

Altamir Antônio Rosa Araldi

**MODELO DE PLANEJAMENTO DE OFERTA DE  
SERVIÇOS DE UM SISTEMA DE TRANSPORTE  
PÚBLICO MULTIMODAL**

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA DESREGULAMENTAÇÃO DO SETOR DE  
TRANSPORTE PÚBLICO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Produção da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do  
Título de Doutor em Engenharia de Produção

Orientador: Prof. Sérgio Fernando Mayerle, Dr.

Florianópolis

2002

Altamir Antônio Rosa Araldi

# **MODELO DE PLANEJAMENTO DE OFERTA DE SERVIÇOS DE UM SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO MULTIMODAL**

## **ANÁLISE DOS EFEITOS DA DESREGULAMENTAÇÃO DO SETOR DE TRANSPORTE PÚBLICO**

Florianópolis, 23 de outubro de 2002

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de “**DOUTOR EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Edson Pacheco Paladini, Dr.  
Coordenador

### **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Sérgio Fernando Mayerle, Dr.  
Orientador

---

Prof. Amir Mattar Valente, Dr.  
Moderador

---

Prof. Antônio Sérgio Coelho, Dr

---

Prof. Jorge Alcides Cruz, Dr  
Examinador Externo

---

Prof. Armando Luiz Dettmer, Dr.

---

Prof. Rafael Carlos Velez Benito, Dr  
Examinador Externo

Agradeço a **Deus** por me permitir concluir este trabalho.

“O **Senhor Deus** disse: Estou segurando fortemente tua mão direita, e prometo:  
“Não tenha medo porque vou te ajudar.”(Isaías 41:13)

“**Ele** não permitirá que teus pés vacilem.”(Salmo 121.3)

Aos meus filhos, Rafael e Ana Paula, que souberam compreender os momentos de  
ausência.

E a minha mãe, pelo encorajamento nos momentos mais difíceis.

## **Agradecimentos**

Ao professor Sérgio Fernando Mayerle que foi mais que orientador, e que não só me conduziu com mão firme e certa mas que também foi extremamente dedicado e companheiro.

Aos professores membros da Banca Examinadora: Amir Mattar Valente, Armando Luiz Dettmer, Jorge Alcides Cruz, Antônio Sérgio Coelho, e Rafael Carlos Velez Benito, pelas sugestões e críticas que contribuíram, desde o exame de qualificação, para que a versão final deste trabalho fosse a melhor possível em forma e conteúdo.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de produção pelos ensinamentos recebidos.

Aos funcionários do Departamento de engenharia de Produção e da Secretaria da Pós-Graduação em de Engenharia de Produção pelo carinho que recebi e presteza no atendimento as minhas solicitações.

À Empresa de Transporte Ribeironense Ltda e ao Núcleo de Transporte do Município de Florianópolis (SC) pelos dados fornecidos os quais possibilitaram exemplificar uma aplicação do modelo proposto neste trabalho na linha do Corredor Sudoeste da cidade de Florianópolis (SC).

Aos colegas professores do Departamento de Expressão Gráfica da Universidade Federal de Santa Catarina pelas palavras de incentivo.

Ao Laboratório de Transporte da Universidade Federal de Santa Catarina pelo apoio recebido, permitindo o uso de seu espaço físico e equipamentos.

Araldi, Altamir Antônio Rosa. **Modelo de planejamento de oferta de serviços de um sistema de transporte público multimodal - Análise dos efeitos da desregulamentação do setor de transporte público.** 2002, 183f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis (SC).

## Resumo

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo para o planejamento da oferta de serviços de um sistema multimodal de transporte urbano de passageiros, supondo uma possível desregulamentação do sistema. A empresa executora do transporte público oferece dois modais alternativos, os quais competem com o transporte privado.

O modelo proposto determina o nível ótimo de oferta do serviço, do ponto de vista da empresa executora, considerando que um dos modais possui uma tarifa social fixa, enquanto que o segundo possui uma política tarifária flexível.

O modelo desenvolvido compreende dois sub-modelos: (a) divisão modal e alocação de fluxo, baseado em funções de preferência do usuário; (b) maximização da eficiência da empresa.

Para resolução do modelo é apresentado um algoritmo no qual os dois sub-modelos são resolvidos de forma iterativa, com os resultados de um sendo usados como parâmetros do outro, até que o ponto de equilíbrio entre oferta de serviços de transporte e a demanda nos diversos modais seja atingido.

O modelo é exemplificado com um estudo de caso envolvendo o Corredor Sudoeste da cidade de Florianópolis (SC), e os resultados obtidos são apresentados e discutidos detalhadamente.

**Palavras-Chave:** transporte público; equilíbrio em redes de transporte; modelos de escolha discreta.

Araldi, Altamir Antônio Rosa. **Modelo de planejamento de oferta de serviços de um sistema de transporte público multimodal - Análise dos efeitos da desregulamentação do setor de transporte público**. 2002, 183f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis (SC), Brasil.

## Abstract

The aim of this work is the development of a model, in order to plan the supply of services of a multi-modal system of passengers' urban transport, and supposing a possible deregulation of the system. The company that provides the public transportation offers two alternatives of the modal, which compete with a third: private transport.

The proposed model determines the optimal level of supply of the services, from the point of view of the company that provides the public transportation, considering that one of these modals possesses a fixed social fare, while the second one possesses a more flexible fare policy.

The model developed here is composed of two sub-models: (a) the model of modal division and flow distribution, based on functions of the user's preference; and (b) the model, which maximizes the efficiency of the company.

For solution of the model, an algorithm is presented in which the two sub-models are solved iteratively, with the results of one being used as parameters of the other, until the equilibrium point is reached between supply of transport services and demand in the several modals.

The model is exemplified with a case study involving the Southwest Corridor of the city of Florianópolis, SC, Brazil, and the obtained results are presented and discussed in full detail.

**Key Words:** public transportation; equilibrium in transport nets; models of discreet choice.

## Sumário

<u>Lista de símbolos</u> .....	x
--------------------------------	---

### CAPÍTULO 1

#### **Introdução.**

1.1 – Considerações iniciais .....	12
1.2 – Enfoques dados a um sistema de transporte .....	14
1.3 – Objetivos do trabalho .....	14
1.3.1 – Objetivo geral .....	14
1.3.2 – Objetivos específicos .....	15
1.4 – Importância do trabalho .....	16
1.5 – Limitações do trabalho .....	19
1.6 – Organização do trabalho .....	19

### CAPÍTULO 2

#### Caracterização do problema.

2.1 – Considerações iniciais .....	21
2.2 - Caracterização do problema .....	24

### CAPÍTULO 3

#### **Revisão Bibliográfica 1: Transporte público e privado**

3.1 – Introdução .....	28
3.2 – Resumo dos trabalhos .....	28

### CAPÍTULO 4

#### **Revisão Bibliográfica 2: O modelo de equilíbrio de Florian (1977).**

4.1 – Descrição do modelo .....	39
4.2 – Um protótipo do modelo .....	43
4.2.1 – Um algoritmo de solução baseado no esquema de relaxação .....	45

4.2.2 – Um teste feito com o algoritmo .....	48
4.2.3 – Discussão dos dados necessários, aspectos computacionais e sensibilidade do modelo .....	50
4.3 – Comparação do modelo com outros modelos multimodais .....	52
4.4 – Considerações finais sobre o modelo .....	53

## CAPÍTULO 5

### **O modelo de planejamento de oferta de serviços de um sistema de transporte público multimodal.**

5.1 – Considerações iniciais .....	55
5.2 – Fundamentos para o desenvolvimento do modelo .....	55
5.3 – Formulação matemática do modelo .....	65
5.3.1 – Sub-modelo de distribuição de viagens .....	66
5.3.2 – Sub-modelo de maximização de lucro da operadora .....	68
5.4 – Algoritmo proposto .....	71
5.5 – Considerações sobre o modelo .....	73
5.6 – Etapas para aplicação do modelo .....	77
5.4 – Considerações finais .....	78

## CAPÍTULO 6

### **Análise dos resultados da aplicação do modelo de planejamento de oferta de serviços de um sistema de transporte público multimodal.**

6.1 – Análise dos resultados da aplicação do modelo .....	79
6.2 – Calibração e validação do modelo .....	94

## CAPÍTULO 7

### **Conclusões e recomendações**

7.1 – Conclusões .....	95
7.2 – Recomendações para trabalhos futuros .....	96

<u>BIBLIOGRAFIA</u> .....	98
---------------------------	----



## Apêndice 1

<b>Problemas de equilíbrio em redes de transporte</b> .....	112
(Exemplos)	

## Apêndice 2

<b>Aplicação do modelo de planejamento de oferta de serviços de um sistema de transporte público multimodal no Corredor Sudoeste da cidade de Florianópolis (SC).</b> .....	124
---	-----

## Anexo 1

<b>Técnicas de Preferência Declarada.</b> .....	158
---	-----

## Lista de Símbolos

### Símbolos

- $m = 1, \dots, 3$  índice do conjunto de modais;
- $p = 1, \dots, P$  índice do conjunto de períodos típicos de demanda nos quais é dividido um dia de trabalho;
- $a = (r, s)$  índice do conjunto de arcos que compõe a rede de transporte; cada arco da rede conecta um par de nós, aqui designados genericamente por  $(r, s)$ ;
- $i = 1, \dots, 5$  índice do conjunto de atributos considerados pelo usuário na determinação da escolha do modal.
- $q_p^{rs}$  demanda total de usuários no  $p$ -ésimo período entre o par O-D definido por  $r, s$ ;
- $\delta_{a,m}^{rs}$  relação de incidência entre o arco  $a$  e o modal  $m$  que conecta o par O-D definido por  $r, s$ ;
- $\Delta T_p$  duração do período  $p$ ;
- $t_a^{min}$  tempo de fluxo livre em um arco da rede viária, percorrido pelo modal automóvel;
- $C_a$  capacidade nominal da via representada pelo arco  $a$ ;
- $\lambda_a, \pi_a$  parâmetros de ajuste do modelo de cálculo do tempo de viagem no arco  $a$ ; (ver Apêndice 2).
- $\alpha_m$  tempo médio de embarque e desembarque de um usuário do modal  $m$ ;
- $\beta_i$   $i$ -ésimo coeficiente da função utilidade ajustada para os diversos atributos considerados pelo usuário na determinação da escolha do modal (veja Anexo 1 para maiores detalhes sobre a estimação destes parâmetros através de Técnicas de Preferência Declarada);
- $U_{m,p}^{rs}$  utilidade da alternativa de viagem definida pelo modal  $m$ , no período  $p$ , entre os pares O-D definidos por  $r, s$ ;
- $a_{m,p,i}^{rs}$   $i$ -ésimo atributo da alternativa de viagem definida pelo modal  $m$ , no período  $p$ , entre os pares O-D definidos por  $r, s$ ;

$f_{m,p}^{rs}$	fluxo de usuários no modal $m$ , no período $p$ , entre o par O-D definido por $r,s$ ;
$x_{a,p}$	fluxo de usuários no arco $a$ , no período $p$ ;
$t_{a,p}$	tempo de viagem gasto para transpor o arco $a$ , no período $p$ ;
$t_{m,p}^{rs}$	tempo de viagem gasto pelo modal $m$ , no período $p$ , para realizar o caminho entre o par O-D definido por $r,s$ .
$q_p^{rs}$	demanda total de usuários no $p$ -ésimo período entre o par O-D definido por $r,s$ ;
$\Delta T_p$	duração do período $p$ ;
$t_{m,p}^{rs}$	tempo de viagem gasto pelo modal $m$ , no período $p$ , para realizar o caminho entre o par O-D definido por $r,s$ ; este parâmetro é considerado exógeno a este modelo, sendo calculado através do modelo de distribuição de viagens;
$CV_m$	custo variável de operação em R\$/km dos modais $m = 2$ e $m = 3$ ;
$CF_m$	custo fixo (depreciação + remuneração do capital) em R\$/dia dos modais $m = 2$ e $m = 3$ ;
$d^{rs}$	distância em quilômetros, para realizar o caminho entre o par O-D definido por $r,s$ ;
$Cap_m$	capacidade do veículo que opera no modal $m$ .
$TR_{m,p}^{rs}$	tarifa do modal $m = 2$ e $m = 3$ , no período $p$ ;
$N_{m,p}^{rs}$	número de viagens realizadas pelo modal $m$ , no período $p$ ;
$NV_m^{rs}$	número de veículos alocados na operação do par O-D definido por $r,s$ , para o modal $m = 2$ e $m = 3$ ;
$L$	lucro diário total da empresa operando com os modais $m = 2$ e $m = 3$ .

# CAPÍTULO 1

## Introdução

### 1.1 Considerações iniciais

Planejar adequadamente a oferta de serviços de transporte público pode significar melhoria da qualidade de vida das pessoas, especialmente daquelas com menor poder aquisitivo e que se utilizam predominantemente das modalidades públicas de transporte. Indiretamente, pessoas com maior poder aquisitivo, que utilizam o automóvel, também usufruem deste benefício de planejamento à medida que o uso mais intenso do transporte público reduz o número de automóveis circulando nas vias da cidade, melhorando as condições de trafegabilidade.

A seguir são exemplificados alguns problemas vividos com respeito aos meios de transportes públicos existentes e ao excessivo uso do automóvel, devido, em parte, à deficiência do transporte público.<sup>1</sup>

De modo geral, o meio de transporte metrô já foi sinônimo de rapidez e eficiência: são poucos quilômetros de extensão e vagões superlotados nos horários de pico. O metrô de São Paulo, por exemplo, é um dos melhores do mundo, mas tem pouca extensão para uma cidade deste porte - somente 50 quilômetros de linhas. O projeto original previa 140 quilômetros, e se tivesse sido implantado transportaria sete milhões de passageiros por dia, mas hoje leva apenas 2,5 milhões. Em geral, em outras cidades como Belo Horizonte, Recife, Rio de Janeiro e Porto Alegre, o metrô tem somente uma linha, com poucos quilômetros de extensão, atendendo apenas uma parte da cidade, e desta forma não mais satisfazendo à demanda. No entanto, nas grandes cidades brasileiras, o metrô é a única solução possível para determinadas demandas.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Para uma leitura complementar, é sugerido ao leitor o Capítulo 3 (Revisão Bibliográfica 1) onde são apresentados, de forma resumida, os trabalhos de **Dargay and Gately (1999)**, **Dargay (2001)**, **Steg et alii (2001)**, **Vasconcellos (1997)**, **Pucher (1999)**, **Culliname (2002)**, **Hingham et alii (2001)**, **Stradling et alii (2000)**, **Hensher (1998)**, **Hassol (1996)**, **Pucher (2000)** e **Marckett (2001)** que tratam do uso do automóvel em diversos países. São recomendados ao leitor, também, os seguintes trabalhos: **Bianco (1996)**, **Smith and Chin (1997)**, **Tertoolen et alii (1998)**, e **Stead (2001)**.

<sup>2</sup> Estes dados estão presentes em **A. N. T. P. – VI CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS (1984)**.

No consenso, uma grande cidade precisa de várias alternativas de transporte. O ônibus urbano é o transporte público mais comum em todas as cidades brasileiras. Mas para itinerários longos, o tempo de viagem é grande, fato que não acontece com o metrô no qual a viagem é mais rápida.

Mais importante ainda é que haja integração. Na prática, em geral, se tem cada modalidade de transporte operando isoladamente, ou seja, sem integração entre os sistemas de ônibus, e entre estes e o metrô.

Uma melhoria do transporte público pode reduzir o número excessivo de automóveis circulando nas ruas os quais provocam, problemas de poluição, problemas ligados a estacionamentos e perda de eficiência no escoamento das vias urbanas, trazendo como consequência um acréscimo significativo nos custos de transporte. Em Porto Alegre (RS), por exemplo, o microônibus ou ônibus executivo é uma experiência bem sucedida. Este meio de transporte tenta prover um nível de conforto próximo do automóvel. Porém, é sabido que este conforto tem um custo para o usuário. Tem-se uma mudança geral de hábitos na cidade com o uso deste meio de transporte. Em pesquisa feita por empresa do setor de transporte da cidade de Porto Alegre (RS) mostrou-se que pelo menos 50% dos passageiros tem automóvel, mas preferem o ônibus executivo como meio de transporte. Os motivos para esta preferência são: o bom nível de conforto e a despreocupação com o itinerário e com o trânsito. Tudo isso faz com que muitos usuários deixem seu automóvel na garagem. O ônibus executivo é um meio de transporte simples, mas é uma revolução num país que sempre privilegiou o automóvel.

Para melhorar a circulação de veículos nas vias da cidade e a qualidade de vida dos habitantes que nela moram, deve-se otimizar o sistema de transporte público, reduzindo a utilização do automóvel e aumentando a integração dos diversos modais.

O transporte público é um elemento essencial para a cidade. É bom lembrar que, segundo o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) 78% dos habitantes Brasileiros vivem em Áreas urbanas. E estes habitantes necessitam de um meio de transporte público para se locomoverem ao trabalho, escola, etc.

## 1.2 Enfoques dados a um sistema de transporte

De acordo com a ótica do segmento interessado no planejamento do sistema de transporte, pode-se destacar os enfoques descritos a seguir.

- a) Enfoque sob o ponto de vista do empresário do setor de transporte público: o empresário tenta tirar proveito do sistema de modo a maximizar sua utilidade, isto é, ter o máximo lucro possível. Em um sistema desregulamentado, as variáveis de decisão são: o valor da tarifa e a frequência das viagens em cada linha e horário. Os valores destas variáveis compõem a oferta de serviços que precisa ser determinada com o objetivo de maximizar o lucro da empresa.
- b) Enfoque sob o ponto de vista do poder público (representando o usuário): o poder público pode focar o sistema de transporte sob diversos aspectos, tendo como objetivo principal fazer com que o mesmo seja econômico para o usuário. Também, a questão do tráfego urbano deve ser considerada, de modo a evitar congestionamentos. Estudos neste sentido podem ser realizados conhecendo-se a capacidade e o fluxo de passageiros (de ônibus e de automóvel) em cada trecho ou arco da rede considerada.

Além da atuação do empresariado do setor de transporte público, e do Poder Público no planejamento do transporte, outros segmentos interferem ou são envolvidos neste processo. Os proprietários de estacionamento, por exemplo, poderão rever seus preços interferindo nas escolhas dos usuários em relação aos diversos modais alternativos.

## 1.3 Objetivos do trabalho

### 1.3.1 Objetivo geral:

Neste trabalho é proposto um modelo de planejamento de oferta de serviços de um sistema multimodal de transporte público urbano de passageiros.

### 1.3.2 Objetivos específicos:

Considera-se que na área de estudo atua, sob regime de concessão, uma única empresa executora do transporte público, oferecendo dois modais alternativos, os quais competem entre si e com o transporte privado (automóvel). Tal situação é encontrada em algumas cidades brasileiras, nas quais além do transporte público convencional (ônibus convencional), existe uma segunda modalidade operando que é o transporte público executivo (micro-ônibus).

Com a proposição do modelo, estudam-se os cenários alternativos obtidos a partir de uma suposta desregulamentação<sup>3</sup> do sistema.

O modelo proposto determina o nível ótimo de oferta de serviços, do ponto de vista da empresa executora, considerando que um dos modais possui uma tarifa social fixa, enquanto que o segundo possui uma política tarifária mais flexível. Além do objetivo geral apresentado, outros objetivos específicos podem ser listados:

- a) estudar os efeitos de mudanças nos valores de tarifa e freqüência das viagens, supondo a desregulamentação do sistema de transporte público;
- b) identificar a correlação existente entre lucro da empresa operadora e as tarifas praticadas pela mesma;
- c) mostrar que existe uma relação entre a tarifa dos modais “sociais” e a tarifa ótima aplicada aos modais alternativos, e que esta relação depende dos serviços ofertados em termos de tarifa e freqüência das viagens, e da avaliação destes serviços feita pelo usuário;
- d) estudar o equilíbrio entre oferta no horário de pico e fora dele;

---

<sup>3</sup> **van de Velde (1999)** estuda as formas organizacionais e de “comercialidade” em transporte público. Ele apresenta duas estruturas de classificação para as formas organizacionais para esclarecer a discussão sobre reforma da regulamentação em transporte público a fim de comparar as formas de organização que têm aparecido durante os últimos 15 anos. O conceito de níveis de planejamento e controle é aplicado à oferta de serviços de transporte e várias formas de organização são classificadas as quais permitem um posicionamento sobre as várias formas organizacionais do mundo real em relação às formas organizacionais “puras”. São apresentadas ilustrações de um número de formas organizacionais tipicamente idealizadas. Neste estudo entram as questões: da iniciativa de Mercado e da iniciativa da Autoridade; combinações destes dois tipos de iniciativa; e confusões que se faz a respeito destes tipos de iniciativa. O autor apresenta e discute exemplos de: planejamento central e oferta da execução; planejamento central ao máximo e oferta da execução; oferta da execução com incentivo de re-projeto em sub-áreas; oferta do projeto e da execução (concessão); livre competição com um “toque leve” de regulamentação.

- e) mostrar que estratégias de tarifa variável ao longo do dia podem contribuir para o aumento da eficiência da empresa.
- f) avaliar a necessidade de tratar o planejamento de transporte público urbano no contexto sistêmico, isto é, levando em consideração a rede como um todo, e aí se inclui, por exemplo, o valor que o usuário atribui à tarifa cobrada pelos estacionamentos e ao percurso a pé deste até o destino final de viagem; e
- g) mostrar que com certas melhorias na oferta de serviços para o modal público executivo (micro-ônibus), este pode ser uma alternativa de transporte público competitivo com o transporte privado (automóvel), gerando lucros para a empresa e tarifas mais acessíveis para o usuário.

#### **1.4. Importância do trabalho**

A importância pode ser vista segundo vários pontos de vista, como se descreve a seguir.

##### **a) Importância Social**

Uma parcela significativa da população faz uso dos sistemas de transporte coletivo, por motivo de trabalho, negócio, estudo e lazer, e dependem quase que exclusivamente deste tipo de transporte para se locomover.

Também é importante lembrar que a utilização de sistemas de transporte se dá principalmente por camadas da população com menor poder aquisitivo. Segundo levantamento feito pelo **Conselho para Assuntos de Energia – COASE/Confederação Nacional da Indústria – CNI (1994)**, desde 1959 até abril de 1993, houve um aumento significativo do percentual dos gastos mensais com transporte por ônibus em relação ao salário mínimo na cidade de São Paulo. Os gastos com transporte evoluíram, no período, de cerca de 6% para até quase 28% do salário mínimo, o que mostra um empobrecimento dos usuários de transporte coletivo, naquela cidade. Estima-se que o quadro deva ser semelhante em outras regiões, por ser a perda do poder aquisitivo um fenômeno nacional, assim como a elevação das tarifas de transporte urbano.



Portanto, é imprescindível a utilização de modelos de planejamento de transporte que assegurem uma oferta de serviços que atenda a demanda de maneira mais satisfatória e eficiente, a um custo mais acessível para o usuário. Além disso, a análise de cenários sob a hipótese de desregulamentação do mercado de transporte é essencial para a identificação das conseqüências deste processo, que podem ou não ser favoráveis à sociedade.

### **b) Importância Econômica para as Empresas Executoras de Transporte Público**

Existe uma parcela da população em geral não considerada no planejamento de transporte público, por não dependerem exclusivamente desta modalidade. Estes indivíduos realizam suas viagens utilizando-se de seus automóveis por falta de outra alternativa de transporte que torne máxima sua utilidade em termos de fatores que influenciam na escolha do modal.

A prática de tarifas e freqüências de viagens mais adequadas pode fazer com que esta parcela da população se interesse pelo transporte público, vindo nesta escolha uma melhoria de sua função utilidade. Este incremento da demanda pelos modais públicos pode fazer com que se tenha um aumento de receita sem que necessariamente os custos para a empresa aumentem na mesma proporção, já que baixas demandas fazem com que os veículos trafeguem sub utilizados.

Além de interessar à sociedade, a análise de cenários alternativos também interessa à empresa operadora do transporte público na medida em que permite observar ineficiências operacionais e identificar mercados em potencial.

### **c) Importância para a Área de Conhecimento**

Será visto que o modelo de planejamento de oferta de serviços de um sistema de transporte público multimodal proposto neste trabalho, dentro dos objetivos fixados, se apresenta como um problema de equilíbrio. Para a empresa executora de transporte público, espera-se o equilíbrio na oferta de serviços tais como tarifa e freqüência das viagens de ônibus para se atingir o lucro máximo da empresa. Considerando os usuários, é esperado o equilíbrio na distribuição da demanda entre o modal privado (automóvel), o modal público convencional (ônibus convencional) e

o modal público executivo (micro-ônibus). Tais modais competem entre si no mercado de transporte de passageiros com base na noção de utilidade que os usuários e operadores têm com respeito aos atributos das alternativas de viagem ou modal.

Os problemas de equilíbrio têm apresentado interesse para a sociedade científica, como pode ser visto em algumas referências [veja, por exemplo, **Nagurney (1991 e 1999)**]. Em geral os trabalhos apresentados sobre este tema se aplicam a problemas diversos tais como:

- a) determinação dos preços de equilíbrio em mercados competitivos sob condição de concorrência perfeita, oligopólio e monopólio;
- b) determinação de estratégias de negociação aplicadas à política e ao meio ambiente;
- c) determinação do ponto de equilíbrio em redes de transporte urbano;
- d) determinação da solução do problema de equilíbrio geral de preços; e
- e) determinação da solução de problemas de equilíbrio em processos migratórios.

Os modelos matemáticos existentes na literatura, que tratam de transporte público, envolvem variáveis quantitativas e qualitativas, relacionando-as em termos de causas e efeitos. Porém, não foi encontrado nenhum trabalho que utilize modelos de equilíbrio em redes de transportes para estudar o problema aqui proposto.

Vale destacar a ênfase multicriterial que diferencia este trabalho dos demais em relação aos modelos que usam o custo como critério único para avaliação de desempenho.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Para uma leitura complementar, é sugerido ao leitor o Capítulo 3 (Revisão Bibliográfica 1) onde são apresentados, de forma resumida, os trabalhos de **Costa (1996)**, **Jimenez, Karlafts et alii (1998)** e **Lyons (1997)** que tratam da questão do desempenho em transporte público.

