR, Y. J.; BEN-SHABAT, E. (1997). Estimating bus boarding matrix using boarding counts in individual vehicles. *Transportation Research Record*, n.1607, p.81-86.
- HALLEFJORD, A.; JÖRNSTEN, K. (1986). Gravity models with multiple objectives - theory and applications. *Transportation Research*, 20B (1), p. 19-39.
- HENDRICKSON, C.; and MCNEIL, S. (1984). Estimation of origin-destination matrices with constrained regression. *Transportation Research Record*, n.976, p.25-32.
- HUTCHINSON, B. G.; KUMAR, R. K. (1990). Modeling urban spatial evolution and transport demand. *Journal of Transportation Engineering*, v. 116, n. 4, p 550-571.
- JANSON, B. N. (1993). Most likely origin-destination link uses from equilibrium assignment. *Transportation Research*, 27B (5), p.333-350.
- KANAFANI, A. (1983). *Transportation demand analysis*. K. McGraw-Hill Book Company, 1983.
- KAWAMOTO, E. (1994). Verificação da matriz ponto-de-origem / ponto-de-destino de uma linha de transporte coletivo obtida a partir de dados de embarque-desembarque. In: *Anais do VIII Encontro Nacional da ANPET*. Recife - PE, Vol. II, p.41-50.
- KIKUCHI S.; PERINCHERRY V. (1992). Model to estimate passenger origin-destination pattern on a rail transit line. *Transportation Research Record*, 1349, p.54-61.
- KUWAHARA M.; SULLIVAN. E. D. (1987). Estimating origin-destination matrices from roadside survey data. *Transportation Research*, 21B (3), p.233-248.

- LAM, W. H. K.; LO. H. P. (1991). Estimation of an origin-destination matrix from traffic counts: a comparison of entropy maximizing and information minimizing models. *Transportation Planning and Technology*, n.16, p.85-104.
- LAMOND, B.; STEWART, N. F. (1981). Bregman's balancing method. *Transportation Research*, 15B(4), p.239-248.
- LIMA, L. C.; DA SILVA, M. C. T.; GRANJA, L. Z.; MORA-CAMINO, F. A. C. (1987). Otimização de um sistema de transporte público urbano: uma abordagem de equilíbrio. *Revista dos Transportes Públicos - ANTP*- ano 9, n 36.
- LOGIE, M.; HYND, A. (1990). MVESTM matrix estimation. *Traffic Engineering and Control*. n. 8/9 p. 454-459 e n.10. p. 534-549.
- MAHER, M. J. (1983). Inference on trip matrices from observations on link volumes: a Bayesian statistical approach. *Transportation Research*, 17B, p.435-447.
- MANHEIN, M. L. (1979). *Fundamentals of transportation system analysis: Volume 1 - Basic concepts*. The MIT Press, Cambridge, Mass.
- MERCEDES-BENZ DO BRASIL S.A. (1987). *Manual de Sistemas de Transporte Coletivo Urbano por Ônibus – Planejamento e Operação*. Departamento de Sistemas de Trânsito e Transporte, São Bernardo do Campo, SP, 82 p.
- MEURS, H. (1990). Trip generation models with permanent unobserved effects. *Transportation Research*, 24B (2), p.145-158.
- MORLOK, E. K. (1978). Introduction to transportation engineering and planning. Ed. McGraw-Hill, New York, 767 p.
- NAVICK, D. S.; FURTH, P. G. (1993). Distance based model for estimating a bus route Origin-Destination matrix. *Transportation Research Record*, n.1433, p.16-23.
- NETER, J., WASSERMAN, W., KUTNER, M. H. (1985). *Applied Linear Statistical Models*, Illinois, Ed. R. D. Irwin.
- NGUYEN, S. (1984). Estimating origin-destination matrices from observed flows. *Proceedings of the AIRO Conference*. Guida, Naples. p.363 - 368.
- NIHAN, N. L. (1982). Procedure for estimating freeway trip table. *Transportation Research Record*, 895, p. 1-5.
- NIHAN, N.; DAVIS, G. A. (1989). Application of prediction-error minimization and maximum likelihood to estimate intersection O-D matrices from traffic counts. *Transportation Science*, vol. 23, n.2.