## 1.5 Limitações do trabalho

São apresentadas a seguir limitações deste trabalho sob vários aspectos:

- a) o foco está na empresa executora do transporte público;
- b) a dificuldade de obtenção de todos os dados para calibração e/ou aplicação do modelo proposto;
- c) não foi considerada uma maior desagregação na demanda (por motivo de viagem, condição social, renda, etc) por parte do modelo proposto;
- d) a questão do transporte solidário, uma estratégia (comportamento) do usuário de automóvel, que pode diminuir consideravelmente o custo da viagem, não é incorporada no modelo proposto;
- e) impossibilidade de validar o modelo na prática, por motivos que são justificados no Apêndice 2 onde a aplicação do modelo é apresentada; e
- f) o trabalho não pretende discorrer detalhadamente sobre a influência de outros fatores tais como localização dos estacionamentos, segurança e comodidade, mesmo sabendo que tais fatores podem influenciar nas escolhas do usuário. Sendo assim, considerar-se-á apenas os tempos associados aos deslocamentos realizados, os custos correspondentes, e os níveis de conforto oferecidos pelas diversas alternativas.

## 1.6 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

No Capítulo 2 é apresentada a caracterização do problema. Nos Capítulo 3 e Capítulo 4 é feita uma análise do conhecimento existente pertinente ao tema. Isto é, nestes capítulos é apresentada uma revisão bibliográfica: no Capítulo 3 (Revisão Bibliográfica 1) são apresentados, de forma resumida, trabalhos que tratam da questão do transporte público e privado; no Capítulo 4 (Revisão Bibliográfica 2), no que diz respeito aos modelos de equilíbrio em redes de transporte, é dada atenção

especial ao modelo de equilíbrio proposto por **Florian (1977)**. Para o problema, que será apresentado e caracterizado no Capítulo 2, a bibliografia é vasta tanto no que diz respeito a modelos de equilíbrio em redes, bem como às técnicas de preferência declarada [ver Anexo 1]. Têm-se, também, muitos trabalhos no que diz respeito a assuntos ligados a transporte público. No Capítulo 5 é apresentado o modelo de planejamento de oferta de serviços de um sistema de transporte público multimodal. Uma aplicação do modelo, onde serão feitos estudos envolvendo alguns cenários, é apresentada no Apêndice 2, e a análise dos resultados obtidos é apresentada no Capítulo 6. No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### Caracterização do problema

#### 2.1 Considerações iniciais

Duas questões são colocadas em **WHITLOCK (1982)** Apud **AÖR (1984)**:

a) *“Quais são as oportunidades de escolha de modal para as pessoas? Quem usa automóvel e quem depende de um meio de transporte diferente?”*;

b) *“Existem disponíveis outros meios de transporte? Como a disponibilidade de meios alternativos afetará as necessidades de estacionamento?”*.<sup>5</sup>

Quais são as oportunidades de escolha modal para as pessoas? Em princípio, todas as alternativas para deslocamento de indivíduos na região urbana: automóvel, ônibus convencional, ônibus executivo, barca, metrô e trem urbano. Na cidade de Florianópolis (SC), por exemplo, têm-se tipicamente três modais: automóvel, ônibus convencional e ônibus executivo. Mas não se deve particularizar, pois, em Londres, por exemplo, o metrô é possivelmente a principal modalidade. Na cidade do Rio de Janeiro (RJ), a barca é fundamental para transporte de pessoas que possuem interesses em Niterói.

Quem usa automóvel e quem depende de um meio de transporte diferente? Em princípio, todos os indivíduos são potenciais usuários de todos os modais. Mesmo as pessoas de baixa renda podem, eventualmente, optar por um automóvel de menor valor. Ou ainda, pessoas de maior renda podem optar pelo uso freqüente de táxi ou transporte público ônibus executivo. Tudo depende da “função utilidade” [ver Anexo 1] com que cada usuário avalia as alternativas disponíveis.

Existem disponíveis outros meios de transporte? Mesmo no caso aparente de existir somente uma alternativa de viagem ou modal, ainda assim, as pessoas poderão optar por não viajar, e com isto configura-se uma segunda alternativa. Assim o problema de decisão enfrentado pelo usuário persiste. Entretanto, quase

---

<sup>5</sup> Como subproduto deste trabalho, surge uma resposta à questão (a) e a primeira parte da questão (b), embora particularizadas para o modal ônibus. De certa forma a segunda parte da questão (b) acabará tendo uma resposta, mas isto não interessa aos objetivos deste trabalho.

sempre são disponíveis, em todas as regiões urbanas, mesmo as menores, pelo menos duas alternativas de viagem, que são o ônibus convencional e o automóvel. Não se deve esquecer que ir a pé é uma outra alternativa. Sabe-se, também, que o ônibus, embora em muitos casos funcione precariamente, é um meio de transporte de massa que existe em quase todas as cidades. Por outro lado, em muitos casos, pode-se dizer que, embora existindo um meio de transporte diferente, este pode não ser efetivamente uma alternativa de transporte satisfatória para o usuário.

Quando se trata da precariedade operacional do modal ônibus urbano, está se referindo a um caso particular. Existem exemplos, onde este modal já funcionou de forma exemplar. Curitiba (PR) é um bom exemplo de pioneirismo onde a tecnologia (plataformas de embarque, ônibus articulados, tarifa integrada, etc.) lá desenvolvida foi adotada, inclusive por cidades como Nova Iorque, onde o uso do metrô já é secular. No entanto, atualmente, este sistema está saturado, tendo perdido sua eficiência. Reafirmando, a cidade de Curitiba (PR) foi um exemplo de caso bem sucedido no qual o ônibus funcionou eficientemente. Logo, a afirmação “sabe-se que o meio de transporte ônibus, embora existindo, funciona de modo precário” não pode ser generalizada.

Segundo **Lacerda (1989)**, que trata especificamente da questão de estacionamentos, dos trabalhos já publicados que consideram o comportamento e a percepção do usuário como essencial para o planejamento de um sistema de transportes, todos são unânimes em destacar dois fatores como os mais relevantes pelo usuário na hora de decidir por um ou outro local de estacionamento. São estes fatores: o preço do estacionamento e a distância percorrida a pé desde o estacionamento até o destino final da viagem. É importante ressaltar que isto é verdade quando o usuário já decidiu viajar utilizando seu automóvel.

Outros fatores são levados em conta quando a questão é a escolha de um modal. Um usuário, ao decidir sobre uma viagem, faz ponderações onde são considerados fatores que contribuem para a formação de uma função utilidade (ou desutilidade). Estes fatores podem ser:

- a) preço da passagem de ônibus;

- b) tempo de espera pelo ônibus;
- c) conforto do modal;
- d) tempo de percurso a pé desde o estacionamento e desde o terminal de ônibus (ou desembarque) até o destino final da viagem;
- e) tempo de percurso a pé da residência até o ponto de ônibus mais próximo;
- f) preço do estacionamento;
- g) tempo gasto à procura de uma vaga para estacionar;
- h) custo do combustível para a viagem de automóvel; e
- i) tipo de estacionamento: fechado; aberto; com proteção; sem proteção.

Que melhorias deveriam acontecer nos meios de transporte público para torná-lo tão atrativo a ponto do usuário de automóvel poder optar por deixá-lo na garagem e usar o ônibus? Melhorias podem ser obtidas modificando os valores dos atributos da alternativa de viagem ou modal, anteriormente mencionados.

A flexibilidade que o automóvel proporciona é inegavelmente uma característica que o transporte público está longe de oferecer. Com este modal, pode-se deslocar de qualquer ponto de origem a todos os pontos da cidade, tendo a possibilidade de se escolher o horário de saída mais conveniente, evitando congestionamentos comuns nos horários de pico. Acrescente-se a isto, o fato de que em um automóvel pode-se transportar em média até quatro passageiros com um razoável nível de conforto, o que torna o custo da viagem ainda menor quando comparado ao preço da passagem de ônibus. Por outro lado, com o automóvel o tempo de viagem tende a ser menor, especialmente nos casos em que automóvel e ônibus disputam o mesmo espaço das vias urbanas.

As características acima citadas fazem do automóvel um meio de transporte preferível em relação ao ônibus, ideal do ponto de vista de quase todos indivíduos. Isto se deve ao fato de que pouco ou nada é feito para tornar o transporte público competitivo diante do uso do automóvel.

## 2.2 Caracterização do problema

Considerem-se três alternativas de transporte distintas, representadas pelos seguintes modais:

$A_1$  = modal privado (usando o automóvel);

$A_2$  = modal público convencional (usando o ônibus convencional);

$A_3$  = modal público executivo (usando o micro-ônibus, com conforto superior).

Tais modais competem entre si no mercado de transporte de passageiros, no qual a demanda é distribuída de maneira diferente entre estas alternativas segundo as preferências dos usuários em termos dos atributos destas alternativas, de modo que, se ocorrer uma melhoria no sistema de transporte público, por exemplo, parte dos usuários da alternativa  $A_1$  irá optar pelas alternativas  $A_2$  ou  $A_3$ , na tentativa de maximizar a utilidade da viagem a ser realizada.

Assim, considere um determinado usuário, que esteja usando seu automóvel. Ao decidir por esta alternativa ele leva em consideração as possíveis rotas que poderiam ser utilizadas na realização da viagem. Suponha, ainda, que o modal público faça a mesma rota que a escolhida por este usuário. Caso venha ocorrer um congestionamento, haverá a tendência de aumentar o tempo de viagem. Diante disso, o usuário compara seus custos de viagem, em termos de combustível, estacionamento, etc, com a tarifa do modal público. Com o objetivo de maximizar sua utilidade, percebe que é preciso trocar de modalidade, e no dia seguinte, deixa seu automóvel na garagem e faz a viagem no modal público. Entretanto, outros usuários podem optar pela mesma estratégia, isto é, viajar no modal público na rota em questão. Posteriormente, como resultado deste processo, tem-se um aumento significativo no número de usuários que viajam no modal público, o que provoca aumentos nos tempos de embarque e desembarque e, por conseguinte aumento do tempo total de viagem neste modal. É bem provável, que uma parte dos usuários volte a utilizar o modal privado. Este processo de troca de alternativa tende a continuar até que os usuários percebam que é impossível aumentar sua utilidade.

Para a solução de parte do problema que se pretende caracterizar – escolha da rota, pode-se dizer que “o ponto de equilíbrio é alcançado quando nenhum



usuário consegue melhorar seu tempo de viagem através de uma mudança unilateral de rota” [Wardrop (1952)].

No presente caso, a situação é mais abrangente, isto é, não é somente a rota, com seu respectivo tempo de viagem, que tem importância na decisão do usuário, mas também a escolha do próprio modal. Em outras palavras, Assume-se que as escolhas do modal e da rota sejam feitas simultaneamente, influenciadas pelos seguintes fatores:

- a) tempo de viagem no modal;
- b) custo da viagem:
  - para o modal público: tarifa;
  - para o modal privado: combustível, estacionamento;
- c) deslocamento a pé:
  - para o modal público: da residência até o ponto mais próximo de embarque, do ponto de desembarque (terminal) até o destino final de viagem;
  - para o modal privado: do estacionamento até o destino final de viagem;
- d) conforto do modal:<sup>6</sup> é definido como o número médio de passageiros que viajam em pé, por m<sup>2</sup>. Considera-se que o conforto decresce na medida em que este número aumenta. Em alguns modais não é permitida a realização da viagem em pé, como é o caso do modal público executivo e do próprio modal privado, para os quais o nível de conforto é considerado semelhante; e
- e) tempo de espera no ponto de embarque.

Os tempos de viagem no modal público e no modal privado dependem do fluxo de veículos na rede viária. Além do mais, no caso do modal público, o tempo de viagem sofre um acréscimo devido ao número de passageiros transportados, em função do embarque e desembarque dos mesmos. Neste sentido deve-se distinguir entre fluxo de veículos e fluxo de passageiros.

O maior ou menor fluxo de passageiros no modal público depende da tarifa cobrada e da frequência com que as viagens são realizadas. A maior ou menor frequência afeta o tempo de espera do usuário e o tempo total de viagem. Uma tarifa muito baixa aplicada ao modal público executivo, por sua vez, atrairia temporariamente uma demanda significativa para este modal. Se a empresa de transporte não disponibilizar uma frota adequada, para aumentar a frequência das viagens, haverá um aumento no fluxo de passageiros provocando tempos de espera, embarque e desembarque, consideráveis. Em outras palavras o tempo de viagem aumenta fazendo com que alguns usuários voltem para a alternativa originalmente utilizada. Assim, deve existir um ponto no qual nenhum usuário consegue melhorar sua utilidade trocando unilateralmente de modal e rota. Esta situação de equilíbrio é uma extensão do princípio de **Wardrop (1952)**, aplicada à escolha de rotas e modais.

A receita diária obtida por uma empresa de transporte público que opera com os modais público convencional e executivo é o somatório dos produtos dos fluxos (ou número) de passageiros transportados em cada modal, pelo valor da tarifa do modal correspondente, nos vários períodos do dia, e em todos os trechos da rede que compreende a linha de ônibus. Além do mais, a empresa pode variar a frequência das viagens, levando em conta os distintos custos de operação e depreciação dos modais público convencional e executivo.

Os custos de operação e depreciação são diferentes para ambos os modais. Cada um destes modais tem diferentes capacidades para o transporte de passageiros e diferentes tempos de viagem, tempos de espera e níveis de conforto.

Espera-se que o lucro da empresa seja traduzido pela qualidade da oferta de serviços compreendendo a tarifa e a frequência com que são realizadas as viagens. Espera-se existir um ponto em que a empresa não consegue melhorar seu lucro com uma modificação unilateral dos valores das suas variáveis de decisão, que são: tarifa e a frequência das viagens. Esta situação configura o equilíbrio em termos de oferta

---

<sup>6</sup> Autores que atuam na área de transporte têm uma definição formal para conforto em um modal público convencional. Tal definição diz que o conforto é caracterizado pelo número de passageiros em pé por metro quadrado. [Para maiores detalhes e a classificação dos níveis de conforto, ver **Cruz (1991)**, **Freitas (1985)** e **TTC (1988)**]

de serviços. Então, resumidamente, o problema pode ser apresentado da seguinte forma:

Determinar a melhor política para uma empresa do setor de transporte público, que opera com os modais público convencional e executivo, em termos da oferta de serviços, que compreende a frequência das viagens, o número de ônibus necessários, em cada período do dia e respectivos valores das tarifas, para maximizar seu lucro. Na obtenção deste lucro máximo, deve ser assegurada a qualidade destes serviços ao usuário, uma vez que os modais privado e público estão competindo no mercado de transporte de passageiros em termos da utilidade percebida pelos usuários em termos dos atributos das alternativas de viagem ou modal.

## CAPÍTULO 3

### **Revisão Bibliográfica 1: Transporte público e privado**

#### **3.1 Introdução**

Neste capítulo são apresentados, de forma resumida, alguns trabalhos versando sobre o transporte público e o transporte privado. São apresentados trabalhos que tratam do uso do automóvel: as causas e motivações para uso do automóvel, incluindo a relação do uso do automóvel e a oferta de transporte público; as implicações do uso do automóvel para o meio ambiente e tráfego urbano, e a preocupação em encontrar formas de reduzir o uso do automóvel. São apresentados, também, trabalhos tratando especificamente do transporte público: estudos sobre desempenho em transporte público; estudo sobre o tempo de espera em transporte público; estudo sobre a confiabilidade em transporte público; um modelo para descentralização de viagens de ônibus com usuais pontos finais no centro de cidades.

#### **3.2 Resumo dos trabalhos**

**Dargay and Gatley (1999)** e **Dargay (2001)** fazem um estudo do efeito da renda sobre o uso do automóvel para diversos países. O segundo autor faz projeção do crescimento do número de automóveis para o ano 2015 em países com diferentes economias.

**Steg et alii (2001)** fazem um estudo do efeito de fatores de motivação do uso do automóvel, onde o modelo do autor prevê o uso do automóvel para os anos 2010 e 2020 com base em uma análise de regressão múltipla que revelou a importância de uma variável de motivação (a saber, consciência do problema) explicando o atual comportamento do indivíduo no uso do automóvel separado de variáveis sócio econômicas e sócio demográficas. Ainda segundo este autor, o nível de previsão do uso do automóvel pode mudar significativamente se são assumidas variáveis de motivação.

**Vasconcellos (1997)** usa em seu artigo as palavras-chave: automóveis; países em desenvolvimento; aspectos sociais; política pública; planejamento urbano e tecnologia de transporte. O autor analisa os enganos que acontecem ao se lidar com o assunto de transporte público “*versus*” transporte privado em países em desenvolvimento. Ambos os pontos de vista da Economia que vê o automóvel como um “desejo” de livre consumo, e da Psicologia que vê o automóvel como um símbolo de “liberdade”, “*status*” e “poder” são criticados pelo autor. Uma abordagem alternativa para o uso do automóvel é apresentada pelo autor, baseada em tecnologia de transporte quando embutida no padrão de reprodução social contemporâneo. É discutido que a demanda por automóvel, além de sua utilidade, tem sido induzida por políticas de economia e transporte urbano direcionados a setores sociais selecionados - como a classe média - os quais por sua vez percebem o automóvel como um instrumento essencial para sua reprodução social. As mesmas políticas mantêm alternativas de transporte sem sentido. Por conseguinte, existem obstáculos políticos (e não psicológicos) importantes para alternativas, políticas de transporte urbano menos auto-orientadas.

**Pucher (1999)** dá um exemplo bastante amplo onde ocorreu um declínio da demanda por transporte público em relação ao uso do automóvel devido a fatores de diversas naturezas. Seu estudo diz respeito à transformação do transporte público urbano na República Tcheca durante os anos de 1988 a 1998. Segundo o autor, semelhantemente a todos os antigos países socialistas da Europa Central e Ocidental, a República Tcheca tem experimentado uma revolução nos transportes, há uma década atrás, desde a troca de socialismo para o capitalismo. De 1988 a 1998, a propriedade per capita de automóvel subiu 63% no país como um todo, e 93% na capital (Praga). O uso de veículos motorizados por quilômetro aumentou mais do que o dobro. Reciprocamente, o uso de transporte público caiu consideravelmente, 26 % no país como um todo, e 19% em Praga. Esta troca de modal, de transporte público para o automóvel, foi o resultado do aumento da renda, acesso ao mercado Ocidental, declínio real de preços de automóvel e petróleo, remoção de restrições sobre fabricação e importação de automóveis, e a atração do automóvel como símbolo de liberdade, riqueza e *status*. A redução severa de subsídios para transporte público forçou aumentos na tarifa e reduções nos serviços, que encorajaram também a troca pelo automóvel. Como resultado disso, o automóvel se tornou muito popular e o avanço súbito no uso deste causou

problemas sociais e ambientais significativos: congestionamento de rodovias, escassez de estacionamentos, aumento de acidentes de tráfego, poluição do ar, e ruído. Dadas às limitações financeiras severas, as cidades Tcheças estão lutando para preservar os sistemas de transporte públicos enquanto tentam acomodar o automóvel.

**Culliname (2002)** estuda a relação entre proprietários de automóvel e a oferta de transporte público num estudo de caso em Hong Kong. Segundo o autor, é freqüentemente sugerido que medidas de administração de demanda de tráfego para tornar o transporte público mais atrativo tenha pouco impacto sobre o uso e proprietários de automóvel. Muito do trabalho neste assunto, todavia, relaciona pouco a pouco mudanças em oferta de transporte público. Resultado de uma pesquisa atitudinal de 389 estudantes universitários em Hong Kong, onde o transporte público é abundante e barato e o uso do automóvel é extremamente baixo, indica que transporte público bom pode deter o uso excessivo do automóvel, com 65% dos entrevistados declarando que eles são improváveis de comprar um automóvel nos próximos cinco anos.

**Kingham et alii (2001)**, apresentam em seu artigo as seguintes palavras-chave: “mudança de hábitos”; “comportamento de viagem”; “transporte sustentável”; e “escolha modal”. O trabalho trata especificamente do motivo de viagem “a trabalho” e coloca-se a seguinte pergunta em termos de futuro: As pessoas irão deslocarem-se sem fazerem uso de seus automóveis? Os autores examinam as percepções de escolha modal dos empregados de duas companhias de **UK** durante a jornada para o trabalho, e discutem que fatores influenciam a escolha modal e se as pessoas se deslocariam sem o uso de seus automóveis trocando-os por outras formas mais sustentáveis de transporte. Os resultados da pesquisa de mudança de hábitos dos empregados desta companhia são apresentados e comparados com outros estudos relevantes. Noventa e sete e 88% dos funcionários nas respectivas companhias viajam para o trabalho usando automóvel. Enquanto que somente dois e 7% dos entrevistados vão para o trabalho de bicicleta - real potencial para bicicleta foi identificado, dados aos melhoramentos na infra-estrutura de ciclismo. Semelhantemente, somente zero e 3% usam transporte público para ir ao trabalho atualmente – suscitando que melhorias nos serviços de transporte público poderiam resultar numa troca significativa de modal. Globalmente, conclui este autor, ser

genuíno o desejo de deixar o automóvel na garagem quando o motivo da viagem é o trabalho. Como uma das principais barreiras para esta motivação, tem-se a percepção de que as alternativas disponíveis não são viáveis.

Pesquisa semelhante à mencionada anteriormente aparece no trabalho de **Stradling et alii (2000)** onde a preocupação dos autores é a de responder a pergunta “Quais motoristas estão dispostos a reduzir o uso do automóvel e como eles poderiam ser ajudados a mudar de modal integrando-se política de transporte e psicologia social para mudança sustentável?”. O resultado da pesquisa feita através de questionários enviados às residências dos 791 entrevistados (motoristas), por meio de serviço postal, revelou que: um terço (33%) dos entrevistados indicaram que eles gostariam de reduzir o uso do automóvel nos próximos 12 meses, mas somente 7% destes pensam ser provável não usarem o automóvel; um terço (34%) dos entrevistados gostariam de usar mais o transporte público (TP), mas somente 5% destes pensam ser provável usarem este modal; enquanto mais de um terço anteciparam mudanças em seus usos de meio de transporte, e um em cinco (19%) gostaria de diminuir o uso do automóvel e aumentar o uso do TP, somente 3% pensam que esta combinação seja provável de acontecer na prática. Com base nos resultados da pesquisa, os autores discutem medidas para reduzir o uso do automóvel e a relação destas com a Psicologia Social e Políticas de Transporte. Avaliações da eficácia de medidas políticas de persuasão e dissuasão para o não uso do automóvel mostraram que: os motoristas preferem ser dissuadidos a serem persuadidos do não uso de seus automóveis; o velho, os moradores pobres e urbanos seriam mais suscetíveis às medidas de dissuasão; aqueles que residem fora da cidade, dirigindo automóveis grandes e de média força motriz, rodando grandes distâncias em quilômetros anualmente e que usam o automóvel como parte de seu trabalho são menos prováveis de serem persuadidos a reduzirem o uso de seu automóvel por qualquer tipo de medida. Outra pesquisa psicológica social sugere que mudanças sustentáveis por indivíduos, que podem ser integrados em padrões individuais de vida, serão alcançadas mais prontamente por facilitação e apoio do que por coerção.

**Hensher (1998)** estuda o desequilíbrio entre o uso do automóvel e o transporte público nas áreas urbanas da Austrália, questionando o porquê que isso

acontece. Segundo o autor, o transporte público na Austrália é dominado pelo automóvel e, por conseguinte, há um interesse renovado em revitalizar o transporte público urbano como um modo de combater os níveis crescentes de congestionamento de tráfego, deterioração na qualidade do ar e aquecimento do globo terrestre. O autor faz um balanço da situação na Austrália, identificando os desafios que o setor de transporte urbano enfrenta em reparar o desequilíbrio na divisão de mercado de automóvel e transporte público. É dada ênfase particular ao papel dos ônibus e linhas expressas para ônibus em contraste com as ferrovias, e às estratégias para reduzir a atratividade do automóvel. São muitas as considerações listadas pelo autor, as quais pode-se citar algumas, embora, na ordem em que elas aparecem: o papel de sistemas de transporte no setor doméstico guiando mudanças para a forma urbana está declinando; é provável que a área urbana do futuro exiba um padrão particular de total aproveitamento do espaço (compactação); o automóvel está se tornando ecológico: a tecnologia de automóvel desempenha um papel importante na melhoria da qualidade do meio ambiente; práticas de trabalho podem ter uma influência significativa sobre o total de viagens por tempo e lugar; não esquecer da importância crescente de viagens a negócios e não relacionadas ao trabalho; o ar que se respira na área urbana da Austrália não é tão ruim; muito do meio ambiente existe na Austrália e o processo de adaptação será induzido e demorado; muito progresso tem sido feito para tornar as estradas mais seguras; transporte público flexível precisa de mais séria consideração; procurando nichos; o desafio Britânico para tentar reparar o desequilíbrio; dando uma olhada nos bondes: um retorno ao passado ou um avanço genuíno em conduzir tecnologia para melhorar acessibilidade? Pensamentos finais: os desafios chave permanecem.

**Hassol (1996)** testa a hipótese de que a probabilidade de qualquer cidade que implementa políticas para reduzir dependência do uso do automóvel está inversamente relacionada ao grau para o qual certas características físicas e demográficas associadas ao uso do automóvel estão manifestadas naquela cidade. A pesquisa empírica do autor indica certos fatores demográficos, em particular renda, que estão diretamente relacionados ao uso do automóvel. Seu trabalho abrange a questão de como os governantes (municipal) e suas políticas públicas enfrentam o problema do automóvel.

**Mackett (2001)** examina as políticas e ações pessoais que poderiam atrair usuários de automóveis para outras alternativas de transporte para viagens curtas. A



análise baseia-se em resultados de pesquisas levadas a cabo em um projeto para o Departamento de Meio Ambiente, de Transporte e as Regiões de **UK**. São examinados vários eventos que os motoristas dizem que poderiam atraí-los para outras alternativas de transporte. São identificadas as ações associadas com cada uma das alternativas. De acordo com os entrevistados, a ação mais significativa para reduzir o número de viagens de automóvel seria melhorar o transporte público. E afirma o autor, que o impacto potencial da implementação de todas estas ações identificadas nacionalmente sobre o número (e natureza) de viagens curtas é calculado. Um exemplo dentre muitos do autor, é o cálculo das implicações dos efeitos sobre o tráfego.