- NOVAES, A. G. (1986). *Sistemas de transporte. volume 1: análise da demanda*. São Paulo, Edgard Blücher Ltda.
- ORTÚZAR, J. D.; WILLUMSEN, L. G. (1994). *Modelling transport*. 2.ed. England, John Wiley & Sons.
- PADILHA, E. (1998). Por uma Política de Transportes Urbanos. *Folha de São Paulo*, São Paulo, 31 mar. Caderno 1, p.3.
- PARVATANEMI, R.; STOPHER, P.; BROWN, C. (1982). Origin-destination travel survey for southeast Michigan. *Transportation Research Board*, n 886.
- PASCHETTO, A. et al. (1984). Critérios de escolha do modo de transporte segundo o planejamento urbano e as condições de operação. *Revista dos Transportes Públicos – ANTP*, n.º 23, março/84.
- RICHARDSON, A. J.; AMPT, E. S.; MEYBURG, A. H. (1995). *Survey methods for transport planning*. Melbourne, Eucalyptus Press.
- ROBILLARD, P. (1975). Estimating the O-D Matrix From Observed Link Volumes. *Transportation Research*, vol. 9, p. 123-128.
- ROSALEN, F. J. (1994). *A influência da distância de viagem na escolha do local de trabalho em cidades pequenas e médias*. São Carlos. 86p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SANCHES, S. P. (1988). *Contribuição à análise operacional de redes de transporte coletivo em cidades de porte médio*. 117p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SILVA, A. N. R., FERRAZ, A. C. P. (1991). *Transporte público urbano – operação e administração.*, São Carlos p.82. Notas de Aula, Escola de Engenharia de São Carlos.
- SIMON, J.; FURTH, P. G. (1985). Generating a bus route O-D matrix from on-off data. *ASCE Journal of Transportation Engineering*, vol. 111, n.6, p.583-593.
- SMITH, D. P., HUTCHINSON, B. G. (1981). Goodness of fit statistics for trip distribution models. *Transportation Research*, 15A, p.295-303.
- SOUTHWORTH, F. (1978). The calibration of a joint trip-distribution and modal-split model with origin-specific cost decay parameters. *Area*, nº 10, p.252-258.
- SPIESS, H. A. (1987). Matricial likelihood model for estimating origin-destination matrices. *Transportation Research*, 21B (5), p.395-412.
- STOKES, R. W.; MORRIS, D. E. (1980). Application of an algorithm for estimating freeway trip tables. *Transportation Research Record*, 976, p. 21-25.

- STOPHER, P. R.; SHILLITO, L.; GROBER, D. T., STOPHER, H. M. (1985). On-Board Bus Surveys: No Question Asked *Transportation Research Record*, 1085, TRB, National Council, Washington, D. C., p. 50-57.
- STOUFFER, S. A. (1940). Intervening opportunities: a theory relating mobility and distance. In: *American Sociological Review*. v.5, p. 845-867.
- TAMIN, O. Z.; WILLUMSEN, L. G. (1989) .Transport demand model estimation from traffic counts. *Transportation*, n.16(1), p. 3-26.
- ULYSSEIA NETO, I. (1991). Desenvolvimento de modelos de distribuição de viagens através do método da maximização da entropia. In: *Anais do V Encontro Nacional da ANPET*. Belo Horizonte - MG, Vol. I, p.233-248.
- VAN ZUYLEN, H. J.; WILLUMSEN, L. G; EASA, S. M. (1980). The most likely trip matrix estimated from traffic counts. *Transportation Research*, 14B(3), p.281-294,
- VUCHIC, V. R. (1981). *Urban Public Transportation - Systems and Technology*. New Jersey, Prentice Hall.
- WATLING, D. (1994). Maximum-likelihood estimation of origin-destination matrix from a partial registration plate survey. *Transportation Research*, 28(B), n. 4, p.289-314.
- WILSON, A. G. (1967). A statistical theory of spatial distribution models. *Transportation Research*, v.1, p. 235-269.
- WILSON, A. G. (1970). Entropy in urban and regional modelling. London. Pion.
- WILSON, A. G. (1976). Statistical notes on the evaluation of calibrated gravity models. *Transportation Research*, v. 10, p. 343-345.
- YANG, H.; IIDA Y.; SASAKI, T. (1994). The equilibrium-based origin-destination matrix estimation problem. *Transportation Research*, 28B (1), 23-323.
- YANG, H.; SASAKI, T.; IIDA, Y.; ASAKURA, Y. (1992). Estimation of origin-destination matrices from line traffic counts on congested networks. *Transportation Research*, 26(B), p.417-34.