**Pucher (2000)** fala da popularidade esmagadora do automóvel situada no cerne do, segundo ele, interessante e altamente informativo livro de James Dunn. Segundo **Pucher**, James Dunn sustenta que os Norte Americanos, por exemplo, amam seus automóveis: este amor é a “força motriz” por de trás do título do livro de Dunn “Forças Motrizes: O Automóvel, seus Inimigos e as Políticas de Mobilidade”. Uma vez que 90% das famílias norte-americanas têm pelo menos um automóvel, Dunn assume que a maioria dos Norte-Americanos irão se opor a medidas de restrição do uso do automóvel ou aumento de seus preços através de impostos, taxas e outros custos. Um dentre muitos argumentos apresentados por Dunn em defesa do uso do automóvel é o de que, segundo ele, o sistema de transporte rodoviário funciona muito bem e só precisa estar bem afinado para cuidar de alguns problemas secundários. Dunn coloca toda sua esperança em dificuldades tecnológicas para os problemas causados pelo automóvel e argumenta que estes são prováveis de gerar benefícios líquidos (ou custos desprezíveis) para usuários de automóvel: eles armazenarão apoio político por adoção. Para Dunn, não há nenhuma necessidade para qualquer mudança inconveniente em comportamento de viagem ou estilo de vida porque melhorias tecnológicas em automóveis resolverão quaisquer problemas sociais ou ambientais em última instância que eles causam. Até mesmo, sem estas melhorias os custos externos do uso do automóvel são desprezíveis comparados aos benefícios enormes. Segundo **Pucher**, é difícil de discutir a análise política de Dunn da dificuldade (ou, até mesmo, impossibilidade) de implementar medidas significativas antiautomóvel nos Estados Unidos da América a menos que haja uma crise amplamente percebida que legitime sacrifício. Para **Pucher**, como o assunto é prático, Dunn está provavelmente correto de que faz

muito sentido se concentrar nessas medidas que parecem politicamente viáveis. Além disso, Dunn e outros defensores do automóvel estão corretos que o sistema de transporte rodoviário trás imensos benefícios, pelo menos para seus usuários diretos.

Sobre o uso do automóvel, são recomendados ao leitor, também, os seguintes trabalhos: **Bianco (1996)**, **Smith and Chin (1997)**, **Tertoolen et alii (1998)** e **Stead (2001)**.

**Costa (1996)** fala sobre a organização dos sistemas de transportes públicos urbanos nas áreas metropolitanas da Europa Ocidental. O paradigma estrutura-administração-desempenho é aplicado à mudança de organização em transporte público na Europa Ocidental, para mostrar como a forma estrutural afeta o desempenho e administração do transporte público. O trabalho do autor esboça mudanças de organização em várias áreas metropolitanas da Europa Ocidental, com referência a quatro formas estruturais comuns, e aponta mudanças esperadas em desempenho e comportamento de mercado.

**Jimenez (1997)** explora uma estrutura para o estudo de desempenho em transporte público ônibus. São seus objetivos, comparar os tipos de indicadores usados por empresas de transporte público ônibus no monitoramento e avaliação do desempenho de sistemas, e comparar níveis de desempenho entre sistemas. Para alcançar estes objetivos, o autor desenvolveu um modelo para monitorar e avaliar o desempenho em questão. O modelo integra os conceitos de eficiência, eficácia e qualidade como atributos de desempenho, e os conceitos de produção, distribuição e consumo como dimensões de desempenho. O modelo é aplicado nos sistemas de transporte público ônibus de Toluca, México, e Philadelphia, Pennsylvania. Os resultados mostram que a teoria da produtividade em empresas de economia pode ser usada na medição de desempenho em sistemas de transporte ônibus; características do ambiente determinam o nível e características de desempenho; o conjunto de indicadores e de avaliação para desempenho de transporte público ônibus é mais compreensível em um ambiente desenvolvido do que em um ambiente em desenvolvimento; o nível de desempenho de um sistema de transporte público ônibus em um ambiente desenvolvido é mais alto do que em um ambiente em desenvolvimento, embora algumas medidas parciais possam favorecer o último.

Finalmente, o autor conclui que a análise do nível de desempenho deve ser feita “sob medida” para as condições específicas de cada sistema na cidade e país no qual ele opera.

**Karlafts et alli (1998)** colocam que, baseado em vários estudos que analisam os efeitos de subsídios de transporte público no desempenho de um sistema, há um consenso que subsídios de transporte públicos aumentaram a eficácia do sistema, mas comprometeram sua eficiência e desempenho global. Os autores provam estatisticamente que subsídios de transporte público podem não ter efeito sobre o desempenho do sistema quando o tamanho do sistema é considerado. Mais adiante, segundo eles, uma análise de simulação indica que redistribuindo subsídios sem mudança no nível de subsídio total ter-se-á pouco impacto no desempenho de transporte, um achado que poderá ter implicações importantes por avaliar esquemas de alocação alternativos. Em se tratando de subsídio, **Tisato (1998)** estabelece um vínculo entre o grau de falta de confiabilidade em serviços de ônibus e o nível ótimo de subsídio para ônibus. Segundo o autor, com a falta de confiabilidade influenciando o custo do usuário, e o custo do usuário sendo uma chave para determinar o subsídio ótimo para o ônibus, segue que existe uma ligação entre a falta de confiabilidade nos serviços e o subsídio ótimo. A falta de confiabilidade nos serviços oferecidos mostra ter uma influência significativa sobre o subsídio ótimo. O impacto é pequeno em casos onde um único tipo de comportamento (aleatório ou determinístico) do usuário acontece. Em contraste, o impacto é muito mais significativo quando um modelo *logit* é usado para predizer a escolha entre dois tipos de comportamentos do usuário.

**Lyons (1997)** estuda a questão da medida de desempenho em transporte urbano, através de uma análise comparativa de medidas única e parcial de desempenho. Segundo o autor, os indicadores usuais de desempenho são medidas parciais de eficiência. Ainda, segundo ele, recentemente, estudos enfocaram em desenvolver uma única medida global de desempenho de transporte baseada em produtividade de fator total (PFT) e/ou modelos de análise envoltória de dados (AED). Todavia, estudos usam diferentes conceitos, medidas de “*output*” e “*input*”, e conjunto de dados para medir produtividade. O autor usou as medidas globais PFT e AED para os dados de 93 empresas de transporte urbano com mais de 50 ônibus nos anos de 1986, 1988, e 1990. A análise revelou que as medidas globais de

produtividade produzem resultados consistentes quando variáveis de “*output*” permanecem fixas. Todavia, a designação de empresas com “melhor” ou “pior” desempenho é influenciada substancialmente pela escolha da variável de “*output*”. Segundo o autor, existem diferenças significativas em desempenho quando medido por medidas globais e/ou parciais, mas medidas parciais comumente usadas são boas para prever produtividade global. Segundo o autor, embora se saiba que o ambiente operacional importa, características influenciadas por administradores de transporte e fazedores de política explicam muito da variação em desempenho.

**Reed (1997)** trata especificamente da questão do “tempo de espera” por transporte público (ônibus). Este autor busca caracterizar o impacto da informação do “*schedule*” (horário) de ônibus em tempo-real sob a percepção e comportamento do usuário do modal ônibus. Este autor utiliza “*Conjoint Analysis*” (ou preferência declarada), uma metodologia que avalia a preferência ou utilidade dos indivíduos. As entrevistas foram realizadas nos pontos de ônibus, e os resultados indicam que a informação dos horários de ônibus em tempo-real permite aos usuários experimentarem a redução de um terço (30%) no custo de espera relativo ao custo quando somente um horário impresso pela empresa de ônibus é avaliado. Outros resultados avançam, indicando que dois quintos (40%) do peso de importância na satisfação do usuário que já decidiu tomar o ônibus são aplicados à informação de tempo-de-chegada do ônibus. Ainda, segundo este autor, em contraste, a informação de tempo-de-chegada mostra ter pequeno efeito direto sobre a escolha de modal quando decisões são tomadas numa base mês-a-mês.

**Rietveld et ali (2001)** tratam do grau de falta de confiabilidade em meios de transporte público ônibus em que tempos de partida e chegada reais podem divergir do horário oficial da grade de horários da empresa. Segundo o autor, dados de grau de falta de confiabilidade normalmente são unimodais. No trabalho dos autores, o grau de falta de confiabilidade é tido sob uma perspectiva multimodal, implicando numa troca de atenção longe da empresa provedora dos serviços para mais próxima do usuário. A avaliação do grau de falta de confiabilidade dos usuários é estimada. Os resultados da aplicação do estudo em Netherlands são apresentados. Foi encontrado que: o valor de uma certa perda de tempo de viagem de 1 minuto na partida é 27 centavos de dólar, enquanto que o valor de uma probabilidade de 50% de uma espera de 2 minutos é 64 centavos de dólar. Com base nestes valores foi

levada a cabo uma avaliação de probabilidades que melhore estratégias. Uma dentre outras medidas, apontadas pelos autores, que são relativamente baratas de implementar e resultam em ganhos para a média dos passageiros do transporte público, é aumentar os tempos de transferência e restrições severas aos motoristas de ônibus impedindo-os de partir cedo.

**El-Hifnawi (2002)** propõe um sistema de rotas de ônibus cruzando a área central da cidade (“*cross-town*”) como uma solução para descentralização das viagens com usuais pontos finais no centro de CBD (“*Central Business Distric*”). O autor analisa os custos e benefícios, em um estudo de caso para a cidade de Monterrey, México. A principal característica das rotas “*cross-town*” é que nenhum final de linha de ônibus está localizado no CBD. O objetivo do autor é usar o seu modelo de planejamento de transporte urbano para simular os ganhos e perdas de produtividade no sistema de ônibus introduzindo um número determinado de novas rotas do tipo “*cross-town*”. O estudo analisa a produtividade financeira de linhas de ônibus bem como sua viabilidade econômica medindo os ganhos e perdas de bem-estar para os usuários de ônibus, usuários de automóvel e operadoras de linhas de ônibus. Segundo o autor, foi usada a cidade de Monterrey, porque ela é, em muitos aspectos, uma típica cidade de um número grande de cidades em desenvolvimento, particularmente, cidades com taxas altas de crescimento populacional e proprietários de automóvel, e a capacidade das vias (estradas) limitada. Está embutido no modelo, o usual modelo com as etapas de: geração de viagem; distribuição de viagem; divisão modal; e “*route assignment*”. Segundo o autor, não haverá nenhuma mudança significativa nos custos operacionais em ônibus porque nenhum ônibus adicional será usado para a novo tipo de serviço. A perda em receita para as operadoras de ônibus é ligeiramente menor quando comparada à economia total para os usuários de ônibus devido à eliminação das transferências. E com o novo tipo de serviço, resulta em um desvio de viagens de automóvel para viagens de ônibus e com isso um aumento subsequente em movimentação de ônibus. Somando os custos e benefícios de todas as partes envolvidas, e se lembrando de que esta análise só está baseada em viagens no período de pico da manhã, a introdução do novo tipo de serviço de rotas “*cross-town*” resulta em um lucro líquido. O aumento dos lucros totais para os passageiros de ônibus e usuários de automóveis excede as perdas para as operadoras de ônibus por aproximadamente US\$2820 durante o período de pico por dia útil ou US\$733,200 por ano. Esta é

apenas uma parte das considerações e das conclusões que o autor apresenta em seu trabalho através dos resultados de uma simulação do modelo. O autor mostra que com a implantação das rotas “*cross-town*”, resulta no aumento em bem-estar global para o sistema.

## CAPÍTULO 4

### Revisão Bibliográfica 2:

### O modelo de equilíbrio de Florian (1977)

#### 4.1 Descrição do modelo

Este é um dos vários modelos de equilíbrio tratados pelo autor na literatura. Este modelo de **Florian (1977)** é essencialmente um modelo de equilíbrio de tráfego.<sup>7</sup> A motivação para se adotar este modelo neste trabalho origina-se no simples fato que completos e abrangentes estudos de planejamento de transporte devem considerar viagem por todos os meios e métodos existentes. Outros modelos na literatura não chegam a considerar simultaneamente variações na demanda de viagem por modal e interação de automóveis e transportes públicos sobre uma rede de transporte. Além do mais, para este modelo o fluxo de veículo por todos os meios sobre a rede pode ser modelado, supondo para isto que os meios de transporte público estejam servindo itinerários fixos, tal como linhas de ônibus. Embora não sendo um modelo atual, ele contempla as características necessárias ao desenvolvimento de uma das partes do Modelo de Planejamento de Ofertas de Serviços de um Sistema de Transporte Público Multimodal o qual é objetivo deste trabalho. Estas características serão vistas no final do capítulo, e a descrição do modelo de **Florian** é apresentada a seguir.

Subdivide-se a área urbana em zonas, cada uma destas representando origens e/ou destinos de viagens.

Seja **P** o conjunto de origens, **Q** o conjunto de destinos e **M** o conjunto de modais.

---

<sup>7</sup> **Fernandez and Friesz (1983)** tratam do equilíbrio de mercado em transporte. Segundo estes autores, este problema de equilíbrio tem sido tratado pelo uso dos bem conhecidos e tradicionais quatro passos do modelo de transporte. Neste modelo, têm-se os primeiros três sub-modelos: geração de viagem, distribuição de viagem e divisão modal. Para o mesmo pode ser considerada uma função de demanda que prediz, respectivamente: quantas viagens são geradas; entre quais nós origem-destino (O-D); por qual modal disponível, como uma função dos níveis de serviços específicos proporcionados entre cada par (O-D). O quarto sub-modelo pode considerar uma função oferta, embora em geral ela também faça parte do processo de equilíbrio. Ainda, segundo estes autores, existem dois diferentes tipos de equilíbrio: o primeiro é o equilíbrio dos fluxos sobre a rede, durante o passo de distribuição de tráfego, de acordo com um apropriado princípio comportamental dos usuários, que se denomina "Equilíbrio de Tráfego"; o segundo é o equilíbrio dos níveis de serviço e valores de fluxos obtidos e usados em cada um dos quatro passos do modelo tradicional. Este último tipo de equilíbrio corresponde ao conceito econômico de equilíbrio em que oferta é igual à demanda, e que é denominado de "Equilíbrio de Mercado".

Seja  $g$  o número total de viagens de pessoas entre todas as origens e todos os destinos. Seja  $g_p$  o número de viagens de pessoas que se originam na zona  $p$ . Seja  $g_{pq}$  o número de viagens entre a zona de origem  $p$  e a zona de destino  $q$ . Seja  $g_{pq}^m$  o número de viagens entre  $p$  e  $q$  pelo modal  $m$ . Isto é,

$$g = \sum_{p \in P} g_p = \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} g_{pq} = \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{m \in M} g_{pq}^m \quad (4.1)$$

Deve-se fazer sempre uma distinção entre as viagens feitas por automóvel e as viagens feitas pelo modal ônibus. Através das notações  $g_{pq}^{au}$  e  $g_{pq}^{\hat{o}}$ , é reforçado que  $g_{pq}^{au}$  são viagens feitas de automóvel e que  $g_{pq}^{\hat{o}}$  são viagens feitas de ônibus.

Sejam  $X_p$ ,  $Y_q$ , e  $Z_{pq}$ , denotando conjuntos de variáveis explicativas de impedância de viagem<sup>8</sup> que estão relacionadas com zonas de origem, zonas de destino ou pares de origem-destino, respectivamente. Por exemplo,  $x_p \in X_p$ , pode ser o nível de renda média de habitantes da zona  $p$ ;  $y_q \in Y_q$  pode ser o número de locais de estacionamento disponível na zona  $q$ ; e  $z_{pq} \in Z_{pq}$ , o preço da passagem de ônibus da zona  $p$  até a zona  $q$ .

Pode-se pensar numa primeira classe de modelos de demanda. Nesta primeira classe, postula-se que  $g_{pq}^m$  é uma função das impedâncias de viagem,  $u_{pq}^m$ , associadas ao par  $(p, q)$  por cada um dos modais disponíveis.

$$g_{pq}^{m_1} = G^{m_1} \{u_{pq}^m, m \in M; X_p, Y_q, Z_{pq}\}, \quad (4.2)$$

Nota-se, por exemplo, que  $g_{pq}^m$  não depende de  $x_{p_1}$  se  $p_1 \neq p$ . Em particular, é de interesse a restrição  $\tilde{G}_{pq}^m$  desta função dados valores específicos de  $X_p$ ,  $Y_q$ ,  $Z_{pq}$  isto é,

$$g_{pq}^{m_1} = \tilde{G}_{pq}^{m_1} \{u_{pq}^m, \text{ para todo } m \in M\} \quad (4.3)$$

<sup>8</sup> Para ir de um ponto até outro da rede tem-se uma espécie de uma resistência. Esta resistência é algo que se contrapõe ao deslocamento, e pode ser dada pela distância, pelo tempo de viagem e pelos custos envolvidos com o deslocamento. Todos estes fatores formam uma espécie de resistência que faz com que o usuário evite viajar. Isto é, a esta distância está associado um tempo e custos que o usuário tem de arcar para fazer o deslocamento, e etc. Tudo isso forma uma medida que se dá o nome de impedância de viagem, análogo ao conceito de impedância em uma rede elétrica.



Um exemplo específico de tal função é

$$g_{pq}^{m_1} = g_{pq} \cdot \frac{\exp(\Theta u_{pq}^{m_1} + k_{pq}^{m_1})}{\sum_{m \in M} \exp(\Theta u_{pq}^m)} \quad (4.4)$$

Então, para qualquer número de viagens feitas entre  $p$  e  $q$ , segundo **Charles River Associates (1972)**, um modelo *logit multinomial* prediz a proporção de viagens por cada modal.  $k_{pq}^{m_1}$  é um escalar associado ao par origem destino ( $p$ ,  $q$ ) e modal  $m_1$  o qual representa o efeito combinado das variáveis explicativas  $X_p$ ,  $Y_q$  e  $Z_{pq}$ . [Ver mais detalhes em **Brand and Manheim (1973)**]

Uma segunda classe de modelos de demanda considerada é da forma

$$g_{pq_1}^{m_1} = G_{q_1}^{m_1} \{u_{pq}^m, \text{ para todo } m, q; X_p, Y_q, Z_{pq}\} \quad (4.5)$$

A especificação de tais funções postula que escolhas de destino e modal são determinadas simultaneamente. Como anteriormente, a forma restrita de tal função de demanda com respeito à impedância de viagem é:

$$g_{pq_1}^{m_1} = \tilde{G}_{pq_1}^{m_1} \{u_{pq}^m, \text{ para todo } m \in M, q \in Q\} \quad (4.6)$$

Um exemplo específico de uma tal função de demanda é o modelo *logit* estendido de Dial (1973),

$$g_{pq}^{m_1} = g_p \cdot \frac{r_{q_1} \exp(\Theta u_{pq_1}^{m_1})}{\sum_{q \in Q} \sum_{m \in M} r_q \exp(\Theta u_{pq}^m)}, \quad (4.7)$$

onde,  $r_q$  é um índice de atratividade da zona  $q$ .

Segundo Florian (1977), no sistema de planejamento de transporte UMTA *Transportation Planning System* – UTPS (1976), a matriz de origem-destino é predita pelo modelo de distribuição de viagem do tipo gravitacional e o modelo divisão modal pertence à primeira classe de modelos mencionada acima.

É assumido que o número de viagens de pessoas por automóvel é convertido ao número de viagens de veículo por usar um fator de ocupação de automóvel  $\psi_{pq}$  que poderá variar por origem e destino ou ambos. Fatores de ocupação de automóvel são usualmente determinados por inspeção e estão normalmente disponíveis para áreas urbanas onde fazem estudos de transportes. Assume-se que o fator de ocupação é constante para o propósito do modelo.

Deve-se pensar, também, numa especificação da rede. Considera-se uma rede de rodovias de uma área urbana. Identifica-se o conjunto de nós,  $N^{au}$ , e o conjunto de *links* orientados,  $A$ . Os nós  $n$ ,  $n \in N^{au}$ , representam origens, destinos e interseções de rodovias. As duas mãos das rodovias são representadas por *links* diretos  $a$ ,  $a \in A$ , de orientação oposta.

Sobre cada *link* da rede, os tempos de viagem são dados por funções de tempo de viagem, dependentes do fluxo no arco,  $t_a(v_a)$ , as quais são convexas e crescentes em relação aos fluxos dos *link*,  $v_a$ .

Considera-se uma rede de transporte, onde as linhas de ônibus são subdivididas em segmentos de linhas, denotados por  $s$ . Pode-se associar a cada segmento de linha, sua identificação à linha  $\lambda(s)$ . Tem-se um conjunto de nós  $N^{\hat{o}}$  e um conjunto  $S$  de *links* de acesso, *links* de transferência e segmentos de linha.

Aos *links*, é associado um tempo de viagem  $c_s$  para cada  $s \in S$  da rede de ônibus, como a seguir:

- a) tempo de espera e um tempo de deslocamento a pé, em *links* de acesso e de transferência;
- b) tempo de viagem no veículo em um segmento de linha.

A capacidade de uma linha não é considerada explicitamente. Isto é justificável se existe sempre capacidade suficiente para transportar todos os passageiros que desejam viajar. É assumido que a frequência da linha,  $f_{\lambda}$ , é ajustada para satisfazer a demanda máxima de cada linha.

Certos *links* das duas redes podem ser considerados coincidentes no sentido que todas as linhas de ônibus, que usam a rede, dividem o uso dos *links* com os automóveis. Seja

$$\Delta_{a,s} = \begin{cases} 1, & \text{se segmento } s \text{ de linha } \lambda(s) \text{ usa o link } a; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.8)$$

Embora alguns dos *links* das duas redes sejam comuns, cada rede tem *links* não comuns com a outra. Isto é, a rede de automóveis tem *links* não utilizados pela rede de ônibus, e vice-versa.

## 4.2 Um protótipo do modelo

Para simplicidade de exposição, é apresentado um modelo para automóvel e um meio de transporte público sendo o ônibus. Este modelo foi concebido por Florian (1977).

É assumido que sobre a rede, o fluxo de viajantes de automóvel de  $p$  até  $q$  subdivide-se em fluxos de caminho  $h_{k,pq}^{au}$ , onde  $k$  é um índice de caminho. Cada linha contribui com  $f_{\lambda(s)}$  veículos por período de tempo para cada um de seus segmentos. E este período de tempo deve ser entendido como um período típico, por exemplo, entre 07:00h e 08:30h - período em que as pessoas se deslocam em geral para o trabalho.

A fim de determinar o efeito destes veículos sobre a capacidade das estradas, é assumido que um ônibus é equivalente a um múltiplo de automóveis. Este fator de conversão  $\gamma$ , segundo **Highway Research Board, Highway Capacity Manual - Special Report 87 (1965)**, pode ser determinado empiricamente: em estudos de engenharia de tráfego, um ônibus é equivalente a três ou quatro automóveis.<sup>9</sup> Portanto, o fluxo total de veículos sobre o *link*  $a$  é:

<sup>9</sup> Sheffi (1985) só trata de redes onde os *links* para automóvel e ônibus são independentes. Ao contrário, no modelo de equilíbrio de tráfego de Florian (1977), todos os links podem ser compartilhados por ambos os modais, automóvel e o ônibus. E aí se justifica, então, o fator de conversão  $\gamma$ .

$$v_a = \sum_s \Delta_{a,s} \cdot f_{\lambda(s)} \cdot \gamma + \sum_{(p,q)} \sum_k \delta_{ak,pq} \cdot h_{k,pq}^{au}, \text{ para todo } a \quad (4.9)$$

onde:

$$\delta_{ak,pq} = \begin{cases} 1, & \text{se o caminho } k \text{ para o par } (p,q) \text{ usa o } \textit{link} \text{ } a; \\ 0, & \text{em caso contrário.} \end{cases} \quad (4.10)$$

Para o propósito deste modelo, as frequências de linha  $f_{\lambda(s)}$  são constantes.

A interação dos ônibus e automóveis sobre os *links* da rede afeta a velocidade dos ônibus. O tempo de viagem de ônibus sobre um segmento de linha coincidindo com o *link*  $a$  está relacionado com o tempo de viagem de automóvel  $t_a(v_a)$ , aplicando os resultados de **Holroyd and Scraggs (1964)**, no qual o tempo de viagem de ônibus é igual ao tempo de viagem de automóvel mais uma constante por quilômetro levando em conta o tempo nas paradas. É assumido que a relação funcional pode ser obtida, relacionando o tempo de viagem de ônibus com o tempo de viagem de automóvel:

$$c_s(v_a) = f \{t_a(v_a); y_j, j \in J\}, \Delta_{a,s} = 1, \quad (4.11)$$

onde  $y_j, j \in J$ , são outras variáveis pertinentes tais como o número de paradas por quilômetro, tipo de serviço, etc. Todos os outros *links* de ônibus tem tempos de viagem constantes  $\bar{c}_s$

$$c_s(v_a) = \bar{c}_s, \text{ se } \Delta_{a,s} = 0 \quad (4.12)$$

Assume-se que uma escolha de rota de equilíbrio otimizado do usuário<sup>10,11</sup> ocorre sobre a rede, isto é,

<sup>10</sup> Tem-se o princípio ou lei denominada "Equilíbrio do Usuário". No equilíbrio do usuário, é assumido que o usuário da rede de transporte é um indivíduo racional o qual tenta maximizar sua utilidade, e é razoável pensar que a escolha de rota e de modal é uma função do "custo" do uso de cada alternativa de rota ou modal disponíveis. Segundo **Fernandez and Friesz (1983)**, esta primeira referência para uma possível hipótese comportamental no processo de escolha de rota aparece no trabalho de **Knight (1924)** - na área de Economia - o qual analisa o caso de duas alternativas de estradas (rotas) entre dois pontos geográficos e o mesmo afirma que os usuários irão distribuir-se de maneira que o custo de viagem para cada rota irá ser o mesmo para cada usuário. Mais tarde, **Wardrop (1952)** incluiu uma definição matemática e propôs formalmente este Equilíbrio do Usuário em que o mesmo afirma que: "No equilíbrio nenhum usuário pode reduzir seu tempo de viagem mudando unilateralmente de rota". Esta lei ou princípio, também chamado primeiro princípio de **Wardrop**, tem se tornado amplamente aceito como uma descrição do comportamento espontâneo de viajantes (usuários) independentes sobre uma rede de transporte. **Dafermos (1971)** chamou a atenção que um padrão de fluxo de equilíbrio que satisfaz esta lei irá corresponder a um ponto de equilíbrio de um jogo não cooperativo entre os vários usuários da rede.