ANEXO A

PROGRAMA GRAVIDADE

```
Uses crt,
    dos,
    printer;

type matri = array [1..60,1..60] of double;
    matrix2 = array [1..60,1..60] of double;
    vetor = array [1..60] of double;

var O,D,A,B,alfa,F,Y,DE,p:vetor;
    C,V:matri;
    soma,erro,ttotal,teta,tempo,alfa0,r,errop:real;
    n,i,j,L:integer;
    arquivo,entrada: text;
    resp,valor,count:integer;
    {L numero de iteracoes,DE derivada , Y resolucao de teta em uma origem,}

PROCEDURE ESPACO (n:integer;var C1:matri);var i,j:integer;

begin
    for i:=1 to n do
        begin
            for j:=1 to n do
                begin
                    C1[i,j]:=0;
                end;
            end;
        end;

    { writeln;
      writeln('Digite a matriz C');}
    for i:=1 to n do
        read (entrada,C1[i,i+1]);

    for i:=1 to n do
        begin
            for j:=i+2 to n do
                begin
                    C1[i,j]:=C1[i,j-1]+C1[j-1,j];
                end;
            end;
        end;
    end;
begin

{ENTRADA DE DADOS}

ClrScr;
{resp:=2;}
assign(entrada,'c:\samamba.txt');
reset(entrada);
{while resp<>1 do
    begin
        writeln ('Digite a dimensao da matriz - N');}
    readln(entrada,n);
    { writeln;
```



```

        writeln('confirma entrada de dados sim=1 e nao=2');
        readln(resp);
    end; }
    ClrScr;

    {resp:=2;
    while resp<>1 do
    begin
    writeln ('Digite a Matriz de Embarque');
    writeln;}
        for i:=1 to n do
        begin
            readln(entrada,O[i]);
        end;
    { writeln('confirma entrada de dados sim=1 e nao=2');
    readln(resp);
    end;
    ClrScr;}

    {resp:=2;
    while resp<>1 do
    begin
    writeln ('Digite a Matriz de Desembarque');
    writeln;}
        for i:=1 to n do
        begin
            readln(entrada,D[i]);
        end;
    { writeln('confirma entrada de dados sim=1 e nao=2');
    readln(resp);
    end;
    ClrScr; }

    {resp:=2;
    writeln;
    while resp<>1 do
    begin
        writeln ('Digite o valor de teta');}
        readln(entrada,teta);
    { writeln('confirma entrada de dados sim=1 e nao=2');
    readln(resp);
    end;
    ClrScr; }

    {resp:=2;
    writeln;
    while resp<>1 do
    begin
        writeln('digite o valor do tempo total real');}
        readln (entrada,ttotal);
    { writeln('confirma entrada de dados sim=1 e nao=2');
    readln(resp);
    end;
    ClrScr;}

    {writeln;

```

```

writeln(' B inicial=1');}
for i:=1 to n do
begin
  (B[i]):=1;
end;

{writeln;
writeln ('alfa inicial=0');}
for i:=1 to n do
begin
  (alfa[i]):=0;
end;

{entrada da matriz Cij}
espaco(n,C);
close(entrada);

erro:=10;
L:=0;
errop:=10;
{valor:=0;
count:=0;}
While (errop>0.10) and (L<10) do
Begin

{ count:=0;
while count<10 do
begin}

For i:=1 to n do
Begin
  soma:=0;
  For j:=1 to n do
  Begin
    if C[i,j]=0 then
      r:=0
    else
      r:=exp(alfa[i]*ln(C[i,j]));
      soma:=soma+B[j]*D[j]*r;
    end;
    if soma<>0 then
      A[i]:=1/soma
    else
      A[i]:=0.1;
  End;
  For j:=1 to n do
  Begin
    soma:=0;
    For i:=1 to n do
    Begin
      if C[i,j]=0 then
        r:=0
      else
        r:=exp(alfa[i]*ln(C[i,j]));

      soma:=soma+A[i]*O[i]*r;