<sup>11</sup> No Apêndice 1, o leitor poderá ver, mais detalhadamente, exemplo de Equilíbrio do Usuário em uma rede de transporte.

$$\sum_a \delta_{ak,pq} \cdot t_a(v_a) = u_{pq}^{au}, \text{ se } h_{k,pq} > 0 \quad (4.13a)$$

$$\sum_a \delta_{ak,pq} \cdot t_a(v_a) \geq u_{pq}^{au}, \text{ se } h_{k,pq} = 0 \quad (4.13b)$$

Requer-se, ainda, que os fluxos sejam conservados sobre a rede:

$$\sum_k h_{k,pq}^{au} = \tilde{G}_{pq}^{au}(u_{pq}^{au}, u_{pq}^{\hat{o}}), \text{ para todo } (p, q) \quad (4.14)$$

Analogamente, sobre uma rede de ônibus as escolhas de rota feitas satisfazem:

$$\sum_s \delta_{sk,pq} \cdot c_s(v_a) = u_{pq}^{\hat{o}}, \text{ se } h_{k,pq}^{\hat{o}} > 0 \quad (4.15a)$$

$$\sum_s \delta_{sk,pq} \cdot c_s(v_a) \geq u_{pq}^{\hat{o}}, \text{ se } h_{k,pq}^{\hat{o}} = 0 \quad (4.15b)$$

e

$$\sum_k h_{k,pq}^{\hat{o}} = \tilde{G}_{pq}^{\hat{o}}(u_{pq}^{au}, u_{pq}^{\hat{o}}), \text{ para todo } (p, q) \quad (4.16)$$

O objetivo é calcular os fluxos  $h_{k,pq}^{au}$  e  $h_{k,pq}^{\hat{o}}$  que satisfaçam as equações não lineares (4.9) a (4.16). Segundo **Florian**, a solução direta destas equações é uma tarefa difícil. Uma vez que o número de possíveis caminhos na rede de rodovias e na rede de transporte público cresce combinatorialmente com o número de nós e *links*, é improvável que um método eficiente de solução direta possa ser concebido.

É proposto um algoritmo de solução que usa uma relaxação das restrições (4.11) e permite a decomposição do problema.

#### 4.2.1 Um algoritmo de solução baseado no esquema de relaxação

A abordagem, aqui, é relaxar temporariamente as restrições de tempo de viagem (4.11) e então decompor o problema por modal. É possível estimar valores razoáveis de  $c_s(v_a)$  tal que  $\Delta_{a,s} = 1$ . Estes valores estimados são denotados por  $\bar{c}_s$ .

Quando isso é feito, nota-se que as restrições (4.15a) e (4.15b) são satisfeitas se  $\mathbf{u}_{pq}^{\hat{o}}$  é o comprimento da rota mais curta desde  $p$  até  $q$  sobre a rede de ônibus,  $\bar{\mathbf{u}}_{pq}^{\hat{o}}$ , desde que todos os tempos de viagem de ônibus são independentes dos valores de fluxo de *link*,  $v_a$ .

As condições relaxadas são equivalentes a uma escolha de viagem ao longo da rota mais curta. Portanto, se forem computados os valores de  $\bar{\mathbf{u}}_{pq}^{\hat{o}}$ , as restrições (4.15a) e (4.15b) são satisfeitas e a demanda para viagem por automóvel é então  $\tilde{G}_{pq}^{au}(\mathbf{u}_{pq}^{au}, \bar{\mathbf{u}}_{pq}^{\hat{o}})$ .

Por causa destas simplificações adicionais, pode-se reconhecer que as restrições (4.13a), (4.13b) e (4.14) são as condições de equilíbrio em rede com demanda variável para um único modal.

**Beckmann (1956)**, mostrou que se  $\tilde{G}_{pq}^{au}(\mathbf{u}_{pq}^{au}, \bar{\mathbf{u}}_{pq}^{\hat{o}})$  são, como de costume, funções monótonas decrescentes de  $\mathbf{u}_{pq}^{au}$ , e que os fluxos que satisfazem estas condições podem ser obtidos como uma solução do problema equivalente

$$\min \sum_a \int_0^{v_a} t_a(x) dx - \sum_{(p,q)} \int_0^{g_{pq}^{au}} W_{pq}(y) dy \quad (4.17)$$

$$\text{s. a: } \sum_k h_{k,pq}^{au} = g_{pq}^{au} \text{ para todo } (p, q) \quad (4.18)$$

e restrições (4.9) e (4.10), onde  $W_{pq}(g_{pq}^{au})$  é o inverso da função de demanda  $\tilde{G}_{pq}^{au}(\mathbf{u}_{pq}^{au}, \bar{\mathbf{u}}_{pq}^{\hat{o}})$ .

Diversos algoritmos eficientes estão disponíveis para a solução deste problema [ver, por exemplo: **Bruynooghe (1969)**, **Florian (1976)** e **LeBlanc (1973)**].

A solução do problema (4.17), (4.18), (4.9) e (4.10), produz um conjunto de fluxos de caminho,  $\bar{h}_{k,pq}^{\hat{o}}$ , fluxos de *link*,  $\bar{v}_a$ , tempos de viagem,  $t_a(\bar{v}_a)$ , e impedâncias de viagem de automóvel,  $\bar{u}_{pq}^{au}$ .

Pode ser que tempos de viagem de ônibus,  $c_s(\bar{v}_a)$ , dados pelas equações (4.11), sejam diferentes dos assumidos tempos de viagem,  $\bar{c}_s$ . Sendo assim, propõe-se substituir estes tempos por  $c_s(\bar{v}_a)$  e repetir os cálculos de caminho mais curto para obter um novo conjunto de  $\bar{u}_{pq}^{\hat{o}}$  e então repetir a solução do problema de equilíbrio com demanda variável (4.17) e (4.18). Continua-se este cálculo até não mais ser necessário reajustar os tempos de viagem de ônibus. O algoritmo global que é sugerido aqui é o seguinte:

**Passo 0.** Selecione estimativas dos tempos de viagem,  $\bar{c}_s$ , para segmentos de linhas,  $s$ , tal que  $\Delta_{a,s} = 1$ ; os tempos de viagem de ônibus são  $\bar{c}_s$  para segmentos de linha tal que  $\Delta_{a,s} = 0$ .

**Passo 1.** Calcule a rota mais curta na rede de transporte público e obtenha impedância de ônibus,  $\bar{u}_{pq}^{\hat{o}}$ , para todo  $(p, q)$ .

**Passo 2.** Resolva o problema de equilíbrio em rede com demanda variável, definido pelas equações (4.17), (4.18), (4.9), (4.10), e obtenha os fluxos de *link*,  $\bar{v}_a$ , e as impedâncias  $\bar{u}_{pq}^{au}$ .

**Passo 3.** Calcule os correspondentes tempos de viagem dos ônibus,  $c_s(\bar{v}_a)$ , para todos os segmentos  $s$  tal que  $\Delta_{a,s} = 1$ . Se  $|c_s(\bar{v}_a) - \bar{c}_s| > \varepsilon$ , onde  $\varepsilon$  é uma tolerância conveniente, então  $c_s \leftarrow c_s(\bar{v}_a)$  e retorne ao Passo 1. Se o teste falhar para todo  $s$  tal que  $\Delta_{a,s} = 1$ , continue no Passo 4.

**Passo 4.** Determine as demandas de ônibus:

$$g_{pq}^{\hat{o}} \leftarrow \tilde{G}_{pq}^{au}(\bar{u}_{pq}^{au}, \bar{u}_{pq}^{\hat{o}}), \text{ para todo } (p, q)$$

e aloque estas viagens ao longo das atuais rotas de caminho mais curto na rede de transporte público.

Segundo **Florian (1977)**, o algoritmo acima pode ser interpretado como uma quase decomposição do problema por modal. Todavia sua convergência global não é sustentada por argumentos teóricos rigorosos. Existem razões empíricas boas para a conjectura de que o procedimento converge na prática.

Ainda, segundo o mesmo autor, estudos empíricos mostram que a escolha entre automóvel e o modal ônibus não é muito sensível a mudanças nos tempos dentro do veículo; Portanto, mudanças nas demandas por modais como um resultado de mudanças nos tempos de viagem de ônibus poderia ser relativamente pequena e, conseqüentemente, se poderia observar convergência dos tempos de viagem de ônibus  $c_s(v_a)$  para alguns valores  $\bar{c}_s$ . Por exemplo, no modelo *logit* de divisão modal proposto por **Charles River Associates (1972)**, para a cidade de Pittsburgh, tempos de espera e de transferência são muito mais importantes na determinação da escolha de modal do que os diferentes tempos de viagem no veículo.

Segundo **Florian (1977)**, os resultados computacionais obtidos com o modelo piloto sustentam a conjectura feita a respeito da convergência computacional.

#### 4.2.2 Um teste feito com o algoritmo

O algoritmo foi testado sobre uma rede de rodovias e uma rede de transporte público nas cidades de Hull e Quebec.

A rede de rodovias contém 155 nós, 376 *links* orientados, com a área urbana sendo subdividida em 27 zonas. As funções de tempo de viagem têm a forma

$$t_a(v_a) = t_a^0 \left[ 1,0 + 0,15 \left( \frac{v_a}{c_a} \right)^4 \right] \cdot \lambda_a \quad (4.19)$$



onde  $t_a^0$  é o tempo de viagem de fluxo livre por quilômetro,  $c_a$  é uma medida da capacidade do *link*  $a$ ,  $v_a$  é o fluxo no *link*  $a$  e  $\lambda_a$  é o comprimento do *link*  $a$  (em quilômetro).

A rede de transporte público apresenta quatro linhas as quais estão ligadas aos 128 nós e 22 *links* da rede de rodovias. A matriz origem-destino de viagem por todos os modais foi estimada, e adotou-se a função de divisão modal apresentada em (4.6).

A função de demanda de automóvel,  $\tilde{G}_{pq}^{au}$ , calibrado o modelo (4.6), é a seguinte:

$$g_{pq}^{au} = g_{pq} / [1 + \exp(4,77 - 0,114TW + 0,0411(AIV - TSS) - 3,79A/W)]$$

onde:

- a) TW - é a componente de tempo de acesso de ônibus da impedância de ônibus;
- b) AIV - é o tempo de viagem no automóvel;
- c) TSS - é o tempo de viagem no ônibus;
- d) A/W - é o número de automóveis/trabalhador/membros de uma família nas zonas de origem;
- e) os tempos médios percorridos á pé foram estimados para cada uma das 27 zonas;
- f)  $u_{pq}^{au}$  é usado para a variável AIV;
- g)  $u_{pq}^{\hat{o}}$  é exclusivo para tempos de acesso e transferência para TSS;
- h) a cada zona é designado um valor de A/W que é escolhido de um intervalo de 0,8 a 2,0 com média por volta de 1,3;

- i) a relação de tempo de viagem é uma função simples, da forma  $c_s(v_a) = \beta^i \cdot t_a(v_a)$ ,  $\tilde{v}_a^i \leq v_a \leq \tilde{\tilde{v}}_a^i$ , onde  $\tilde{v}_a^i$  e  $\tilde{\tilde{v}}_a^i$  denotam o limite inferior e o limite superior para o  $i$ -ésimo intervalo do fluxo  $v_a$ . Ao  $\beta^i$  é dado valor que está no intervalo entre 1,5 e 1,625;
- j) os fatores de ocupação  $\psi_{pq}$  são assumidos serem iguais a 1;
- k) o algoritmo usado para calcular o equilíbrio com demanda variável é descrito em **Ferland (1975)**; e
- l) a convergência do algoritmo foi testada em inúmeros experimentos realizados por variar as freqüências de linhas, os valores da variável **AW** e itinerários das linhas de transporte público. Em todos estes testes o algoritmo terminou depois de duas a três iterações, isto é, uma ou duas execuções do Passo 3 e duas ou três execuções dos Passos 1 e 2. Foi adotada a tolerância  $\varepsilon = 5\%$  para o tempo de viagem  $\bar{c}_s$ . Todos estes testes foram inicializados com  $g_{pq}^{au} = g_{pq}$  e, se o Passo 2 for executado mais do que uma vez, a solução anterior será usada como solução de partida para calcular o equilíbrio em rede.

**Florian** conclui a partir dos resultados preliminares de seu algoritmo que o modelo tem bom potencial para implementação em estudos de planejamento de transportes.

#### 4.2.3 Discussão dos dados necessários, aspectos computacionais e sensibilidade do modelo

Segundo **Florian (1977)**, o sucesso da aplicação do seu modelo depende da calibração apropriada das funções de demanda. Ainda, segundo o autor, atualmente, funções de demanda são o elo mais frágil nos modelos que servem para planejar futuros sistemas de transporte.

A implementação do modelo requer uma rede de rodovias e de transporte público como descrito anteriormente. Muitas áreas urbanas que são envolvidas em

estudos de transporte têm produzido tais redes. Todavia, as funções de tempo de viagem,  $t_a(v_a)$ , não estão sempre disponíveis. No recente exame de tais funções, **Branston (1976)** indica que a forma funcional:

$$t_a(v_a) = t_a^o \left[ 1 + \lambda \left( \frac{v_a}{c_a} \right)^\pi \right]$$

onde  $\lambda$ ,  $\pi$  são constantes,  $t_a^o$  é o tempo de viagem de fluxo livre,  $c_a$  é a medida da capacidade do *link*  $a$ , e  $v_a$  é o fluxo no *link*  $a$ , é apropriada para muitas aplicações. Além do mais, a estimação das funções de tempo de viagem (4.11) e os parâmetros  $\gamma$  e  $\psi_{pq}$  requerem observações que podem ser feitas de acordo com práticas de engenharia de tráfego.

Segundo **Florian (1977)**, o cálculo dos fluxos de equilíbrio no Passo 2 do algoritmo, para um problema de tamanho real, apresenta uma pequena dificuldade. A experiência computacional descrita em **Florian and Nguyen (1976)** indica que o esforço computacional necessário é de 1/4 a 1/3 maior do que o requerido para resolver um problema de alocação de tráfego de demanda fixa. Segundo **Florian (1977)**, o atual código para um problema de tráfego tal como o encontrado em **Nguyen (1975)** pode obter fluxos de equilíbrio para redes da ordem de centenas de zonas e milhares de *links* em segundos. A determinação das rotas mais curtas na rede de transporte público pode ser eficientemente bem executada por algoritmos tais como descrito por **Dial (1973)**.

Segundo **Florian (1977)**, embora consistente com atual “estado-da-arte” a simulação dos fluxos de ônibus é um tanto simplista. Ainda, segundo este autor, onde o serviço de transporte público opera próximo da capacidade, o tempo de espera cresce. Existe uma boa possibilidade de modelar este fenômeno por associar funções com *links* de acesso que poderiam depender da taxa de chegada no ponto de acesso e o número de lugares vazios no ônibus. A primeira tentativa de derivar tais funções é descrita em **Kadosch (1976)**. Todavia, os resultados obtidos ainda não são adequados para incorporação no modelo do tipo equilíbrio de tráfego. Segundo **Florian**, uma vez que estas funções dependem dos fluxos sobre os *links* de acesso e transferência, e dos segmentos de linhas, é bem provável que a

incorporação de tais funções de tempo de espera no modelo de rede de ônibus não tenha dificuldades.

É assumido que o número de ônibus alocados para a linha de ônibus é fixo, e poderia ser necessário reajustar as freqüências de linha,  $f_\lambda$ , de acordo com a relação  $f_\lambda = N_\lambda / T_\lambda$  onde  $N_\lambda$  é o número total de ônibus alocados à linha  $\lambda$  e  $T_\lambda$  é tempo total para realização do circuito.

Conseqüentemente, a estimativa do tempo de espera teria de ser modificada, uma vez que pelo menos parte do tempo de espera é dependente do tempo entre chegada do ônibus.

### 4.3 Comparação do modelo com outros modelos multimodais

O modelo de **Florian (1977)** representa um refinamento de outros importantes esforços para especificar e operar modelos multimodais baseados nas noções de equilíbrio.

**Irwin and Von Cube (1962)** desenvolveram um modelo para viagem por automóvel e transporte público para um estudo de planejamento de transporte da cidade de Toronto, Canadá. Este modelo permitiu a interação de veículos sobre uma rede de rodovias e um “*feedback*” entre “*congested assignment*”, divisão modal, e distribuição de viagem. Seu procedimento computacional convergiu para algum valor de equilíbrio aproximado e foi usado com sucesso em estudos em Toronto.

Mais tarde, **Manheim (1970)** desenvolveu o DOTRATRANS o qual foi uma tentativa de construir um modelo de equilíbrio multimodal usando como função de demanda o modelo de **Quandt (1966)**. O algoritmo que usado para produzir os fluxos foi o método de alocação incremental, o qual, como mostrado por **Ferland (1975)**, somente aproxima fluxos de equilíbrio. Bem mais tarde, **Wigan (1973)** descreveu um modelo de equilíbrio de viagem de ônibus e de automóvel sobre uma rede de estradas que é similar ao modelo de **Florian (1977)**. Este modelo não é especificado em detalhes e somente um algoritmo, que é aparentemente de natureza heurística, é explicitado. Este algoritmo serviu para testar o efeito de vários

esquemas de “*road pricing*” sobre o modelo de escolha de passageiros sobre uma rede hipotética.

É relevante mencionar o trabalho de **Dafermos (1972)** e **Netter (1972)** sobre o problema de equilíbrio em rede para múltiplas classes de usuários. Em contraste com o modelo de **Florian**, os autores consideram várias classes de usuários e assumem que a demanda de viagem para cada classe é fixa, e não tratam das variações de demanda entre os modais automóvel e ônibus, que é a característica principal e mais importante da abordagem de **Florian**.

No modelo de **Florian**, os ônibus são alocados a itinerários fixos e não estão livres para escolherem suas rotas sobre a rede, como é suposto nos modelos de múltiplas classes de usuários.<sup>12,13</sup>

#### 4.4 Considerações finais sobre o modelo

O modelo de **Florian (1977)** é um modelo de equilíbrio de tráfego que possui as seguintes características:

- a) distinção entre o fluxo de veículos e o fluxo de passageiros de transporte público;
- b) modela a interação que ocorre entre automóveis e veículos de transporte público que usam os mesmos *links* da rede;<sup>14,15</sup>

<sup>12</sup> **Fernandez and Friesz (1983)** tratam do equilíbrio de mercado de transporte com **K** diferentes classes de usuários ou produtos, cada uma destas com diferentes funções de demanda por serviços de transporte e diferentes valores para fatores usados na produção destes serviços (por exemplo, diferentes valores de tempo de viagem). Segundo estes autores, **Dafermos (1971, 1972)** foi o primeiro a explorar as implicações de introduzir múltiplos modais (ou, equivalente matematicamente, múltiplas classes de usuários) com real interdependência entre os custos dentro de um problema rigoroso para a tarefa de alocação otimizada de viagens de usuários, com demanda fixa.

<sup>13</sup> **Zhang, J. (1997)** apresenta um modelo de distribuição de tráfego com múltiplas classes de usuários. Neste artigo, o autor estuda as condições de equilíbrio em uma rede de transporte onde existem múltiplas classes de usuários, incluindo uma classe de usuários determinística e uma ou mais classes de usuários estocásticas, cada uma destas classes caracterizada por um único valor de variância de percepção. É desenvolvido um conceito apropriado de “equilíbrio da classe de usuário múltipla” (ECU) o qual generaliza ambos os conceitos de “equilíbrio do usuário determinístico” e “equilíbrio do usuário estocástico”. No “equilíbrio da classe de usuário múltipla”, o padrão de viagem de cada uma das classes de usuário satisfaz suas próprias condições de equilíbrio. As possíveis aplicações do modelo combinado são ilustradas em termos de comportamento de viagem sobre uma rede com Sistemas de Informações Avançadas (SAI). O problema ECU tem uma formulação matemática na qual são garantidas a existência e unicidade sob condições de equilíbrio moderadas. Um método eficiente de solução para o problema do ECU é derivado do método “*standart*” de médias sucessivas. A análise numérica do problema ECU para selecionar estruturas da rede e mistura de classes de usuário mostra que a presença de usuários estocásticos é necessária

- c) o fluxo de veículos por todos os meios sobre a rede pode ser modelado, supondo para isso que os meios de transporte público estejam servindo itinerários fixos, tal como linhas de ônibus;
- d) modela a distribuição de viagens por meio de um modelo *logit multinomial*; e
- e) usa o princípio de **Wardrop (1952)**: “na condição de equilíbrio, nenhum usuário consegue melhorar seu tempo de viagem com uma mudança unilateral de rota”.

Entretanto, o modelo de Florian (1977) não leva em consideração, de forma explícita, que as tarifas e frequências dos modais públicos possam ser alteradas pelo decisor. No capítulo seguinte, será apresentado um modelo alternativo que busca suprir esta deficiência.

---

para minimizar o custo do usuário médio. Este fenômeno, segundo o autor, é evidente em redes onde congestionamentos não são significativos.

<sup>14</sup> Segundo **Fernandez and Friesz (1983)**, o modelo de **Florian (1977)** é um modelo com dois modais (automóvel e o ônibus) que, ao contrário de **Evans (1976)**, usa funções de demanda não-separável para capturar mais realisticamente a interdependência entre a variação de demanda por modal. O equilíbrio é encontrado resolvendo-se uma seqüência de problemas do tipo apresentado por **Beckmann et alli (1956)** para um modal (automóvel) enquanto a alocação de fluxo é determinada por uma técnica de alocação tudo-ou-nada. O modelo de **Florian and Nguyen (1978)** emprega essencialmente as mesmas funções de demanda separável como **Evans (1976)** e desse modo satisfaz implicitamente a restrição de simetria de “*demand-side*” inerente no mais geral problema de otimização equivalente [ver mais detalhes dos problemas de otimização, para custo não-separável e funções de demanda não-separável, em **Fernandez and Friesz**, onde os autores tratam especificamente destes tópicos]. Segundo **Fernandez and Friesz**, esta restrição de simetria (a matriz Jacobiana formada pelas funções de custo é simétrica) são pensadas por muitos autores como irrealistas no sentido de que ela requer que a influência de um modal (A) sobre o congestionamento experimentado por outro modal (B) é a mesma influência de (B) sobre (A).

<sup>15</sup> No **UMTA Urban Transportation Planning System – UTPS (1976) User’s Guide** Apud **Florian (1977)**, por exemplo, emprega-se uma seqüência de geração de viagem, distribuição, divisão modal, alocação de fluxos à rede, que não permite um “*feedback*” entre estes vários estágios. Todavia, as interações entre os modais são importantes, uma vez que a escolha de passageiros entre modais tem efeito direto sobre congestionamento na rede, que por sua vez tem um efeito direto sobre os tempos de viagem de ônibus e assim, sobre a escolha de modal. No modelo de equilíbrio de tráfego de **Florian** estas interações são consideradas.

## CAPÍTULO 5

### **O modelo de planejamento de oferta de serviços de um sistema de transporte público multimodal**

#### **5.1 Considerações Iniciais**

O objetivo geral deste trabalho, como descrito no Capítulo 1, é estabelecer um modelo para o planejamento de oferta de serviços de um sistema de transporte público multimodal para uma empresa executora que atua com os modais público convencional e executivo. O modelo proposto deve determinar o nível ótimo de oferta de serviços e, como consequência, fornecer o lucro máximo a ser obtido pela empresa, considerando a hipótese de uma possível desregulamentação do setor de transporte público. No modelo que será apresentado, o modal privado, o modal público convencional e o modal público executivo competem entre si no mercado de transporte de passageiros, segundo os atributos que compõe a função utilidade que expressa a preferência dos usuários na escolha do modal.

Problemas no sistema de transporte, tais como, tráfego congestionado, falta de vagas de estacionamento, entre outros, podem ser resolvidos indiretamente através da melhoria dos serviços públicos de transporte. Uma questão mais difícil de ser compreendida diz respeito aos impactos que uma possível desregulamentação do setor de transporte público pode trazer. Como se pretende mostrar, podem ocorrer situações nas quais mudanças na oferta de serviços são favoráveis tanto à empresa como ao usuário do transporte público. Quantificar estes possíveis benefícios, através de relações de causa e efeito, é uma tarefa não trivial, mas que pode ser realizada com o uso de modelos de equilíbrio. A seguir, são apresentados os fundamentos para o desenvolvimento do modelo proposto neste trabalho.

#### **5.2 Fundamentos para o desenvolvimento do modelo**

Segundo **Félex (1983)** Apud **Lacerda (1989)**, a opinião do usuário, até então não levada em conta em seus desejos pelos técnicos das agências de transporte, apresenta alto grau de explicabilidade para as variáveis envolvidas nos eventos

associados aos meios de transportes. Segundo este autor, nos trabalhos presentes na literatura, é verificada a falta de tradição no tratamento de variáveis que dependam do comportamento e atitudes humanas: não é levado em consideração, por exemplo, quanto vale para o usuário uma unidade de tempo, 1 minuto de espera num ponto de ônibus,<sup>16</sup> ou quanto vale para o usuário 100 metros que ele tem que se deslocar a pé desde o estacionamento ou ponto final de desembarque do ônibus até o destino final da viagem. Por outro lado, como é possível descobrir este mecanismo de avaliação se nem o próprio usuário sabe quais são estes valores? Estas variáveis denominadas pelo autor de comportamentais e atitudinais serão consideradas neste trabalho, usando técnicas de Preferência Declarada e/ou Observada [ver Anexo 1] para modelar, por meio de uma função *Logit-Multinomial*, o processo de escolha dos usuários. Estas técnicas poderão ser utilizadas na determinação dos atributos relevantes e os respectivos pesos, na composição das utilidades das diversas alternativas consideradas. E com este modelo *Logit* é possível fazer a divisão modal de forma a distribuir a demanda<sup>17,18</sup> (fluxo de passageiros) ao longo da rede.

Tem-se, então, um aspecto a ser considerado que é como o usuário se comporta, ou seja, o que leva o usuário a escolher este ou aquele meio de transporte. Quais perguntas, formuladas aos usuários através de pesquisa usando técnicas de preferência declarada e/ou observada, irão dar a oportunidade de determinar este comportamento de escolha? Se a pesquisa é feita num estacionamento, por exemplo, já se sabe onde o indivíduo estacionou, ou seja, qual seu destino. Sabe-se, também, o valor do preço do estacionamento. Pode ser perguntado de onde o usuário veio, e assim saber a distância entre a origem e o destino e, por conseguinte o correspondente tempo de viagem. As técnicas de

---

<sup>16</sup> Para uma leitura complementar, é sugerido ao leitor o Capítulo 3 (Revisão Bibliográfica 1) onde são apresentados, de forma resumida, os trabalhos de **Reed (1997)** e **Rietveld et alii (2001)** que tratam da questão de quantificar o “tempo de espera” em termos de custo para o usuário.

<sup>17</sup> Cada indivíduo, em função de suas necessidades, tem um perfil de movimentação. Por exemplo: sair de casa de manhã para o trabalho e no final da tarde retornar para casa. Isto constitui um padrão de deslocamento que um indivíduo pode ter. Por outro lado, outro indivíduo tem seu padrão de deslocamento. Considerando os vários períodos do dia, pode-se identificar qual é o volume de indivíduos que se movimentam entre os vários pontos da rede ao longo do dia. Isto é, a agregação ou soma de todos os interesses de movimentação num determinado período é a demanda.

<sup>18</sup> Segundo **Novaes (1992)**, no contexto da previsão da demanda de transporte, tem-se: (a) Análise Unimodal e Análise Multimodal; (b) Modelos Agregados e Modelos Desagregados. Nos modelos agregados a área geográfica de estudo é dividida em zonas e as estimativas são feitas através de variáveis obtidas *globalmente* dentro das zonas, com a determinação dos centróides que são pontos que representam, por exemplo, bairros de uma cidade, os quais são geradores ou atraidores de tráfego ou demanda. Nos modelos desagregados as variáveis são determinadas a um micro-nível, considerando-se comportamentos individuais dos usuários, através de Métodos de Análise de escolha discreta, onde variáveis dependentes podem ser binárias ou de múltipla escolha.



preferência declarada e/ou observada podem ajudar a identificar o mecanismo de decisão que os usuários adotam. Para o usuário que vai escolher uma alternativa de viagem ou modal, os valores dos atributos desta alternativa são considerados (ponderados) numa fórmula, mesmo que a mesma não seja explícita, a qual traduz a preferência do usuário por uma determinada alternativa. Cabe lembrar que através das técnicas de preferência declarada os indivíduos informam as suas preferências com relação às alternativas de três maneiras: colocando-as em ordem de preferência (*ranking*), submetendo-as a uma escala de avaliação (*rating*) ou escolhendo a opção preferida do conjunto de alternativas disponíveis (*choice*). A seleção por um dos três métodos dependerá de uma série de análises. Na avaliação (ou *rating*), por exemplo: as respostas são dadas para cada alternativa. As respostas podem ser interpretadas como uma mensuração da utilidade de uma alternativa. Normalmente a avaliação é representada por uma preferência relativa entre duas alternativas numa escala semântica de desejabilidade ou probabilidade de escolha. Segundo **Bem-Akiva and Lerman (1985)**, através das técnicas de preferência declarada os indivíduos fazem trocas ("*Trade-off*") entre os níveis dos atributos que compõem as alternativas.

Independente das melhorias realizadas nos diversos meios de transporte, sempre caberá ao usuário escolher o modal e a rota para realização da viagem. Neste processo, o usuário leva em consideração tudo que diz respeito à rede, desde o ponto de origem até o ponto de destino. Portanto, é natural esperar que o impacto das decisões tomadas pelos diversos usuários deva ser analisado ao longo de toda a rede. Assim, modificações realizadas nas alternativas de transporte público, ao serem percebidas pelo usuário, fazem com que o mesmo reveja sua decisão em relação à viagem. Outro aspecto da escolha diz respeito ao período em que a viagem será realizada e o motivo da viagem. Embora, neste trabalho a demanda não seja desagregada, por exemplo, em termos de motivo da viagem, é importante ressaltar que viagens a compras ou a lazer, em princípio, são bastante elásticas com respeito ao tempo de viagem, ao contrário das viagens realizadas a trabalho ou à escola.

Entretanto, não é somente o atributo tempo de viagem que é considerado pelo usuário em seu processo de escolha. Outros fatores, como por exemplo, disponibilidade de estacionamentos, também interferem na decisão tomada pelo

usuário, e precisam ser representados no modelo. Considerando que a ênfase do modelo desenvolvido não é o estudo da demanda e da oferta de estacionamentos, o nível de detalhe correspondente à representação deste aspecto na rede se restringe à inclusão de um *link* que conecta o local de estacionamento com o destino final da viagem. A este *link* é associado o valor médio a ser pago pelo usuário pelo uso do estacionamento (parte do custo da viagem) e um tempo de deslocamento a pé até o destino final da viagem.

Uma questão a ser abordada é a determinação do ponto de equilíbrio do usuário.<sup>19</sup> É importante salientar que melhorias no sistema alteram este ponto de equilíbrio. Por exemplo, na medida que se melhoram os meios de transporte públicos, a demanda pelo modal privado é reduzida, e vice-versa. Este mecanismo pode ser explicado pelos modelos de equilíbrio em redes de transporte.

Neste trabalho, uma situação de equilíbrio diz respeito à distribuição da demanda total de passageiros por modal. Essa distribuição se modifica face aos valores dos atributos que o usuário leva em consideração na escolha do modal que são influenciados a cada mudança de política da empresa executora de transporte público no que diz respeito à oferta de serviços definida pelas variáveis de decisão da empresa (tarifa e frequência das viagens). A outra situação de equilíbrio diz respeito à empresa, quando esta não consegue mais melhorar sua solução, e conseqüentemente aumentar seu lucro, modificando os valores de suas variáveis de decisão. O modelo proposto atendendo aos objetivos fixados no Capítulo 1 e destinado a resolver o problema caracterizado no Capítulo 2, se apresentará com um modelo de equilíbrio composto por dois sub-modelos: um de distribuição de viagem e o outro de maximização de lucro.

---

<sup>19</sup> O conceito de “Equilíbrio do Usuário” difere do conceito de “Ótimo do Sistema”. Os modelos de equilíbrio do usuário preocupam-se com o comportamento racional dos usuários quando viajando sobre uma rede de transporte. Tem-se aceito que os usuários comportam-se de uma maneira tal que “custos” de viagem são não cooperativamente minimizados. Todavia, segundo **Fernandez and Friesz (1983)**, é fato bem conhecido que no caso de transporte, dada a existência de “*congestion externalities*”, ótimo do usuário e ótimo do sistema não coincidem [ver exemplo em **Mohring (1976)**]. Esta situação levou **Wardrop (1952)** a formular o segundo princípio de equilíbrio, denominado de “Lei do Equilíbrio do Sistema” a qual afirma que: “No equilíbrio, o tempo de viagem médio é mínimo”. Segundo **Fernandez and Friesz (1983)**, um padrão de fluxo que satisfaz esta lei minimiza o custo total de operação da rede ou sistema como um todo e, por isso, tem o apelo de ser o mais eficiente padrão de fluxo para a sociedade. Tal padrão é geralmente conhecido como um padrão de fluxo otimizado do sistema. Segundo estes autores, este equilíbrio de tráfego do sistema é um desejo idealizado que não irá ser observado na prática a menos que seja introduzida cooperação entre os usuários ou, que é equivalente ao estabelecimento de uma autoridade central com poder para modificar escolhas de rota dos indivíduos.

O modelo de equilíbrio de **Florian (1977)** [ver Capítulo 4] e a técnica de Preferência Declarada [ver Anexo 1] serão usados neste trabalho com um propósito específico. No caso, o modelo de **Florian**, sendo um modelo de equilíbrio de tráfego envolvendo o transporte público e o transporte privado, será utilizado, com algumas modificações, para elaboração do primeiro sub-modelo, que busca uma solução para o equilíbrio do usuário em termos da distribuição dos fluxos de passageiros por modal e rota. A técnica de Preferência Declarada, como já foi dito anteriormente, será usada, neste contexto, com o propósito de modelar o comportamento de escolha modal, usando, para tanto, um modelo *Logit-Multinomial*.<sup>20</sup>

No primeiro sub-modelo, de distribuição de viagem, onde se busca o equilíbrio do usuário, é utilizada a primeira classe de estrutura para representação da distribuição da demanda por modal, sugerida por **Florian**, que demonstra a consistência da mesma no cálculo dos fluxos de equilíbrio.

A hipótese comportamental de **Wardrop (1952)**, como já mencionado anteriormente no Capítulo 4, diz que o tráfego entre origens e destinos irá tender a se estabilizar em um estado (de equilíbrio) onde nenhum motorista pode reduzir seu tempo de viagem por escolha de uma nova rota. Derivadas as condições de **Kuhn-Tucker** do problema de equilíbrio de tráfego na expressão (4.17) apresentada por **Florian**, saem as condições necessárias para que a solução deste problema seja considerada uma solução de mínimo, ou seja, aquelas condições idênticas às que se observa no ponto de equilíbrio.<sup>21</sup> Neste ponto de equilíbrio nenhum usuário pode, por atitude unilateral, melhorar seu desempenho na rede: um usuário pode ter várias

---

<sup>20</sup> Segundo **Bhat (1998)**, a modelagem da escolha de modo de viagem é uma componente importante em análise de demanda de viagem urbana e interurbana. Ele formula um modelo de escolha de modal para viagem baseado no modelo *logit-multinomial* que acomoda variações nas respostas dos indivíduos para medidas de nível de serviço devido às características observadas e não observadas dos indivíduos. Ainda, segundo o autor, modelos de escolha fornecem a ferramenta para empreender uma avaliação *a priori* das respostas de estratégias alternativas de alívio de tráfego por estimar as mudanças na divisão modal em resposta a tais estratégias. Estimativa precisa dos desdobramentos de partes entre modais – divisão modal – requer o desenvolvimento de modelos que incluam variáveis sensíveis a políticas e que capturem diferenças em preferências intrínsecas e diferenças em sensibilidade a mudanças de nível de serviço entre os indivíduos na população. Ainda, segundo este autor, a utilidade que um indivíduo associa a um modal pode ser vista comprometida com duas componentes da perspectiva de um analista de demanda de viagem. A primeira componente é a propensão intrínseca do indivíduo acerca do modal devido a fatores observados e não observados (para o analista) do indivíduo (tais como: sexo, estilo de vida e cultura) e a avaliação dos indivíduos das características não observadas (para o analista) do modal (tais como: conforto e privacidade). A segunda componente é a utilidade que o indivíduo deriva das características observadas (para o analista) do nível de serviço oferecido pelo modal.

<sup>21</sup> Segundo **Fernandez and Friesz (1983)**, depois de definido o que se entende por equilíbrio é que se indaga sobre a existência e unicidade da solução de equilíbrio. E a existência e unicidade da solução de equilíbrio de um modelo podem ser mostradas relativamente fácil se a formulação matemática do modelo envolve uma função convexa. Estes autores afirmam, também, que **Fisk and Nguyen (1981)** demonstraram a existência e unicidade para o particular modelo de Florian (1977) por condições muito similares aquelas desenvolvidas por **Aashtiani and Magnanti (1981)** para o caso geral.

alternativas para ir de um ponto ao outro, mas se este usuário escolhe ir por um caminho  $k$  é porque para ele este é o menor caminho e se ele, isoladamente, tentar ir por um outro caminho, o tempo de viagem irá aumentar, fazendo com que o mesmo volte a usar o caminho original, pois sua decisão (unilateral) de troca de rota não o levou a uma solução melhor. E para problemas que descrevem tal situação, bons algoritmos têm sido capazes de tratar uma grande variedade destes problemas na prática. Em tais modelos, os preditos fluxos dos arcos e impedâncias de viagem reproduzem satisfatoriamente os reais fluxos dos arcos e impedâncias de viagem. O modelo desenvolvido por **Florian**, por exemplo, apresenta um algoritmo que calcula os fluxos de equilíbrio de maneira consistente. Algumas partes deste algoritmo podem ser aproveitadas para elaboração do algoritmo para o primeiro sub-modelo proposto neste trabalho.

O tempo de viagem num trecho, ou arco da rede, varia de acordo com o fluxo neste arco, isto é, o tempo de viagem no arco é uma função do fluxo. Se não existir fluxo no arco consegue-se viajar a velocidade máxima permitida e o tempo de viagem será mínimo. Na medida que aumenta o fluxo, começa a haver uma interação entre os veículos, de modo a não ser mais possível que os veículos trafeguem nas condições de fluxo livre. À medida que o fluxo aumenta, os usuários terão que reduzir sua velocidade, aumentando, com isto, o tempo de viagem. Uma das funções de performance mais simples que pode ser apresentada é aquela que está baseada apenas no tempo de viagem, como a mostrada a seguir:

$$t_a(v_a) = t_a^0 \left[ 1 + \lambda \left( \frac{v_a}{c_a} \right)^\pi \right]$$

isto é, uma função de performance expressa pelo tempo de viagem,  $t_a$ , é uma função  $t_a(v_a)$ , onde  $v_a$  é o fluxo no arco  $a$ ,  $c_a$  representa a capacidade nominal do arco  $a$ , e  $t_a^0$  é o tempo de fluxo livre no arco  $a$ .

Na prática, a situação é mais complexa, envolvendo outros fatores relevantes além do tempo de viagem, tais como: tempo de viagem, tempo de espera, custo da viagem, o nível de conforto, tempo de deslocamento a pé, entre outros.<sup>22</sup> Tais fatores ou atributos são importantes para os usuários na etapa de escolha de um

modal para realização da viagem, e devem ser considerados no primeiro sub-modelo.

Considere-se o quadro a seguir onde são apresentadas duas alternativas hipotéticas com seus respectivos níveis de atributos.

<b>Atributos</b> →	Tempo de viagem	Percurso a pé	Custo da viagem	Conforto
Alternativas ↓				
A <sub>1</sub> (modal público)	30 min.	500 m	50,00	C1
A <sub>2</sub> (modal privado)	15 min.	100 m	300,00	C2

Neste quadro, o custo da viagem está agregado, representando o preço do estacionamento e o gasto com combustível para o modal privado; para o modal público, o custo é simplesmente o valor da tarifa. Os níveis de conforto **C1** e **C2** poderiam representar, respectivamente: **C1 = sem conforto** (passageiros em pé); e **C2 = com conforto** (nenhum passageiro em pé). Baseado neste quadro hipotético, deve-se considerar se os usuários estariam dispostos a pagar 300,00 por mês com o transporte para ter o nível de conforto **C2**, com menor tempo de viagem e menor deslocamento a pé. A população de usuários irá se distribuir em função das suas escolhas. Se a população de usuários for dividida em várias classes, e a elas forem apresentadas estas duas alternativas, é possível que as escolhas realizadas em cada classe sejam diferentes. Pode acontecer, por exemplo, que uma dada classe de usuários opte preponderantemente pela alternativa **A<sub>1</sub>**, dado o elevado custo da alternativa **A<sub>2</sub>**. Já em outra classe de usuários é possível que a escolha preponderante seja pela alternativa **A<sub>2</sub>**. Neste processo de escolha, cada usuário faz “ponderações” sobre os valores dos níveis dos atributos de cada alternativa e com base nestes valores faz sua escolha. A frequência com que cada alternativa é escolhida pode ser determinada com base em um modelo de distribuição de probabilidade *Logit*. Com base neste modelo, um determinado usuário (ou uma determinada classe de usuários) apresenta pesos distintos para cada um dos atributos, e conseqüentemente utilidades diferentes para cada uma das alternativas. Por exemplo, supondo que a alternativa **A<sub>1</sub>** tenha utilidade igual a 5,0 e a alternativa

<sup>22</sup> Neste sentido, a função de performance poderá ser definida por uma função utilidade (ou desutilidade) a qual poderá ser ajustada através de métodos de Preferência Declarada.

$A_2$  igual a 4,0, para uma determinada classe de usuários, neste caso, em sendo a utilidade da alternativa  $A_1$  maior do que a utilidade da alternativa  $A_2$ , haverá a tendência da probabilidade de escolha da alternativa  $A_1$  ser maior do que a probabilidade de escolha da alternativa  $A_2$ . Como já mencionado anteriormente, quando se aplica um modelo do tipo *Logit*, por exemplo, tem-se uma repartição da demanda<sup>23,24</sup> em termos das utilidades das alternativas. Considerando, como acima, que a alternativa  $A_1$  apresenta maior utilidade, haverá uma tendência de que uma maior quantidade de usuários opte por esta alternativa. Em sendo assim, o tempo de viagem neste modal deverá aumentar em função do maior movimento de embarque/desembarque, e também do aumento do número de paradas que o modal  $A_1$  (público) irá apresentar. Além disso, o nível de conforto tenderá a sofrer uma piora, tendo em vista a superlotação. Esta piora nos níveis de serviços da alternativa  $A_1$ , fará com que alguns dos usuários que fizeram esta opção voltem à alternativa  $A_2$ . Haverá um instante em que os usuários se posicionam indiferentes à escolha destas alternativas (de modal e/ou de rota), o que, através deste outro exemplo, caracteriza o equilíbrio do usuário.

Uma questão a ser considerada é que uma vez escolhido o modal privado, a trajetória é sempre pelo caminho mais curto. Considerando o exposto através dos exemplos de problemas de equilíbrio apresentados no Apêndice 1, parte do problema caracterizado no Capítulo 2, no que se refere ao equilíbrio do usuário, se parece com o modelo de equilíbrio de tráfego de **Florian (1977)** que trata da interação entre os modais automóvel e ônibus. Entretanto, em seu modelo, o qual é apenas um modelo de equilíbrio de tráfego, **Florian** somente explicita a questão do tempo associado ao deslocamento, fator relevante na escolha de modal e/ou de rota: autor se preocupa apenas com o fluxo de veículos e com o equilíbrio do usuário em termos de tempos de viagens nos arcos. No modelo de **Florian**, a preocupação é usar o modelo *logit* para fazer a divisão modal tal qual é proposto neste trabalho.

---

<sup>23</sup> A demanda pode ser caracterizada por um período curto, por exemplo, no período de pico da manhã, onde se tem um determinado perfil de deslocamento. Em cada um destes períodos pode-se observar o número de usuários que efetuam deslocamentos entre cada par origem (O) e destino (D). Tais valores poderão ser distribuídos na forma de uma matriz, denominada matriz O-D.

<sup>24</sup> **Bierlaire (1997)** considera dois aspectos de modelagem da demanda. Ambos são pensados para reproduzirem dados observados, bem como estimados, mas diferem nas suposições subjacentes e estruturas. Os modelos origem-destino representam demanda de transporte através de matrizes, contendo, para cada par origem-destino (O-D), o número de indivíduos que fazem suas viagens particulares. Já, os modelos "escolha-orientada" consideram demanda de transporte como uma seqüência de escolhas feitas pelos viajantes: escolha de atividade, escolha de destino, escolha de meio de transporte,

Com respeito ao modelo proposto neste trabalho, os fluxos obtidos no primeiro sub-modelo (de distribuição de vigem) são alocados aos arcos, e assim podem-se calcular os tempos de viagem no modal privado, em cada arco, através das funções de performance, as quais devem ser calibradas adequadamente com os dados da rede considerando a capacidade e os tempos de fluxo livre. A estes tempos de viagem, para os modais público convencional e executivo, são acrescidos os tempos de parada, embarque e desembarque. No primeiro sub-modelo, os valores iniciais dos tempos de viagem (estimados) de cada modal são atualizados pelos valores de tempos de viagem calculados, através das funções de performance, levando em consideração a divisão modal realizada e a conseqüente redistribuição dos fluxos nos arcos. Este processo de atualização dos tempos de viagem é realizado de forma iterativa, até que, entre duas iterações consecutivas, a diferenças entre os tempos de viagem sejam consideradas suficientemente pequenas, caracterizando, então a convergência para o ponto de equilíbrio do usuário. Neste trabalho, o fluxo de passageiros por modal influenciará no tempo de viagem no modal público em função do número de embarques e desembarques de passageiros, enquanto que o fluxo de veículos alocados à rede serve para o cálculo do tempo de viagem no arco com o modal privado. Além do mais, o fluxo de passageiros por modal tem implicação no cálculo da receita obtida pela empresa que opera os modais público convencional e executivo – este cálculo é feito através do segundo sub-modelo discutido a seguir.

Se por um lado, o primeiro sub-modelo analisa o sistema de transporte sob a ótica do usuário, visando explicar o seu comportamento (processo decisório), neste segundo sub-modelo, o foco é o processo de decisão do operador, considerando possíveis formas de desregulamentação do sistema de transporte por ele operado. Como já foi dito anteriormente, considera-se um sistema de transporte público, onde uma empresa opera com dois modais: público convencional e público executivo. Esta desregulamentação poderá ser realizada de forma parcial ou total dependendo da política pública estabelecida. No caso de uma desregulamentação total, por exemplo, poderá ser dada à empresa a liberdade de definir preços e níveis de serviço (frequência de viagem) tanto para o modal público convencional como também para o modal público executivo. No caso de uma desregulamentação parcial

---

etc. A abordagem deste autor enfoca um dos mais amplamente usados modelos de escolha, o modelo *logit*, e sob sua generalização, o *modelo "logit"* hierárquico.

do sistema, eventualmente à empresa operadora poderá ser dada a liberdade de apenas definir os parâmetros de operação do modal público executivo, mantendo o modal público convencional sob o controle rígido do poder público, já que se trata de uma alternativa com características essencialmente sociais. Em função da desregulamentação, seja ela parcial ou total, a empresa operadora passa a contar com um grau de liberdade antes não existindo. Segundo esta liberdade, a empresa buscará formas de aumentar a sua eficiência, medida através de uma função de lucro. Qualquer que seja a forma de desregulamentação adotada pelo poder público, o modelo de planejamento utilizado pela empresa deverá ter variáveis de decisão e restrições que caracterizem o conjunto de políticas viáveis, e que tenha como solução ótima a alternativa de máximo lucro ou desempenho.<sup>25,26</sup> Ao determinar a solução de máximo lucro, a empresa modifica parâmetros que são avaliados pelo usuário em seu processo de decisão. Exemplificando, se a empresa altera o valor da tarifa, ou a frequência de viagem em uma dada linha, o usuário será compelido a modificar sua decisão, escolhendo um novo modal e/ou rota, em função da mudança ocorrida em alguns dos parâmetros do primeiro sub-modelo, que determina o comportamento dos usuários.

Considerando que o perfil da demanda de um dia típico varia de acordo com o período do dia (horário da manhã, horário do meio-dia, horário da noite, períodos de entre pico), a solução de máximo lucro poderá ser especificada para cada período em particular. Esta solução é definida pela tarifa a ser praticada, pela frequência de viagens e, conseqüentemente, pela frota necessária para a realizar esta oferta de serviço. Ao se calcular a solução ótima para cada período típico de demanda, poderá se obter frotas de tamanho variado, o que, para a empresa, é inviável. De fato, o modelo a ser adotado deverá contemplar o dimensionamento de uma frota única que atenda às necessidades de oferta em todos os períodos considerados.

---

<sup>25</sup> Para o poder público, o mesmo sistema poderá apresentar objetivo distinto dos buscados pela empresa. Se por um lado, a empresa busca somente a maximização de lucro, o poder público deverá atuar de modo a garantir um transporte de qualidade com tarifas econômicas ao usuário e justa para a operadora. Embora possam parecer interesses contraditórios, em sistemas nos quais existe competição, o ponto de equilíbrio deverá satisfazer a ambos. Exemplificando, no caso da empresa tentar maximizar seu lucro apenas aumentando tarifas, os usuários, tendo outras alternativas, irão optar por estas. Para manter a demanda, portanto, a empresa operadora deverá oferecer a combinação de preço e nível de serviço para maximizar uma função utilidade conjunta, envolvendo usuário e operadora.

<sup>26</sup> Para uma leitura complementar, o leitor poderá ver no Capítulo 3 (Revisão Bibliográfica 1), de forma resumida, os seguintes trabalhos que tratam da questão do desempenho em transporte público: **Costa (1996)**; **Jimenez (1997)**; **Karlafts et alii (1998)**; e **Lyons (1997)**.



Tendo-se obtidos os fluxos de passageiros transportados pelos respectivos modais, isto é, realizada a distribuição modal através do primeiro sub-modelo, pode-se obter o valor da receita diária total da empresa através do somatório dos produtos dos fluxos alocados na rede de transporte público, pela respectiva tarifa em todos os períodos do dia, considerando os modais público convencional e executivo. Conseqüentemente, o lucro diário total obtido pela empresa será dado pela diferença entre esta receita diária total e o custo diário total. Este custo é a soma do custo variável referente à quilometragem percorrida pelo modal público, e o custo fixo referente à depreciação e à remuneração do capital investido na frota.

Para o modelo proposto, será apresentado um algoritmo iterativo entre os dois sub-modelos mencionados, com os resultados de um sub-modelo sendo usados como parâmetros do outro.

Com base no exposto até aqui, é apresentada, a seguir, a formulação matemática do modelo de planejamento de oferta de serviços de um sistema de transporte público multimodal, proposto neste trabalho.

### 5.3 Formulação matemática do modelo

O modelo de equilíbrio em questão compreende dois sub-modelos, onde o primeiro sub-modelo é utilizado na distribuição de viagens e o segundo na maximização de lucro da empresa operadora.

Nestes sub-modelos consideram-se os conjuntos, conforme notação apresentada a seguir:

- $m = 1, \dots, 3$  índice do conjunto de modais;
- $p = 1, \dots, P$  índice do conjunto de períodos típicos de demanda nos quais é dividido um dia de trabalho;
- $a = (r, s)$  índice do conjunto de arcos que compõe a rede de transporte; cada arco da rede conecta um par de nós, aqui designados genericamente por  $(r, s)$ ;

$i = 1, \dots, 5$  índice do conjunto de atributos considerados pelo usuário na determinação da escolha modal.

Na notação acima,  $m = 1$ ,  $m = 2$  e  $m = 3$  representam, respectivamente, o modal privado, modal público convencional e modal público executivo, enquanto que  $i = 1$ ,  $i = 2$ ,  $i = 3$ ,  $i = 4$  e  $i = 5$  representam, respectivamente, os atributos deslocamento à pé, tempo de viagem no modal, tempo de espera, custo e conforto.

A seguir são apresentados detalhes da formulação matemática destes dois sub-modelos.

### 5.3.1 Sub-modelo de distribuição de viagens.

Este modelo é definido com base em um conjunto de parâmetros, variáveis e equações, conforme apresentado a seguir:

#### Parâmetros

- $q_p^{rs}$  demanda total de usuários no  $p$ -ésimo período entre o par O-D definido por  $r, s$ ;
- $\delta_{a,m}^{rs}$  relação de incidência entre o arco  $a$  e o modal  $m$  que conecta o par O-D definido por  $r, s$ ;
- $\Delta T_p$  duração do período  $p$ ;
- $t_a^{min}$  tempo de fluxo livre em um arco da rede viária, percorrido pelo modal privado;
- $C_a$  capacidade nominal da via representada pelo arco  $a$ ;
- $\lambda_a, \pi_a$  parâmetros de ajuste do modelo de cálculo do tempo de viagem no arco  $a$ ; (ver Apêndice 2).
- $\alpha_m$  tempo médio de embarque e desembarque de um usuário do modal  $m$ ;
- $\beta_i$   $i$ -ésimo coeficiente da função utilidade ajustada para os diversos atributos considerados pelo usuário na determinação da escolha modal (veja Anexo 1 para maiores detalhes sobre a estimação destes parâmetros através de Técnicas de Preferência Declarada);

$N_{m,p}^{rs}$  número de viagens realizadas no período  $p$  entre o par O-D definido por  $r,s$  pelo modal  $m$ ; este parâmetro é considerado como variável exógena neste modelo, sendo calculado através do modelo de maximização do lucro da operadora.