```

```

        end;
        if soma<>0 then
            B[j]:=1/soma
        else
            B[j]:=0.1;
        End;
soma:=0;
For i:=1 to n do
    Begin
        For j:=1 to n do
            Begin
                if C[i,j]=0 then
                    r:=0
                else
                    r:=exp(alfa[i]*ln(C[i,j]));

                V[i,j]:=A[i]*B[j]*O[i]*D[j]*r;
                soma:=soma+V[i,j]*C[i,j];
            End;
        End;
    End;

tempo:=soma;
erro:=ttotal-tempo;
error:=(abs(erro)/ttotal)*100;

If (abs(error)>0.10) Then
    Begin
        For i:=1 to n-2 do
            begin
                soma:=0;
                For j:=i+2 to n do
                    Begin
                        if C[i,j]=0 then
                            r:=0
                        else
                            r:=exp(alfa[i]*ln(C[i,j]));
                        soma:=soma+B[j]*D[j]*r;
                    end;
                F[i]:=1-A[i]*soma;
                Y[i]:=teta-F[i];
                soma:=0;
                For j:=i+2 to n do
                    Begin
                        if C[i,j]=0 then
                            r:=0
                        else

                            r:=exp(alfa[i]*ln(C[i,j]))*ln(C[i,j]);
                            soma:=soma+B[j]*D[j]*r;
                        end;
                DE[i]:=-A[i]*soma;
                if DE[i]<>0 then
                    p[i]:=Y[i]/DE[i]
                else
                    begin
                        DE[i]:=1;

```

```

        p[i]:=Y[i]/DE[i]
    end;
    alfa0:=alfa[i];
    alfa[i]:=alfa0+p[i];
end;
j:=n;
i:=n-1;
if abs(C[i,j]) <> 0 then
Begin
    F[i]:=1-A[i]*B[j]*D[j]*exp(alfa[i]*ln(C[i,j]));
    { if F[i]<>1 then}
    Y[i]:=teta-F[i];
    {else
    begin
    Y[i]:=teta
    end;}
    DE[i]:=-A[i]*B[j]*D[j]*exp(alfa[i]*ln(C[i,j]))*ln(C[i,j]);
    if (abs(DE[i])<>0) then
        p[i]:=Y[i]/DE[i]
    else
        p[i]:=0;
    end
    else
    Begin
        F[i]:=0;
        Y[i]:=teta-F[i];
        DE[i]:=0;
        p[i]:=0;
    end;
    alfa0:=alfa[i];
    alfa[i]:=alfa0+p[i];

{End do if}
end;
i:=n;
j:=n;
alfa[i]:=0;
L:=L+1;

{count:=L-valor;
end;
valor:=valor+10;}
writeln('tempo=',tempo:7:2);
writeln('Iteracao=',L);
writeln('erro=',erro:7:3);
writeln('errop=',errop:7:3);
writeln;
writeln;
{writeln('Deseja continuar com as iteracoes ? sim=1');
readln(resp);
if resp<>1
    then L:=100;}
End;

    assign( arquivo, 'c:\sam.txt' );
    rewrite(arquivo);
    For i:=1 to n do

```

```

Begin
  for j:=1 to n do
    write(arquivo,V[i,j]:11:5);
    write(arquivo,alfa[i]:11:5);
    write(arquivo,L:4);
    writeln(arquivo);
  end;
  Writeln(arquivo);
  writeln(arquivo);
  writeln(arquivo,'tempo total');
  write(arquivo,tempo:8:1);
  writeln(arquivo);
  writeln(arquivo);
  {Write(arquivo,alfa[i]:3:2);}
  writeln(arquivo);
  write(L:4);
  writeln(arquivo);
  {For i:=1 to n do
    Begin
      for j:=1 to n do
        write(arquivo,c[i,j]:8:1);
        writeln(arquivo);
      end;
      Writeln(arquivo); }
    close(arquivo);
  end.

```

ANEXO B

ENTRADA DE DADOS

A entrada de dados via arquivos é efetuada por arquivos com extensão txt.

Exemplo de entrada por arquivo para uma matriz com 5 linhas e cinco colunas:

5	Referente ao número de linhas e colunas
25 15 12 5 0	Passageiro embarcados
0 2 10 20 25	Passageiros desembarcados
0.01	Teta (coeficiente de probabilidade)
55420	Tempo total da matriz
250 200 300 350 300	Distância entre pontos