### Variáveis

- $U_{m,p}^{rs}$  utilidade da alternativa de viagem definida pelo modal  $m$ , no período  $p$ , entre os pares O-D definidos por  $r,s$ ;
- $a_{m,p,i}^{rs}$   $i$ -ésimo atributo da alternativa de viagem definida pelo modal  $m$ , no período  $p$ , entre os pares O-D definidos por  $r,s$ ;
- $f_{m,p}^{rs}$  fluxo de usuários no modal  $m$ , no período  $p$ , entre o par O-D definido por  $r,s$ ;
- $x_{a,p}$  fluxo de usuários no arco  $a$ , no período  $p$ ;
- $t_{a,p}$  tempo de viagem gasto para transportar o arco  $a$ , no período  $p$ ;
- $t_{m,p}^{rs}$  tempo de viagem gasto pelo modal  $m$ , no período  $p$ , para realizar o caminho entre o par O-D definido por  $r,s$ .

### Equações

$$U_{m,p}^{rs} = \sum_{i=1}^5 \beta_i \cdot a_{m,p,i}^{rs} \quad (5.1)$$

$$f_{m,p}^{rs} = q_p^{rs} \frac{e^{U_{m,p}^{rs}}}{\sum_{k=1}^3 e^{U_{k,p}^{rs}}} \quad (5.2)$$

$$x_{a,p} = \sum_{rs} \sum_m f_{m,p}^{rs} \cdot \delta_{a,m}^{rs} \quad (5.3)$$

$$t_{a,p} = t_a^{\min} \left[ 1 + \lambda_a \frac{x_{a,p}}{C_a} \right]^{\pi_a} \quad (5.4)$$

$$t_{m,p}^{rs} = \sum_a t_{a,p} \cdot \delta_{a,m}^{rs} + \alpha_m \left[ \frac{f_{m,p}^{rs}}{N_{m,p}^{rs}} \right] \quad (5.5)$$

As equações (5.1) a (5.5) correspondem ao modelo de distribuição de viagens, baseado no modelo *logit multinomial*. Mais precisamente, (5.1) calcula as

utilidades de cada modal, em cada período e par O-D. A expressão (5.2) determina os fluxos a serem distribuídos nos diversos modais, para cada par O-D, em cada período. Estes fluxos são alocados aos arcos pela expressão (5.3) e são utilizados para calcular os tempos de viagem em cada arco usando a expressão (5.4). Finalmente, os tempos de viagem para cada modal e par O-D são obtidos pela expressão (5.5).

No modelo acima, um dos atributos ( $i = 2$ ) utilizados pelo usuário na escolha do modal é o tempo de viagem correspondente ao deslocamento entre o par origem destino, isto é:

$$a_{m,p,2}^{rs} = t_{m,p}^{rs} \quad (5.6)$$

O modelo inicia considerando uma estimativa deste tempo, e busca melhorar a mesma através de um procedimento iterativo. Enquanto o erro apurado em cada iteração não for satisfatório, uma nova estimativa é considerada fazendo:

$$a_{m,p,2}^{rs} \leftarrow \frac{a_{m,p,2}^{rs} + t_{m,p}^{rs}}{2} \quad (5.7)$$

### 5.3.2 Sub-modelo de maximização de lucro da operadora.

Este sub-modelo é definido com base nos seguintes parâmetros e variáveis:

#### Parâmetros

- $q_p^{rs}$  demanda total de usuários no  $p$ -ésimo período entre o par O-D definido por  $r, s$ ;
- $\Delta T_p$  duração do período  $p$ ;
- $t_{m,p}^{rs}$  tempo de viagem gasto pelo modal  $m$ , no período  $p$ , para realizar o caminho entre o par O-D definido por  $r, s$ ; este parâmetro é considerado exógeno a este modelo, sendo calculado através do modelo de distribuição de viagens;
- $CV_m$  custo variável de operação em R\$/km dos modais  $m = 2$  e  $m = 3$ ;

- $CF_m$  custo fixo (depreciação + remuneração do capital) em R\$/dia dos modais  $m = 2$  e  $m = 3$  ;
- $d^{rs}$  distância em quilômetros , para realizar o caminho entre o par O-D definido por  $r, s$  ;
- $Cap_m$  capacidade do veículo que opera no modal  $m = 2$  e  $m = 3$  ,

### Variáveis

- $TR_{m,p}^{rs}$  tarifa do modal  $m = 2$  e  $m = 3$  , no período  $p$  ;
- $N_{m,p}^{rs}$  número de viagens realizadas pelo modal  $m = 2$  e  $m = 3$  , no período  $p$  ;
- $NV_m^{rs}$  número de veículos alocados na operação do par O-D definido por  $r, s$  , para o modal  $m = 2$  e  $m = 3$  ;
- $f_{m,p}^{rs}$  fluxo de usuários no modal  $m$  , no período  $p$  , entre o par O-D definido por  $r, s$  ;
- $U_{m,p}^{rs}$  utilidade da alternativa de viagem definida pelo modal  $m$  , no período  $p$  , entre os pares O-D definidos por  $r, s$  ;
- $L$  lucro diário total da empresa operando com os modais  $m = 2$  e  $m = 3$  .

Dados os parâmetros e variáveis discutidos acima, o sub-modelo de maximização de lucro da operadora consiste em:

$$\text{Maximize: } L = \sum_{rs} \sum_{m=2}^3 \sum_p f_{m,p}^{rs} \cdot TR_{m,p}^{rs} - \sum_{rs} \sum_{m=2}^3 \sum_p CV_m \cdot d^{rs} \cdot N_{m,p}^{rs} - \sum_{rs} \sum_{m=2}^3 CF_m \cdot NV_m^{rs} \quad (5.8)$$

Sujeito à:

$$Cap_m \cdot N_{m,p}^{rs} \geq \sum_{rs} f_{m,p}^{rs} \cdot \delta_{a,m}^{rs} \quad \forall p, a \quad \forall m = 2, 3 \quad (5.9)$$

$$NV_m^{rs} \geq \frac{2 \cdot t_{m,p}^{rs} \cdot N_{m,p}^{rs}}{\Delta T_p} \quad \forall p, rs \quad \forall m = 2, 3 \quad (5.10)$$

$$U_{m,p}^{rs} = \sum_{i=1}^5 \beta_i \cdot a_{m,p,i}^{rs} \quad \forall m, p, rs \quad (5.11)$$

$$f_{m,p}^{rs} = q_p^{rs} \frac{e^{U_{m,p}^{rs}}}{\sum_{k=1}^3 e^{U_{k,p}^{rs}}} \quad \forall m, p, rs \quad (5.12)$$

$$f_{m,p}^{rs} \geq 0, \quad TR_{m,p}^{rs} \geq 0, \quad N_{m,p}^{rs} \in \mathbf{N} \quad \text{e} \quad NV_m^{rs} \in \mathbf{N} \quad \forall m, p, rs \quad (5.13)$$

As equações (5.8) a (5.13) formam o modelo de maximização de lucro. Mais precisamente, (5.8) é a função objetivo do problema de maximização, a qual é uma função não linear nas variáveis  $TR_{m,p}^{rs}$ ,  $N_{m,p}^{rs}$ ,  $NV_m^{rs}$  e  $f_{m,p}^{rs}$ ; a restrição (5.9) assegura que a oferta de lugares nos modais  $m = 2$  e  $m = 3$ , seja suficiente para atender a demanda ou fluxos de passageiros por estes modais ao longo dos trechos ou arcos entre o par O-D definidos por  $r, s$ , em todo período  $p$ ; a restrição (5.10) assegura que o número de veículos dos modais  $m = 2$  e  $m = 3$ , deve ser suficiente para a realização do número de viagens (ida e volta), em cada período  $p$ , entre os pares O-D definidos por  $r, s$ , necessárias para satisfazer certos padrões de serviço; isto é, os tempos de espera nos pontos de ônibus e os tempos de viagem devem satisfazer ao usuário; primeira restrição em (5.13) considera que a e fluxos e tarifa não podem ser negativos, e as demais restrições em (5.13) dizem que as variáveis  $N_{m,p}^{rs}$  e  $NV_m^{rs}$  são inteiras e positivas, isto é, seus valores pertencem ao conjunto dos números naturais  $\mathbf{N}$ . No modelo acima, note-se que as expressões (5.11) e (5.12) voltam a aparecer; contudo, neste caso, são considerados constantes os atributos de tempo de viagem, tempo de espera, conforto dos modais e deslocamento a pé, ficando a utilidade como função apenas da tarifa.

O índice  $p$  da variável  $TR_{m,p}^{rs}$  possibilita ao modelo testar cenários onde a tarifa do modal público executivo  $m = 3$  variaria ao longo dos períodos ao invés de ser fixa como é o de costume. Embora  $TR_{2,p}^{rs}$  figure no modelo como uma variável, seu valor é mantido fixo para todos os períodos  $p$ , porque representa a tarifa social do modal público convencional. A função objetivo em (5.8) expressa o lucro diário total “ $L$ ” da empresa de transporte operando com dois modais públicos (ônibus)  $m = 2$  e  $m = 3$ , como uma função das variáveis de decisão da empresa operadora:  $TR_{m,p}^{rs}$ ,  $N_{m,p}^{rs}$  e  $NV_m^{rs}$ . A primeira parcela na função objetivo em (5.8) corresponde a receita diária total da empresa, operando com os dois modais  $m = 2$  e  $m = 3$ , obtida pelo somatório dos produtos dos fluxos ou número de passageiros transportados nas viagens de ida e volta pela respectiva tarifa do modal, considerando os trechos ou arcos entre os pares O-D definidos por  $r, s$  e em todos os períodos  $p$  do dia; a

segunda parcela na função objetivo corresponde ao custo variável diário total de operação em R\$/km com os modais  $m = 2$  e  $m = 3$ ; e finalmente, a terceira parcela na função objetivo corresponde ao custo fixo diário total de depreciação e remuneração do capital em R\$/dia com os modais  $m = 2$  e  $m = 3$ .

#### 5.4 Algoritmo proposto

Para resolver este problema de Programação Não Linear o qual envolve variável do tipo real e também inteira, utiliza-se o método “*Branch and Bound*” [ver, por exemplo, **Land and Doig (1960)**].

É apresentado a seguir, o algoritmo para o modelo de planejamento de oferta de serviços de um sistema de transporte público multimodal composto pelos dois sub-modelos considerados.

**Passo 0.** Ler os dados de entrada de ambos os sub-modelos, conforme descrição dos parâmetros apresentados;

**Passo 1.** Calcular as utilidades de cada modal, em cada período e par O-D:

$$U_{m,p}^{rs} = \sum_{i=1}^5 \beta_i \cdot a_{m,p,i}^{rs} \quad \forall m, p, rs$$

**Passo 2.** Determinar os fluxos a serem distribuídos nos diversos modais, para cada par O-D, em cada período, com base no modelo “*Logit*”:

$$f_{m,p}^{rs} = q_p^{rs} \frac{e^{U_{m,p}^{rs}}}{\sum_{k=1}^3 e^{U_{k,p}^{rs}}} \quad \forall m, p, rs$$

**Passo 3.** Alocar os fluxos aos arcos:

$$x_{a,p} = \sum_{rs} \sum_m f_{m,p}^{rs} \cdot \delta_{a,m}^{rs} \quad \forall a, p$$

**Passo 4.** Calcular os tempos de viagem, em cada arco e período:

$$t_{a,p} = t_a^{\min} \left[ 1 + \lambda_a \frac{x_{a,p}}{C_a} \right]^{\pi_a} \quad \forall a, p$$

**Passo 5.** Calcular os correspondentes tempos de viagem no modal, para cada período e par O-D:

$$t_{m,p}^{rs} = \sum_a t_{a,p} \cdot \delta_{a,m}^{rs} + \alpha_m \left[ \frac{f_{m,p}^{rs}}{N_{m,p}^{rs}} \right] \quad \forall m, p, rs$$

**Passo 6.**

Se

$$\left| \frac{t_{m,p}^{rs} - a_{m,p,2}^{rs}}{a_{m,p,2}^{rs}} \right| < \varepsilon \quad \forall m, p, rs$$

então ir para o Passo 7. Caso contrário, atualizar as estimativas de tempos de viagem dos modais:

$$a_{m,p,2}^{rs} \leftarrow \frac{a_{m,p,2}^{rs} + t_{m,p}^{rs}}{2} \quad \forall m, p, rs$$

e retorne ao Passo 1.

**Passo 7.** Resolver o problema de maximização de lucro:

$$\text{Maximize: } L = \sum_{rs} \sum_{m=2}^3 \sum_p f_{m,p}^{rs} \cdot TR_{m,p}^{rs} - \sum_{rs} \sum_{m=2}^3 \sum_p CV_m \cdot d^{rs} \cdot N_{m,p}^{rs} - \sum_{rs} \sum_{m=2}^3 CF_m \cdot NV_m^{rs}$$

Sujeito à:

$$Cap_m \cdot N_{m,p}^{rs} \geq \sum_{rs} f_{m,p}^{rs} \cdot \delta_{a,m}^{rs} \quad \forall p, a \quad \forall m = 2,3$$

$$NV_m^{rs} \geq \frac{2 \cdot t_{m,p}^{rs} \cdot N_{m,p}^{rs}}{\Delta T_p} \quad \forall p, rs \quad \forall m = 2,3$$

$$U_{m,p}^{rs} = \sum_{i=1}^5 \beta_i \cdot a_{m,p,i}^{rs} \quad \forall m, p, rs$$

$$f_{m,p}^{rs} = q_p^{rs} \frac{e^{U_{m,p}^{rs}}}{\sum_{k=1}^3 e^{U_{k,p}^{rs}}} \quad \forall m, p, rs$$

$$f_{m,p}^{rs} \geq 0, \quad TR_{m,p}^{rs} \geq 0, \quad N_{m,p}^{rs} \in \mathbf{N} \quad \text{e} \quad NV_m^{rs} \in \mathbf{N} \quad \forall m, p, rs$$

**Passo 8.**

Se,

$$|L_k - L_{k-1}| < \hat{\varepsilon}, \text{ para a } k\text{-ésima e } (k-1)\text{-ésima iteração, ir para o Passo 9. Caso}$$

contrário, retorne ao Passo 1.



**Passo 9.** Apresentar os resultados:

$L$

$TR_{m,p}^{rs}$  , para cada modal  $m = 2$  e  $m = 3$ ; e para todo período  $p$ ; e par O-D;

$N_{m,p}^{rs}$  , para cada modal  $m = 2$  e  $m = 3$ ; e para todo período  $p$ ; e par O-D;

$NV_m^{rs}$  , para cada modal  $m = 2$  e  $m = 3$ ; e para todo período  $p$ ; e par O-D.

### 5.5 Considerações sobre o modelo

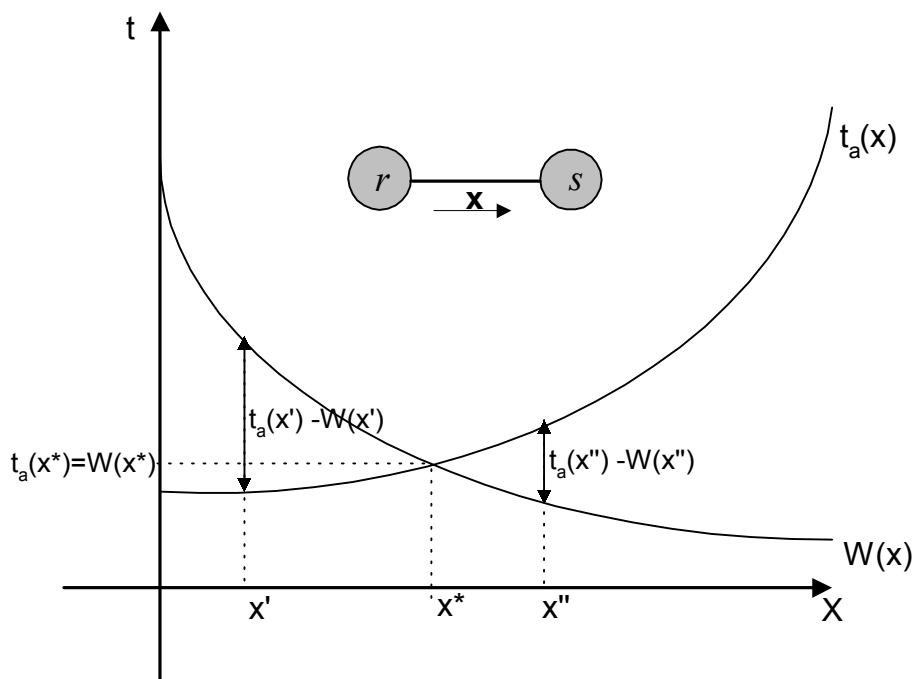
No primeiro sub-modelo, são calculadas as utilidades das alternativas de viagem ou modal em cada período e em cada par origem e destino O-D usando dados ou estimativas iniciais dos atributos: distância percorrida a pé pelo usuário desde o estacionamento ou desde o terminal de ônibus até o destino final da viagem; conforto dos modais; custo da viagem (tarifa do modal público e para o modal privado o custo com combustível inclui-se, ainda, o preço do estacionamento); tempo de viagem no modal; tempo de espera no ponto de embarque. São determinados os fluxos de passageiros nos arcos (trechos) da rede como uma proporção da demanda total de passageiros do modal público mais o modal privado a serem distribuídos nos diversos modais, para cada par O-D, em cada período, com base no modelo “*Logit*”. Estes fluxos são alocados aos arcos da rede a partir do que re-calculam-se os tempos de viagem em cada arco e em cada período, através das funções de performance. Finalmente, são calculados os correspondentes tempos de viagem de cada modal, em cada período e par O-D, a partir dos tempos de viagem nos arcos, acrescidos dos tempos de embarque e desembarque. Se a diferença entre as estimativas dos tempos de viagem no modal e os correspondentes valores dos tempos de viagem calculados em função dos fluxos for suficientemente pequena, para todo modal e para todo período, então a solução de equilíbrio no primeiro sub-modelo foi determinada. A seguir, o algoritmo resolver o problema de maximização de lucro da operadora representado pelo segundo sub-modelo. Caso esta diferença entre os tempos de viagem estimados e os calculados não seja suficientemente pequena para algum período ou modal, então se atualizam os tempos de viagem tomando-se o valor médio destas duas estimativas.

A partir destes fluxos distribuídos através do primeiro sub-modelo, nos diversos períodos do dia e nos diversos trechos da rede, para os modais público

convencional e executivo, é possível calcular, através do segundo sub-modelo, a receita diária total. Esta receita é o somatório dos produtos dos fluxos de passageiros nos modais públicos pela tarifa cobrada por cada um destes dois modais considerando-se todos os períodos do dia. Obtém-se o custo variável diário total de operação em R\$/km em função da frequência ou número de viagens realizadas, considerando-se os dois modais público convencional e executivo, em todos os períodos do dia. Obtém-se, também, o custo fixo total de depreciação e remuneração do capital em R\$/dia dos modais público convencional e executivo. Portanto, o lucro diário total da empresa é a diferença entre a receita e estes custos envolvidos.

No Passo 6 do algoritmo, a condição  $\left| \frac{t_{m,p}^{rs} - a_{m,p,2}^{rs}}{a_{m,p,2}^{rs}} \right| < \varepsilon$  não é apenas um critério

de parada. Pode ser mostrado que minimizar essa diferença em valor absoluto é equivalente a minimizar a diferença entre as integrais que aparece na expressão (4.17) no modelo de **Florian (1977)**. Para isso, considere-se o caso mais simples onde se tem apenas um arco conectando uma única origem  $r$  e um único destino  $s$ , como mostra o gráfico a seguir.



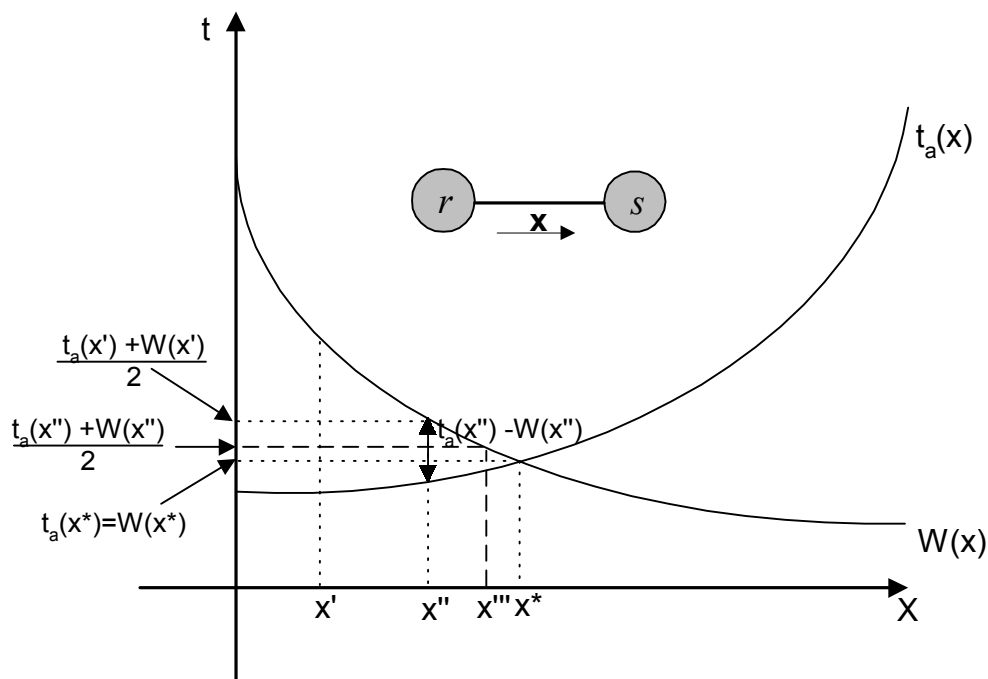
Considerando a área entre as duas curvas, **Sheffi (1985, páginas 136 a 138)** mostra que o ponto de equilíbrio (ou que minimiza a diferença entre as integrais no problema de equilíbrio) corresponde ao fluxo  $x^*$ . Note-se que para  $x=x^*$ , tem  $t_a(x^*) =$

$W(x^*)$ , onde  $W$  é o inverso da função de demanda  $f_{m,p}^{rs} = q_p^{rs} \frac{e^{U_{m,p}^{rs}}}{\sum_{k=1}^3 e^{U_{k,p}^{rs}}}$  que aparece na expressão 5.12. Esta função depende dos valores dos atributos que compõem as utilidades  $U_{m,p}^{rs}$ , em particular do valor do atributo “tempo de viagem  $a_{m,p,2}^{rs}$ ” estimado pelo usuário. Se por um lado,  $t_a(x)$  representa o tempo de viagem no modal  $t_{m,p}^{rs}$  calculado pela função de performance, de outro lado, a função  $W(x)$  representa  $a_{m,p,2}^{rs}$ . À medida que  $x$  se aproxima de  $x^*$ , isto é,  $x' \rightarrow x^*$  e/ou  $x'' \rightarrow x^*$ , respectivamente, as diferenças  $t_a(x') - W(x')$  e/ou  $t_a(x'') - W(x'')$  tendem a zero.

No Passo 6, se a diferença entre os tempos de viagens mencionados acima não for suficientemente pequena, então é feita a atualização das estimativas de tempos de viagem dos modais:

$$a_{m,p,2}^{rs} \leftarrow \frac{a_{m,p,2}^{rs} + t_{m,p}^{rs}}{2} \quad \forall m, p, rs$$

Este procedimento de tomar a média entre os tempos permite acelerar o processo de convergência do algoritmo, como pode ser observado no gráfico a seguir.



Se a diferença  $t_a(x') - W(x')$  em valor absoluto não é suficientemente pequena, então  $[t_a(x') + W(x')]/2$  é a nova solução correspondendo um fluxo  $x''$ , onde numa iteração seguinte é avaliado o valor absoluto da diferença  $t_a(x'') - W(x'')$  e caso esta diferença

não seja ainda suficientemente pequena, o valor do tempo de viagem é atualizado tomando-se o valor  $[t_a(x'') + W(x'')]/2$  o qual corresponde a um valor de  $x=x''$  mais próximo de  $x^*$ , e assim por diante.

Considerando-se algumas condições<sup>27</sup> as quais não aparecem explícitas no algoritmo, o processo iterativo em ambos os sub-modelos<sup>28</sup> prossegue até a convergência para um ponto de equilíbrio, onde é encontrada a melhor solução possível no problema de maximização de lucro no segundo sub-modelo, e com as diferenças nos tempos de viagem no primeiro sub-modelo sendo suficientemente pequenas. Quando isto acontece, é atingido o ponto de equilíbrio que se busca neste problema.

## 5.6 Etapas para aplicação do modelo

Para a aplicação do modelo proposto é necessário o desenvolvimento das seguintes atividades.

- I) Configuração da rede: Esta etapa consiste na obtenção de dados para a especificação dos nós, centróides e arcos da rede de transporte, bem como em obter estimativas de tempos de fluxo livre. Esta etapa consiste, também, em determinar a capacidade nominal dos arcos da rede; em determinar o trajeto dos modais público convencional e executivo, pontos de parada destes modais, tempos de deslocamento a pé.

<sup>27</sup> Restrições, por exemplo, (4.13a), (4.13b), (4.15a) e (4.15b) as quais devem ser satisfeitas para obtenção da solução de equilíbrio do usuário para um modelo de equilíbrio de tráfego como o de **Florian (1977)** visto no Capítulo 4.

<sup>28</sup> **Zhang, Y. (1997)** combina, também, dois sub-modelos para compor um modelo maior onde os dois sub-modelos são resolvidos iterativamente. O problema é a estimação de parâmetros, combinando modelos de escolha de viagem urbana, consistente com custos de viagem de equilíbrio. No trabalho do autor, é considerada a questão relacionada ao tradicional procedimento de previsão de demanda de viagem urbana. Este autor desenvolve um modelo combinando modelo de equilíbrio em redes de transporte e modelo para escolha de viagem e localização residencial urbana. Três modelos hierárquicos combinando os modelos tradicionais de distribuição de viagem, de divisão modal e de alocação de tráfego são formulados. Segundo o autor, nestes modelos, medidas de dispersão relacionadas às escolhas de viagem condicionais são usadas como restrições na estrutura do modelo; as probabilidades de escolha resultantes, as quais são relacionadas de maneira aninhada, refletem processos de decisão hipotéticos. Os parâmetros destes modelos são estimados por completa informação baseada no método da máxima verossimilhança sobre custos de viagem (tempos de viagem e custos de operação) do equilíbrio-do-usuário determinados endogenamente uma vez que não existem dados para estes custos. O procedimento de estimação é construído como um problema de programação em dois níveis, onde no problema superior os parâmetros são estimados usando o método da máxima verossimilhança e o problema inferior resolve, para os dados custos e probabilidades de escolha, os valores dos parâmetros. E estes dois problemas são resolvidos iterativamente para se obter a melhor (bem mais adequada) previsão nos modelos para dados observados.

- II) Determinação da demanda: Na observação da demanda, é necessário que sejam considerados todos os modais envolvidos. Estes dados são obtidos através de pesquisa de O-D (origem e destino) juntos aos usuários do sistema de transporte, contagem de tráfego, ou ainda através de pesquisa de domicílio. Os dados observados para cada período típico (horário da manhã, horário do meio-dia, horário da noite, e entre picos) deverão ser dispostos em uma matriz, de O-D.
- III) Determinação dos custos: Esta etapa consiste no levantamento de custos referentes à operação dos diversos modais públicos e dos respectivos custos de depreciação e remuneração do capital investido na frota. A primeira parcela, em geral é expressa através de um custo por km deslocado, enquanto que a segunda é apresentada sob a forma de um custo fixo por período.
- IV) Calibração do modelo de escolha modal: Esta etapa consiste na determinação dos pesos a serem utilizados na função utilidade, a partir do uso de técnicas de Preferência Declarada, conforme detalhado no Anexo 1.
- V) Aplicação do modelo: Consiste na resolução do problema de equilíbrio, através dos sub-modelos propostos, de modo a se obter os fluxos, tempos de viagem associados à rede, bem como o dimensionamento da frota para atender à demanda do transporte público. O modelo poderá ser aplicado para cenários distintos a serem avaliados e comparados.
- VI) Análise dos resultados: Consiste na avaliação dos resultados obtidos para os diversos cenários sobre os quais o modelo foi aplicado de modo a propor as soluções que deverão ser implantadas.

## 5.7 Considerações finais

Neste capítulo, foi apresentado o modelo de planejamento de oferta de serviços de um sistema de transporte público multimodal. O modelo proposto é composto de dois sub-modelos os quais são usados, respectivamente, para

determinar o comportamento do usuário<sup>29</sup> e da empresa operadora, considerando um sistema de transporte público total ou parcialmente desregulamentado. Para o modelo proposto, foram apresentadas as etapas necessárias a sua aplicação. No Apêndice 2, estas etapas são aplicadas ao planejamento de oferta de serviços de um sistema de transporte público multimodal do Corredor Sudoeste da cidade de Florianópolis (SC), e os resultados da aplicação do modelo são discutidos no capítulo seguinte.

---

<sup>29</sup> É importante salientar que a questão do transporte solidário, uma estratégia (comportamento) do usuário do modal privado, que pode diminuir consideravelmente o custo da viagem, não foi incorporada no modelo.

## CAPÍTULO 6

### **Análise dos resultados da aplicação do modelo de planejamento de oferta de serviços de um sistema de transporte público multimodal**

#### **6.1 Análise dos resultados da aplicação do modelo.**

No Apêndice 2, é apresentada uma aplicação do modelo de planejamento de oferta de serviços de um sistema de transporte público multimodal na linha do Corredor Sudoeste da cidade de Florianópolis (SC). É empregado o enfoque sob o ponto de uma empresa do setor de transporte público a qual opera com os modais público convencional e executivo, supondo uma possível desregulamentação no sistema de transporte público. As variáveis de decisão da empresa são:

- a) tarifa do modal público executivo;
- b) tarifa do modal público convencional (embora fixa no modelo para todos os períodos, por ser uma tarifa social);
- a) número de viagens (frequência das viagens) do modal público convencional;
- b) número de viagens (frequência das viagens) do modal público executivo;
- c) número de veículos modal público convencional;
- d) número de veículos modal público executivo.

A seguir são apresentados os resultados da análise de estudos envolvendo alguns cenários.

**I) Um estudo com os dados sobre tarifa cobrada em fevereiro/2001.**

**Cenário 1:**

Tarifa do modal público convencional = 0,85 (tarifa social) fixa para todos os sete períodos do dia;

Tarifa do modal público executivo = 1,50 fixa para todos os períodos do dia.

Período	Tarifa Conv.	Tarifa Exec.
1	0,85	1,50
2	0,85	1,50
3	0,85	1,50
4	0,85	1,50
5	0,85	1,50
6	0,85	1,50
7	0,85	1,50

Os períodos de maior movimentação de passageiros (passageiros/minuto) são **2, 4 e 6**.

**Resposta do Modelo:**

Lucro máximo = **14.866,57** reais por dia;

	Executivo	Convencional
No. total de veículos	2	31

Modal Público Convencional				
Período	Tempo_Espera	Tempo_Ciclo	No. Viagens	No. Veículos
1	0,17	1,01	5	6
2	0,05	1,56	43	31
3	0,11	1,02	28	9
4	0,07	1,32	45	20
5	0,06	1,05	36	17
6	0,08	1,30	25	15
7	0,19	1,00	25	5

Modal Público Executivo				
Período	Tempo_Espera	Tempo_Ciclo	No. Viagens	No. Veículos
1	0,80	0,85	1	1
2	1,13	1,48	2	1
3	0,93	0,88	3	1
4	0,61	1,21	5	2
5	0,59	0,95	4	2
6	0,74	1,18	3	2
7	4,75	0,81	1	1



Nos dois quadros anteriores, os tempos de espera nos pontos de embarque e tempos de ciclo (ida e volta do bairro ao centro) estão em horas. Note-se que em ambos os modais, os tempos de espera são menores, nos períodos **2, 4 e 6** que são os períodos de maior movimentação de passageiros. Ao contrário, os números de viagens e números de veículos são maiores nestes mesmos períodos.

Além disso, observa-se que em todos os períodos e em todos os trechos da rede, os tempos de viagens para os modais, público convencional, público executivo e privado, são valores razoáveis (isto é, condizentes com o que se esperaria observar na prática).

**Observação:** “Tempo de Ciclo” que aparece nos quadros acima se refere ao tempo de viagem no modal, de ida e volta. Isto é,  $\text{Tempo\_Ciclo} = 2 \cdot t_{m,p}^{rs}$  que aparece na restrição (5.10) do Capítulo 5. Ainda,  $\text{Tempo\_Espera} = \frac{\Delta T_p}{N_{m,p}}$ .

### **Cenário 2:**

Tarifa do modal público convencional = 0,85 (tarifa social) fixa para todos os sete períodos do dia;

Período	Tarifa Conv.
1	0,85
<b>2</b>	0,85
3	0,85
<b>4</b>	0,85
5	0,85
<b>6</b>	0,85
7	0,85

Neste **Cenário 2**, a tarifa do modal público executivo é uma variável cujo valor deve ser determinado pelo modelo.

### **Resposta do modelo:**

Lucro máximo = **15.539,83** reais por dia.

	Executivo	Convencional
No. total de veículos	4	25

Note-se que neste **Cenário 2** tem-se um ganho de 4,53% em relação ao lucro obtido com o **Cenário 1**. Deve-se investir na compra de mais 2 ônibus do tipo executivo, podendo se desfazer de 6 ônibus do tipo convencional.

O resultado do modelo com respeito à tarifa do modal público executivo está no quadro abaixo:

Período	Tarifa Exec.
1	1,18
<b>2</b>	<b>1,42</b>
3	1,24
<b>4</b>	<b>1,38</b>
5	1,25
<b>6</b>	<b>1,39</b>
7	1,20

O resultado deste modelo diz que se consegue um lucro **4,53%** maior do que no **Cenário 1**, bastando para isso que o valor da tarifa do modal público executivo seja variável ao longo do dia.

O que se observa na situação real, onde a tarifa do modal público executivo é fixa no valor de 1,50 reais, é que nos períodos **1, 3, 5 e 7** o modal público executivo é sub-utilizado trafegando praticamente vazio. Deve-se lembrar que o custo de “depreciação e remuneração” do modal público executivo é alto.

No **Cenário 2** pode-se observar que nos períodos de pouca movimentação de passageiros **1, 3, 5 e 7** o modal público executivo tem o valor da tarifa menor e, por conseguinte, atraindo mais passageiros que utilizam o modal público convencional. Por outro lado, nos períodos de maior movimentação de passageiros **2, 4 e 6** o modal público executivo tenta competir com o modal privado em termos dos atributos: custo da viagem; tempo de viagem; tempo de espera; distância (tempo) percorrida a pé e conforto. É importante lembrar que a divisão modal ou distribuição dos fluxos de passageiros na rede se dá pelo modelo *Logit* e que a receita de cada modal público convencional e executivo em cada período e em cada trecho desta rede é o somatório dos produtos dos fluxos pela respectiva tarifa cobrada.

Uma outra observação diz respeito à possibilidade de ser implantado, então, um sistema de tarifa econômica para o modal público executivo tal como no quadro

acima onde nos períodos **1, 3, 5 e 7** seria cobrada uma tarifa diferenciada com valores menores.<sup>30</sup>

<b>Modal Público Convencional</b>				
Período	Tempo Espera	Tempo Ciclo	No. Viagens	No. Veículos
1	0,17	1,01	4	6
2	0,05	1,57	43	31
3	0,11	1,02	29	9
4	0,07	1,32	46	20
5	0,06	1,05	37	18
6	0,08	1,30	25	16
7	0,19	1,01	24	5

<b>Modal Público Executivo</b>				
Período	Tempo Espera	Tempo Ciclo	No. Viagens	No. Veículos
1	0,37	0,93	2	3
2	0,40	1,46	6	4
3	0,28	0,95	12	3
4	0,31	1,26	9	4
5	0,28	0,95	8	3
6	0,33	1,26	6	4
7	0,30	0,94	16	3

<sup>30</sup> Um sistema de tarifa econômica para o modal público convencional é o proposto no trabalho de **Cruz (1999)**. Neste seu trabalho ele trata apenas de um modal, isto é, o ônibus convencional. Neste trabalho o objetivo é determinar valores ótimos para as tarifas fora do horário de pico da manhã e da tarde induzindo o usuário a antecipar a viagem no pico da manhã e retardar a viagem no pico da tarde.

## II) Um estudo com os dados atuais sobre tarifa cobrada em outubro/2001.

Um estudo considerando os aumentos do valor da tarifa do modal público convencional de 0,85 reais para 0,95 reais e do modal público executivo de 1,50 reais para 2,20 reais.

Observação: No período de fevereiro de 2001 a outubro de 2001 o preço do combustível aumentou pouco. E os custos de depreciação e remuneração do capital investido na frota se mantiveram estáveis.

### Cenário 1a:

Tarifa do modal público convencional = 0,95 (tarifa social) fixa para todos os sete períodos do dia;

Tarifa do modal público executivo = 2,20 fixa para todos os períodos do dia.

Período	Tarifa Conv.	Tarifa Exec.
1	0,95	2,20
<b>2</b>	0,95	2,20
3	0,95	2,20
<b>4</b>	0,95	2,20
5	0,95	2,20
<b>6</b>	0,95	2,20
7	0,95	2,20

Deve-se lembrar que os períodos de maior movimentação de passageiros (passageiros/minuto) são **2, 4 e 6**.

### Resposta do Modelo:

Lucro máximo = **17.329,25** reais por dia;

	Executivo	Convencional
No. total de veículos	1	31

Modal Público Convencional				
Período	Tempo Espera	Tempo Ciclo	No. Viagens	No. Veículos
1	0,17	1,01	4	6
2	0,05	1,57	43	31
3	0,11	1,02	29	9
4	0,07	1,32	46	20
5	0,06	1,05	37	18
6	0,08	1,30	25	16
7	0,19	1,01	24	5

Modal Público Executivo				
Período	Tempo Espera	Tempo Ciclo	No. Viagens	No. Veículos
1	0,80	0,81	1	1
2	2,20	1,37	1	1
3	3,25	0,82	1	1
4	3,00	1,12	1	1
5	2,17	0,86	1	1
6	2,08	1,11	1	1
7	4,75	0,80	1	1

### Cenário 2a:

Tarifa do modal público convencional = 0,95 (tarifa social) fixa para todos os sete períodos do dia.

Período	Tarifa Conv.
1	0,95
2	0,95
3	0,95
4	0,95
5	0,95
6	0,95
7	0,95

Neste **Cenário 2a**, a tarifa do modal público executivo é uma variável cujo valor deve ser determinado pelo modelo.

### Resposta do modelo:

Lucro máximo = **18.290,75** reais por dia.

	Executivo	Convencional
No. total de veículos	4	25

Note-se que neste **Cenário 2a** tem-se um ganho de 5,26% em relação ao lucro obtido com o **Cenário 1a**. Deve-se investir na compra de mais 3 ônibus do tipo executivo, podendo se desfazer de 6 ônibus do tipo convencional.

O resultado do modelo com respeito à tarifa do modal público executivo está no quadro a seguir:

Período	Tarifa Exec.
1	1,29
<b>2</b>	<b>1,52</b>
3	1,33
<b>4</b>	<b>1,48</b>
5	1,34
<b>6</b>	<b>1,48</b>
7	1,30

O resultado deste modelo diz que se consegue um lucro **5,26%** maior do que no **Cenário 1a**, bastando para isso que o valor da tarifa do modal público executivo seja variável ao longo do dia. Além disso, este **Cenário 2a** revela que a política da empresa de aumentar o valor da tarifa do modal público executivo de 1,50 reais para 2,20 reais, enquanto ao mesmo tempo o valor da tarifa do modal público convencional aumentou de 0,85 reais para 0,95 reais, não foi apropriada. Note-se que no **Cenário 2a** o valor da tarifa variável ao longo do dia não ultrapassa o valor de **1,52** reais correspondente ao período **2**. Com o valor da tarifa estando abaixo de 1,50 (**Cenário 1a**), consegue-se atrair mais passageiros para o modal público executivo, proporcionando um lucro **5,26%** maior do que no **Cenário 1a** onde o valor da tarifa é fixa em 2,20 reais.

Modal Público Convencional				
Período	Tempo Espera	Tempo Ciclo	No. Viagens	No. Veículos
1	0,22	1,01	4	4
<b>2</b>	0,06	1,54	36	25
3	0,13	1,01	25	8
<b>4</b>	0,06	1,33	44	21
5	0,13	1,02	17	8
<b>6</b>	0,06	1,34	33	21
7	0,17	1,01	28	6

Modal Público Executivo				
Período	Tempo Espera	Tempo Ciclo	No. Viagens	No. Veículos
1	0,38	0,93	2	2
2	0,44	1,47	5	3
3	0,27	0,95	12	4
4	0,32	1,26	9	4
5	0,27	0,95	8	4
6	0,32	1,26	7	4
7	0,30	0,94	16	3

Note-se pelos dois quadros anteriores que os números de viagens (frequência) e número de veículos executivo aumentaram no **Cenário 2a** em relação ao **Cenário 1a** para os períodos considerados e, por conseguinte, os tempos de espera diminuíram para este modal ônibus executivo. Isto se deve a uma nova divisão modal influenciada pela política de tarifa do ônibus executivo no **Cenário 2a** em relação à política de tarifa do ônibus executivo no **Cenário 1a**.

Note-se, também, que por causa da divisão modal o número de veículos do tipo ônibus convencional diminuiu e, por conseguinte a frequência ou número de viagens diminuiu para os períodos considerados. Conseqüentemente, os tempos de espera aumentaram para o modal público convencional no **Cenário 2a** em relação ao **Cenário 1a**.

### **Cenário 3a:**

Tarifa do modal público convencional = 0,95 (tarifa social) fixa para todos os sete períodos do dia.

Período	Tarifa Conv.
1	0,95
2	0,95
3	0,95
4	0,95
5	0,95
6	0,95
7	0,95

Neste **Cenário 3a**, a tarifa do modal público executivo é uma variável cujo valor deve ser determinado pelo modelo. No entanto, deseja-se saber qual deve ser o menor valor fixo desta tarifa.

**Resposta do modelo:**

Lucro máximo = **17.843,49** reais por dia.

	Executivo	Convencional
No. total de veículos	9	28

Note-se que neste **Cenário 3a** tem-se um ganho de 2,45% em relação ao lucro obtido com o **Cenário 1a**. Deve-se investir na compra de mais 8 ônibus do tipo executivo, podendo se desfazer de 3 ônibus do tipo convencional.

O resultado do modelo com respeito à tarifa do modal público executivo está no quadro a seguir:

Período	Tarifa Exec.
1	1,40
2	1,40
3	1,40
4	1,40
5	1,40
6	1,40
7	1,40

O resultado deste modelo diz que se consegue um lucro **2,45%** maior do que no **Cenário 1a**, mesmo havendo uma redução no valor da tarifa do modal público executivo de 2,20 reais para 1,40 reais. Da mesma forma que no **Cenário 2a**, este **Cenário 3a** revela que a política da empresa de aumentar o valor da tarifa do modal público executivo de 1,50 reais para 2,20 reais, enquanto ao mesmo tempo o valor da tarifa do modal público convencional aumentou de 0,85 reais para 0,95 reais, não foi apropriada.

Com o valor da tarifa estando fixado em 1,40 reais, consegue-se atrair mais passageiros para o modal público executivo fora dos períodos de maior movimentação de passageiros **1, 3, 5 e 7**. Além disso, nos períodos de maior movimentação de passageiros **2, 4 e 6** o modal público executivo compete com o modal privado. Tudo isso justifica que o **Cenário 3a** proporciona um lucro **2,45%** maior do que no **Cenário 1a** onde o valor da tarifa fixa é 2,20 reais.



Note-se, que o valor de 1,40 reais para a tarifa do modal público executivo dado pelo **Cenário 3a** na situação atual (outubro/2001) é menor do que o valor 1,50 reais cobrado em fevereiro de 2001 quando o valor da tarifa do modal público convencional era 0,85.

<b>Modal Público Convencional</b>				
Período	Tempo_Espera	Tempo_Ciclo	No. Viagens	No. Veículos
1	0,18	1,01	4	6
2	0,06	1,56	39	28
3	0,12	1,02	26	8
4	0,07	1,32	41	18
5	0,07	1,05	33	16
6	0,09	1,30	23	14
7	0,21	1,01	23	5

<b>Modal Público Executivo</b>				
Período	Tempo_Espera	Tempo_Ciclo	No. Viagens	No. Veículos
1	0,76	0,92	1	1
2	0,17	1,49	13	9
3	0,46	0,95	7	2
4	0,22	1,25	13	6
5	0,20	0,98	11	5
6	0,30	1,23	7	4
7	0,81	0,91	6	1

Note-se pelos dois quadros anteriores que os números de viagens (freqüência) e número de veículos do modal público executivo aumentaram no **Cenário 3a** em relação ao **Cenário 2a** para os períodos de maior movimentação de passageiros **2, 4 e 6** e, por conseguinte, os tempos de espera diminuiram bem mais para este modal público executivo. Isto se deve a uma nova divisão modal influenciada pela política de tarifa do modal público executivo no **Cenário 3a** em relação à política de tarifa do modal público executivo no **Cenário 2a** (e obviamente, em relação ao **Cenário 1a**).

Note-se que por causa da divisão modal o número de veículos do tipo ônibus convencional diminuiu e, por conseguinte a freqüência ou número de viagens diminuiu para os períodos **2, 4 e 6**. Conseqüentemente, nestes períodos, os tempos de espera aumentaram para o modal público convencional no **Cenário 3a** em relação ao **Cenário 2a**.

### III) Um estudo: modal público executivo x modal privado.

Neste cenário, pretende-se mostrar que o modal público executivo pode ser uma alternativa de transporte para o usuário que sempre privilegiou o uso do modal privado (o automóvel). Para isto acontecer, que ofertas de serviços para este modal público executivo precisam ser implantadas para que se garanta rentabilidade para a empresa executora de transporte público a qual opera com este modal público executivo?

Lembrando, os resultados da pesquisa de preferência declarada [ver Apêndice 2] forneceram os seguintes valores para os parâmetros “beta” da função utilidade em termos dos atributos considerados importantes pelo usuário na escolha do modal:

Beta				
Pé	T_Viagem	T_Espera	Custo	Conf.
-2,5021	-1,9404	-1,0814	-2,5040	0,23

Estes valores mostram que o tempo de deslocamento a pé desde o estacionamento ou desde o ponto de desembarque até o destino final da viagem tem, relativamente aos demais atributos, uma importância significativa.

O usuário estaria disposto a pagar 1 R\$ ( $2,5021 \div 2,5040$ ) para não ter que percorrer uma 1 hora (uma unidade) a pé. Isto é, por uma regra de três simples, este usuário pagaria R\$0,50 para não ter que andar 30 minutos a pé, e assim por diante.<sup>31</sup>

Considere-se uma situação hipotética em que a empresa executora oferece um serviço adicional para o modal público executivo onde este modal faz um roteiro

<sup>31</sup> **Song (1997)** faz um estudo específico sobre este tempo de percurso a pé desde o estacionamento até o destino final de viagem para um (“CBD – Central Business District”). Este autor deduz (inference) o valor do tempo de percurso a pé dos dados de preço de estacionamento em um CBD esparsos. Para o autor, é importante medir o valor do tempo de viagem com uma certa precisão uma vez que encontrar resultados com economia de tempo de viagem é sem dúvida o mais importante benefício de projetos de transporte. O autor ressalva que medir o valor de tempo de viagem usando escolha de modal e então generalizar o resultado para todas as atividades é enganoso. Uma destas atividades é andar a pé entre o local de trabalho e os estacionamentos. Para o autor, o gradiente do preço do estacionamento reflete a vontade do usuário de pagar pelo privilégio de economizar tempo de percurso a pé. Portanto, o valor do tempo de percurso a pé pode ser deduzido (inferido) do preço de economizá-lo. Se todas as atividades econômicas diferentes de estacionamento se concentram num ponto no centro da cidade, o tradicional modelo “*monocentric-city*” implica que o gradiente do preço do estacionamento deveria ser convexo. Esta implicação usual não é assegurada, porém, se o CBD é esparsos. Neste caso, o preço do estacionamento pode depender de características da ocupação local, e não simplesmente da distância do centro do CBD. Introduzindo um modelo de equilíbrio espacial onde os destinos de viagem são difusos, o modelo desenvolvido pelo autor considera o preço de estacionamento sendo uma função da ocupação local bem como da acessibilidade ao centro do CBD. Estudando a estrutura estacionamento-preço de CBD enquanto controlada por fatores de ocupação local, o autor encontrou que o valor do tempo de percurso a pé pode variar com o tipo de modelo assumido.

dentro do centro da cidade de modo que depois do desembarque do passageiro o tempo (médio) de percurso a pé é igual a zero. Isto é, o modal público executivo teria a flexibilidade do modal privado deixando o passageiro sempre próximo ao seu destino final de viagem. Além do mais, na volta da viagem, este modal cumpriria um roteiro parecido nos pontos de desembarque nos bairros que compreendem o Corredor Sudoeste, deixando o passageiro próximo da sua residência.

Pelo exposto, tem-se a oportunidade de se apresentar, a seguir, a análise de mais um cenário (política).

### **Cenário 1b:**

Tarifa do modal público convencional = 0,95 (tarifa social) fixa para todos os sete períodos do dia.

Período	Tarifa Conv.
1	0,95
2	0,95
3	0,95
4	0,95
5	0,95
6	0,95
7	0,95

No modelo, o valor do parâmetro ou atributo “Pé” é igual a zero para o modal público executivo. Por conta do roteiro a ser realizado para diminuir o tempo de percurso a pé, supõe-se ser necessário 4 km adicionais à distância em quilômetros  $d^{rs}$  para realizar o caminho entre o par O-D definido por  $r, s$ <sup>32</sup> - um roteiro de 2km realizado no centro da cidade<sup>33</sup> e um roteiro de 2km para os bairros. Estes quatro quilômetros são acrescidos ao custo operacional (em R\$/km) para este modal.

Neste **Cenário 1b**, a tarifa do modal público executivo é uma variável cujo valor deve ser determinado pelo modelo.

<sup>32</sup> Este valor de 4 km não é um dado levantado (conhecido) em campo, embora possa se ter uma estimativa de parte deste valor conhecendo-se a área central da cidade de Florianópolis com pontos importantes de embarques e desembarques como escolas, hospitais, supermercados, shopping, repartições públicas, bancos entre outros que seriam cobertos pelo referido roteiro.

<sup>33</sup> No Capítulo 3 (Revisão Bibliográfica 1) é apresentado, de forma resumida, o trabalho de EL-Hifnawi (2002) cujos resultados da simulação de seu modelo para a descentralização de viagens com os usuais pontos finais no centro de cidades trazem benefícios para o usuário de automóvel, para o usuário do transporte público e para as empresas de ônibus. Isto confirma (ou valida) de certa forma os resultados - interessantes para a empresa e para o usuário - obtidos aqui neste trabalho com respeito ao Cenário 1b.

**Resposta do modelo:**

Lucro máximo = **19.571,93** reais por dia.

	Executivo	Convencional
No. total de veículos	12	22

Note-se que neste **Cenário 1b** tem-se um ganho de 12,94% em relação ao lucro obtido com o **Cenário 1a**. Deve-se investir na compra de mais 11 ônibus do tipo executivo, podendo se desfazer de 9 ônibus do tipo convencional.

O resultado do modelo com respeito à tarifa do modal público executivo está no quadro a seguir:

Período	Tarifa Exec.
1	1,52
<b>2</b>	<b>1,65</b>
3	1,48
<b>4</b>	<b>1,62</b>
5	1,47
<b>6</b>	<b>1,62</b>
7	1,48

O resultado deste modelo diz que se consegue um lucro **12,94%** maior do que no **Cenário 1a**, mesmo havendo uma redução no valor da tarifa do modal público executivo de 2,20 reais para valores entre 1,47 e 1,65 reais. Da mesma forma que no **Cenário 2a** e **Cenário 3a**, este **Cenário 1b** revela, mais uma vez, que a política da empresa de aumentar o valor da tarifa do modal público executivo de 1,50 reais para 2,20 reais, enquanto ao mesmo tempo o valor da tarifa do modal público convencional aumentou de 0,85 reais para 0,95 reais, não foi apropriada.

Com o valor da tarifa ficando entre 1,47 e 1,65 reais consegue-se atrair mais passageiros para o modal público executivo em todos os sete períodos do dia. Mais precisamente, neste **Cenário 1b** o modal público executivo compete com o modal privado (e o modal público convencional) em todos os 7 períodos do dia. Pode-se observar que o número de viagens com o modal público executivo aumentaram consideravelmente em relação ao número de viagens com o modal público convencional, conforme quadros a seguir.

Modal Público Convencional				
Período	Tempo_Espera	Tempo_Ciclo	No. Viagens	No. Veículos
1	0,27	1,00	3	4
2	0,07	1,54	31	22
3	0,17	1,02	19	6
4	0,07	1,33	37	18
5	0,17	1,02	13	6
6	0,07	1,33	29	18
7	0,22	1,01	22	5

Modal Público Executivo				
Período	Tempo_Espera	Tempo_Ciclo	No. Viagens	No. Veículos
1	0,22	0,94	4	4
2	0,12	1,47	18	12
3	0,11	0,95	29	9
4	0,11	1,26	26	12
5	0,11	0,95	21	9
6	0,11	1,27	20	12
7	0,14	0,94	35	7

Note-se pelos dois quadros anteriores que o número de veículos do modal público executivo alocado aos períodos aumentou consideravelmente. Note-se, também, que o número de veículos do modal público convencional diminuiu consideravelmente com relação ao **Cenário 1a**, significando que grande parte da demanda de passageiros do modal público convencional passou a utilizar o modal público executivo. Ao implementar o **Cenário 1b** numa planilha análoga à apresentada para o **Cenário 2a** (ver Apêndice 2), pode-se observar que a demanda (ou fluxo) do modal privado também diminuiu consideravelmente e, por conseguinte, neste Cenário 1b, o modal público executivo é, verdadeiramente, uma alternativa de transporte para o usuário do modal privado.<sup>34</sup> Tudo isso justifica o fato do **Cenário 1b** proporcionar um lucro 12,94% maior do que no **Cenário 1a** onde a tarifa fixa é 2,20 reais e onde o usuário tem um “custo” pelo tempo de percurso a pé.

**Observação:** O lucro diário obtido através do modelo não é, ainda, o lucro diário total da empresa. Conforme os custos de transporte mostrados no Apêndice 2 devem, ainda, ser descontados os custos fixos:

Pessoal: Administração, benefícios, diretoria;

Impostos.

<sup>34</sup> É importante considerar as informações contidas no trabalho de **Pucher (2000)**, cujo resumo é apresentado no Capítulo 3 (Revisão Bibliográfica 1), como um alerta de que o crescimento do uso do automóvel em alguns países como os Estados Unidos da América, por exemplo, não pode ser freado nem com melhorias no transporte público.

## 6.2 Calibração e validação do modelo

Dadas às informações que se tem, é preciso ver se este modelo está produzindo resultados consistentes com aquilo que se observa na prática. Os resultados do modelo para os vários cenários apresentados são satisfatórios diante dos dados obtidos. A calibração do modelo deu-se de acordo com os dados obtidos. Alguns destes dados, por exemplo, dados de demanda, não puderam ser obtidos diretamente consultando alguma fonte, e para isso tiveram que ser obtidos indiretamente usando-se de artifícios, conforme exposto no Apêndice 2.

Tem-se a impossibilidade de validar o modelo na prática por razões que são discutidas a seguir.

- a) a validação de um modelo de planejamento de transporte se dá em longo prazo, haja vista que o impacto de alterações nos meios de transportes é algo que não é percebido de imediato;
- b) em geral, as cidades estão em contínuo crescimento. As melhorias nos meios públicos também não são instantâneas;
- c) a mudança de comportamento do usuário também é algo que não ocorre de uma hora para outra. Em geral, esta mudança ocorre em períodos até bastante elásticos, e não necessariamente logo após alguma alteração realizada nos meios de transportes.

Desta forma fica quase impossível observar diretamente o impacto causado por uma melhoria no sistema de transporte público.<sup>35,36</sup> Todavia, com os dados obtidos o modelo produziu resultados consistentes com aquilo que se espera observar na prática.

---

<sup>35</sup> **Mackett and Edwards (1998)** estudam o impacto da implantação de um novo sistema de transporte. Seu artigo se preocupa com o modo pelo qual são tomadas as decisões sobre tais sistemas, em particular a razão que está por trás do processo de tomada de decisão e as implicações para a cidade em termos de demanda de viagem, desenvolvimento urbano e ambiental. A ênfase deste trabalho está na previsão, quando os autores colocam a seguinte pergunta: quando da implantação de um novo sistema de transporte público urbano, irão as expectativas se realizarem?

<sup>36</sup> Para uma leitura complementar, o leitor poderá ver no Capítulo 3 (Revisão Bibliográfica 1), de forma resumida, o trabalho de **Mackett (2001)** em que, segundo o autor, foi possível determinar o impacto causado pela implementação, em particular, de ações ou políticas para reduzir o uso do modal privado (automóvel).

## CAPÍTULO 7

### Conclusões e recomendações

#### 7.1 Conclusões

No Capítulo 6 é apresentada a análise dos resultados obtidos com a aplicação do modelo no Apêndice 2. A seguir, são apresentadas as seguintes conclusões segundo os objetivos deste trabalho:

- a) o modelo mostrou-se viável para ser aplicado na prática, supondo para isso uma possível desregulamentação do sistema de transporte público;
- b) o modelo mostrou que políticas de desregulamentação parciais, em geral, são mais adequadas: o modal público convencional (social) deve ser mantido com tarifa compatível com o custo e não de acordo com leis de mercado;
- c) o modelo mostrou que existe uma relação entre a tarifa (social) fixa do modal público convencional e a tarifa do modal público executivo alternativo. Esta relação depende dos serviços ofertados em termos de tarifa e frequência das viagens, e da avaliação destes serviços feita pelo usuário;
- d) o modelo mostrou que é importante que a empresa executora de transporte público considere a oferta no horário de pico e fora dele com a tarifa do modal público executivo variável ao longo do dia, uma vez que isto contribui para o aumento da eficiência da empresa;
- f) o modelo mostrou a possibilidade de se analisar um cenário hipotético (**Cenário 1b**) onde seria vantajoso para a empresa executora de transporte público implantar melhorias adicionais ao modal executivo tornando-o mais atrativo; e
- e) o modelo mostrou que é vantajoso considerar o tratamento sistêmico do planejamento de transporte. Isto é, a importância de se considerar a rede como um todo, e aí se inclui, por exemplo, o valor que o usuário atribui à

tarifa cobrada pelos estacionamento e ao percurso a pé desde o estacionamento até o destino final de viagem, uma vez que estes valores interferem na escolha do modal feita pelo usuário.

## 7.2 Recomendações para trabalhos futuros

Ao decidir por um ou outro modal, o usuário leva em consideração outros atributos do sistema, além dos atributos dos modais. O usuário leva em consideração a localização do estacionamento; se o estacionamento é coberto ou não, público ou particular; a segurança do estacionamento; o tempo à procura de vaga para estacionar; a probabilidade de encontrar vaga no estacionamento. Não obstante, quando um estacionamento começa a ficar lotado, e supondo-se que o estacionamento é privado, nesta situação o proprietário do estacionamento irá aumentar o preço. Enquanto empresário de estacionamento sua utilidade é apenas o lucro e, por conseguinte, ele vai aumentar o preço do estacionamento até que o volume diário de automóveis (modal privado) comece a diminuir. Esta é uma situação onde, eventualmente, o preço do estacionamento poderia estar sendo influenciado pelo fluxo de veículos no estacionamento. Em curto prazo, isto não vai ser sentido desta forma, mas, há uma tendência de que em longo prazo a demanda e a oferta se equilibrem novamente. No modelo de planejamento de oferta de serviços de um sistema de transporte público multimodal, se forem computados os valores das utilidades  $U_{m,p}^{rs}$  (no modelo de distribuição de viagem), a demanda para viagem pelo modal privado pode ser determinada. Logo, seria possível a partir disso analisar possíveis alternativas de estacionamento que dependam da demanda pelo modal privado. Portanto, um futuro trabalho poderia direcionar o enfoque especificamente para o empresário de um estacionamento o qual tem o objetivo de maximizar seu lucro.

Uma outra possibilidade para um trabalho futuro seria tornar o modelo apresentado neste trabalho o mais amplo possível, incorporando ao planejamento de transporte público a questão dos estacionamento. Tome-se a questão (b) mencionada por **WHITLOCK (1982) Apud AÖR (1984)**, vista no Capítulo 2: “*como a disponibilidade de meios alternativos, o ônibus (modal público) em particular, afetará as necessidades de estacionamento?*” As duas questões “estacionamento” e



“deslocamento urbano” estão relacionadas, pois, à medida que se facilita ou se dificulta o deslocamento de usuários com modal público, a necessidade de espaço para locais de estacionamentos de automóveis fica alterada. Isto parece bastante lógico, entretanto quantificar isto já é uma questão mais complexa. Mais precisamente, se deveria buscar resposta à pergunta: em quanto, as necessidades de estacionamento fica alterada em função da disponibilidade de meios alternativos de transporte, mais especificamente, o ônibus? Não obstante, se poderia enunciar um “problema dual” associado: em quanto, as necessidades de transporte alternativo é alterado dado uma maior oferta de estacionamento? Para responder a estas questões, outras informações seriam necessárias tais como: localização dos estacionamentos; a rede viária com *links* adicionais ligando os centróides aos terminais de ônibus e aos estacionamentos; e mais informações sobre os estacionamentos em si, como custos de operação, capacidade e etc.. Além do mais, para o proprietário de um estacionamento as variáveis de decisão seriam outras. No modelo de planejamento de oferta de serviços de um sistema de transporte público multimodal, tempo de viagem compreende: tempo de viagem no veículo (modal público ou modal privado); tempo nos pontos de embarque e desembarque de passageiros. Porém, o tempo gasto para procurar uma vaga num estacionamento não foi considerado no modelo. Se fossem considerados *links* da rede aos diversos estacionamentos, isto seria um passo para se obter um modelo mais amplo do que foi proposto aqui neste trabalho e que, eventualmente, estacionamento e transporte público pudessem ser tratados simultaneamente. Cabe ressaltar que estacionamento e transporte público de passageiros foram sempre tratados na literatura de forma isolada no contexto maior de um sistema de transporte.

## BIBLIOGRAFIA

- Aashtiani, H. Z. and Magnanti, T. L.: "Equilibrium on a Congested Transportation Network". Report OR 105-80, Operations Research Center, M. I. T.; also forthcoming In SIAM J. Algebraic and Discrete Methods. 2, pp. 213-216, 1981.
- Andrade, T. A. e LODDER, C. A.: "Sistema Urbano e Cidades Médias no Brasil". IPEA/INPES – Relatório de Pesquisa nº 43, Rio de Janeiro, 1979.
- A. N. T. P. – VI CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS.: "Transportes nas Cidades de Porte Médio". Curitiba, Maio, 1984.
- Aör, A. S. P.: "Modelo Probabilístico Aplicável à Alocação de Vagas de Estacionamento em Comunidades Fechadas". PUC/RJ - Tese de Mestrado. 1984.
- Arnott, R.; de Palma, A. and Lindsey, R.: "Does Providing information to drivers reduce traffic congestion?". Transportation Research, Part A, Vol. 25<sup>A</sup>, No. 5, pp. 309-318, 1991.
- Baerwad, J. E.: "Transportation and Traffic Engineering Handbook". Institute of Transportation Engineers, Pretice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1976.
- BASTOS, R. R.: "O Planejamento do Uso do Solo e sua interação com o sistema de transportes, uma análise de caso: O Município de Juiz de Fora". Dissertação de Mestrado, PUC, Rio de Janeiro, 1985.
- Bates, J.: "Econometric issues in stated preference analysis". Journal of Transport Economics and Policy, Vol. XXII, nº 1, p. 59-69, January, England, 1988.
- Bates, J. J.: "Reflections on Stated Preferences: Theory and Practice, Seventh International Conference on Travel Behaviour, Vol. I, pp. 77-88, Chile, 1994.
- Beckmann, M. J. McGuire, C. B. and Winsten, C. B.: "Studies in the Economics of Transportation". Yale University Press, New Haven, Connecticut, 1956.

- Beckmann, M. J.: "Equilibrium versus optimum in Public Transportation Systems: Traffic Equilibrium Methods – Lecture Notes in Economics and Mathematics Systems". *Journal of Regional Science*, nº 118, pp. 119-131, 1973.
- Bem-Akiva, M. and Lerman, S. "Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand". The Massachusetts Institute of Technology, p. 369, 1985.
- Berry, B. L. L.: "The Component of the Urban Model", *Journal of the American Institute of Planners*, pp. 150-155, May, 1965.
- Bhat, C. R.: "Accommodating variations in responsiveness to level-of-service measure in travel mode choice modeling". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 32, pp. 495-507, September, 1998.
- Bianco, M. J.: "Private profit versus public service: Competing demand in urban transportation history and policy, Portland, Oregon, 1972 – 1970". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 30, pp. 69-70, January, 1996.
- Bierlaire, M.: "Mathematical models for transportation demand analysis". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 31, pp. 86-99, January, 1997.
- Bodin, L.; Rosenfeld, D.; Kydes, A.: "UCOST – A micro approach to a transit planning problem". *J. Urban Anal.*, 5(1), p. 47-69, 1978.
- Boyce, D. E.; LeBlanc, L. J. and Chon, K. S.: "Network Equilibrium Models of Urban Location and Travel Choices: Retrospective Survey". *Journal of Regional Science*, Vol. 28, pp. 159-183, 1988.
- Bradley, M.: "Realism and adaptation in designing hypothetical travel choice concepts". *Journal of Transport Economic and Policy*. England. Vol. XXII, nº 1, p. 121-137, January, 1988.
- Brand, D. and Manheim, M. L.: "Urban Travel Demand Forecasting". Special Report 143, Highway Research Board, 1973.
- Branston, D.: "Link Capacity Functions: A Review". *Trans. Res.* 10, pp. 223-236, 1976.

- Bruynooghe, M. Gibert, A. and Sakarovitch, M.: "Une méthode d'affectation du traffic". In Proceedings of the Fourth International Symposium on the Theory of Traffic Flow, Karlsruhe (1968), Leutzbach, W. and Baron, P., pp.198-204, Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1969.
- Charles River Associates: "A Desegregated Behavioral Model of Urban Travel Demand". Report 156-2, Cambridge, Mass., 1972.
- Chen, T.; Chang, H. and Tzeng, G.: "Using a weight-assessing model to identify route choice criteria and information effects". Transportation Research, Part A: Policy and Practice, Vol. 35, pp. 197-224, March, 2001.
- Conselho para Assuntos de Energia – COASE/Confederação Nacional da Indústria – CNI.: "O Transporte nas Megacidades Brasileiras". Rio de Janeiro, 1994.
- Costa, A.: "The organization of urban public transport system in western European metropolitan areas". Transportation Research, Part A: Policy and Practice, Vol. 30, pp. 349-359, September, 1996.
- Cruz, J. A.: "Modelo de Determinação do Horário Econômico no Transporte Público de Passageiros". Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Florianópolis, Brasil, 1999.
- Cruz, J. A.: "Modelo de demanda variável para a determinação da oferta de transporte coletivo urbano por ônibus". Dissertação de Mestrado, 191p. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Florianópolis, Brasil, 1991.
- Culliname, S.: "The relationship between car ownership and public transport provision: a case study of Hong Kong". Transport Policy, Vol. 9, pp. 29-39, January, 2002.
- Dafermos, S. C.: "An extended traffic assignment model with applications to two-way traffic". Transport Science, 5, pp.366-389, 1971.
- Dafermos, S. C.: "The traffic assignment problem for multiclass-user transportation network". Transportation Science. 6, pp. 73-87, 1972.

- Dargay, J. M. and Gately, D.: "Income's effect on car and vehicle ownership worldwide: 1960 – 2015". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 33, pp. 101-138, February, 1999.
- Dargay, J. M.: "The effect of income on car ownership: evidence of asymmetry". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 35, pp. 807-821, November, 2001.
- David, A.: "Models implementation: A state of the art". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 34, pp. 459-480, November, 2001.
- de Freitas, A. A.: "Modelagem Comportamental dos Decisores Através de Técnicas de Preferência Declarada: Uma Aplicação no Setor Imobiliário de Florianópolis-SC". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Florianópolis, Brasil, Julho, 1995.
- Dial, R. B.: "A Combined Trip Distribution and Modal Split Model". Paper presented at the 1974 Annual Meeting of the Highway Research Board, 1973.
- El-Hifnawi, M. B.: "Cross-town bus routes as a solution for decentralized travel: a cost-benefit analysis for Monterrey, Mexico". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 36, pp. 127-144, February, 2002.
- Evans, S.: "Derivation and analysis of some models for combining trip distribution and assignment". *Transportation Research*, 10, pp. 37-57, 1976.
- Félex, J. F.: "O Usuário: Um Instrumento de Avaliação". Dissertação de Mestrado, USP. 1983.
- Ferlan, J. A.; Florian, M. and Achim, C.: "On Incremental Methods for Traffic Assignment". *Transportation Research*, Vol. 9, pp. 237-239, 1975.
- Fernandez, J. L. and Friesz, T. L.: "Equilibrium Predictions in Transportation Markets: The State of the art". *Transportation Research*, Vol. 17B, No. 2, pp. 155-172, 1983.

- Fisk, C. and Nguyen, S.: "Existence and uniqueness properties of an asymmetric two-mode equilibrium model". *Transportation Science*, 15(4), pp. 318-328, 1981.
- Florian, M. and Gaudry, M.: "A Conceptual Framework for the Supply Side in Transportation Systems". Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal, Julho de 1979.
- Florian, M. and Gaudry, M.: "Transportation Systems Analysis: Illustrations and Extension of a Conceptual Framework". *Transportation Research*, vol. 17B(2), pp. 147-153, 1983.
- Florian, M. and Nguyen, S.: "An Application and Validation of Equilibrium Trip Assignment Methods". *Transport Science*. 10, pp. 374-390, 1976.
- Florian, M. and Nguyen, S.: "A combined trip distribution, modal split and trip assignment model". *Transportation Research*, 12(4), pp.241-246, 1978.
- Florian, M.: "A Traffic Equilibrium Model of Travel by Car and Public Transit Model". *Transport Science*, Vol. 11, No. 2, May, 1977.
- Ford, L. R. and Fulkerson, M. R.: "Flows in Networks". Princeton University Press, 1962.
- Fowkes, A. S.; Nash, C. A. and Tweddle, G.: "Valuing the attributes of Freight Transport Quality: Results of the Stated Preference Survey". Working Paper 276, Institute for Transport Studies, The University of Leeds, pp. 1-24, 1989.
- Fowkes, A. S.: "Recent Developments in Stated Preference Techniques in Transport Research". PTRC: Course: Introduction to Stated Preference Techniques, 1991.
- Fowkes, A. S.: "Comparison of Revealed and Stated Preference Methods". PTRC: Course: Introduction to Stated Preference Techniques, 1991.
- Freitas, L. H. W.: "Análise e dimensionamento de oferta de transporte por ônibus: Metodologia". São Paulo: Boletim Técnico da CET nº 35, 72p. 1985.

- Gärling, T.; Gärling A. and Johansson, A.: "Household choices of car-use reduction measures". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 34, pp. 309-320, June, 2000.
- Gärling, T; Eek, D; Loukopoulos, P; Fujii, S.; Johansson-Stenman, O.; Kitamura, R.; Pendyala, R. and ilhelmson, B.: "A conceptual analysis of the impact of travel demand management on private car use". *Transport Policy*, Vol. 9, pp. 59-70, January, 2002.
- Gartner, N. H.: "Optimal Traffic Assignment with Elastic Demands: A Review, Part II: Algorithmic Approaches". *Transport Science*, 14(2), pp. 192-208, 1980.
- Golov, T. F; Seyoung K. and Weiping, R.: "How households use different types of vehicles: a structural driver allocation and usage model". *Transportation Research, Part A*, Vol. 30, pp. 103-118, March, 1996.
- Gomes, L. F. A. M. & Aör, A. S. P.: "Otimização do Sistema de Estacionamento no Campus da PUC/RJ". *Ciência e Cultura*, Vol. 35, No 5, pp. 644-652, Maio, 1983
- Gonçalves, N. M.: "Economias de escala em uma linha de ônibus urbano: o enfoque micro-analítico". *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Florianópolis (SC), Brasil, 195p., 1995.*
- Gopimatj, D. A.: "Modeling heterogeneity in discrete choice process: Application to travel demand". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 31, pp. 86-99, January, 1997.
- Han, A. F. and Wilson N. H.: "The Allocation of Buses in Heavily Utilized Networks with Overlapping Routes". *Transportation Research*, 16 B(3), pp. 221-232, 1982.
- Hensher, D. A.: "Stated preference analysis of travel choices: the state of Practice". *Transportation*, Vol. 21, no 2, p. 107-133, Holland, May, 1994.
- Hensher, D. A.: "The imbalance between car and public transport use in urban Australia: why does it exist?". *Transport Policy*, Vol. 5, pp. 193-204, October, 1998.

- Highway Research Board, Highway Capacity Manual, Special Report 87, Washington, D. C., 1965.
- Holroyd E. M. and Scraggs D. A.: "Journey Times by Bus and Car in Central London". Traffic Eng. Control 6, pp. 169-173, 1964.
- Homburger, W. S.: "Transportation and Traffic Engineering Handbook". Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.
- Horn, M. E. T.: "Multi-modal and demand-responsive passenger transport systems: a modeling framework with embedded control system". Transportation Research, Part A: Policy and Practice, Vol. 36, pp. 167-188, February, 2002.
- Hassol, J. L.: "Automobile use, public policy and municipal government: Factors influencing the implementation of alternative transportation policies". Transportation Research, Part A: Policy and Practice, Vol. 30, pp. 77-90, January, 1996.
- Irak, L. D.: "An analysis of relationships between urban form (density, mix, and jobs: housing balance) and travel behavior (mode, trip generation, trip length, and travel time)". Transportation Research, Part A: Policy and Practice, Vol. 30, pp. 76-77, January, 1996.
- Irwin N. A. and Von Cube H. G.: "Capacity Restraint in Multi-Travel Mode Assignment Programs". Highway Res. Board Bull. 347, pp. 258-289, 1962.
- Jimenez, J. J.: "Comparative evaluation of bus transit performance: Case study of Toluca, Mexico, and Philadelphia, Pennsylvania". Transportation Research, Part A: Policy and Practice, Vol. 31, pp. 69-82, January, 1997.
- Jones, P.: "An Overview of Stated Preference Techniques". PTRC: Course: Introduction to Stated Preference Techniques, pp. 1-14, 1991.
- Kadosch, M. "Temps D'attente Dans les Transports Urbains en Commun". R. A. I. R. O. Recherche Opérationnelle 10, pp. 37-54, 1976.



- Karlaftis, M. G. and McCarthy, P.: "Operating subsidies and performance in public transit: an empirical study". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 32, pp. 359-375, September, 1998.
- Kingham, S.; Dickinson, J.; and Copsey, S.: "Travelling to work: will people move of their cars?". *Transport Policy*, Vol. 8, pp. 151-160, April, 2001.
- Kirchhoff, P.: "Public transit research and development in Germany". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 29, pp. 1-7, January, 1995.
- Köhler, U.: "Traffic and transport planning in German cities". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 29, pp. 253-261, July, 1995.
- Korills, Y. A.; Lazar, A. A. and Orda, A.: "Avoiding the Baess Paradox in non-cooperative networks". *Transport Research*, Vol. 36, pp. 211-221, March, 1999.
- Kostyniuk, L. P.: "Theoretical Foundations of Travel Choice Modeling". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 34, pp. 648-651, November, 2000.
- Knight, F. H.: "Some Fallacies in the Interpretation of Social Costs". *Quarterly Journal of Economics*, nº 38, pp. 582-606, 1924.
- Kroes, E. P. and Sheldon, R. J.: "Stated Preference Methods". *Journal of Transport Economics and Policy*, pp. 11-20, January, 1988.
- Lacerda, C. D. de F.: "Uma Proposta de Metodologia Para Análise de Cenários de Estacionamento Utilizando Análise Difusa e Sistema Baseado em Conhecimento". *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Florianópolis, Dezembro, 1989.*
- Land, A. H. and Doig, A. G.: "An Automatic Method for Solving Discrete Programming Problems". *Econometrica*, 28:3, pp. 497-520, 1960.
- LeBlanc, L. J.: "Mathematical Programming Algorithms for Large Scale Network Equilibrium and Network Design Problems". *PH. D. dissertation, Department of Industrial Engineering and Management Sciences, North-western University, 1973.*

- Lo, H. K. and Lin, W. H.: "Are the objective and solutions of dynamic user-equilibrium models always consistent?". *Transportation Research, Part A*, Vol. 34, pp. 137-144, February, 2000.
- Louviere, J. J. "Conjoint Analysis Modeling of Stated Preference - A Review of Theory, Methods, Recent Developments and External Validity". *Journal of Transport Economics and Policy*, pp. 93-119, January, 1988.
- Lyons, D. M.: "Performance measurement in urban transit: A comparative analysis of single and partial measures of transit performance". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 31, pp. 69-72, January, 1997.
- Mackett, R. L. and Edwards, M.: "The impact of new urban public transport systems: will the expectations be met?". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 32, pp. 231-245, May, 1998.
- Mackett, R. L.: "Policies to attract drivers out their cars for short trips". *Transport Policy*, Vol. 8, pp. 295-306, October, 2001.
- McLynn, J. M. and Woronka, T.: "Passenger Demand and Modal Split Models - Report 230, Northeast Corridor Project, U. S. Department of Transport". *Transport Science* – 16(2), pp. 17-28, 1979.
- Manheim, M. L.: "Practical Implications of Some Fundamental Properties of Travel Demand Models". *Highway Res. Rec.* 422, pp. 21-38, 1973.
- Manheim M. L. and Ruiter E. R.: "DODOTRANS: A Decision Oriented Computer Language for Analysis of Multi-Mode Transportation Systems". *Highway Res. Rec.* 314, pp. 135-163, 1970.
- Marrero, G. R.: "Passenger travel demand in the route Gran Canaria-Tenerife: An application of discrete choice models". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 31, pp. 87-95, January, 1997.
- Mayerle, S. F.: "Um Sistema de Apoio à Decisão para o Planejamento Operacional de Empresas de Transporte Rodoviário Urbano de Passageiros". Tese de

- Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Florianópolis – Brasil, 1996.
- Mello, J. C.: “Planejamento dos Transportes”. MacGraw-Hill do Brasil Ltda., São Paulo, 1975.
- Mohring, B.: “Transportation Economics”. Ballinger Publishing Company, Cambridge, Massachusetts, 1976.
- Mokhtarian, P. and Salomon, I.: “How derived is the demand for travel? Some conceptual and measurement considerations”. *Transportation Research, Part A: Vol. 35*, pp. 695-719, September, 2001.
- Mokhtar S. B. and Shetty, C. M.: “Nonlinear Programming – Theory and Algorithms”. John Wiley & Sons, New York, 1979.
- Morikawa, T.: “Incorporating Stated Preference Data in Travel Demand Analysis”. Doctoral Dissertation, p. 203, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA, 1989.
- Murchland, J. D.: “Braess’s Paradox of Traffic Flow”. *Transportation Research* 4(4), pp. 391-394, 1970
- Nagurney, A.: “Equilibrium Modeling, Analysis and Computation: the Contributions of Stella Dafermos”. *Operations Research*, Vol. 39(1), 1991.
- Nagurney, A.: “Network Economics”. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- Netter M.: “Equilibrium and Marginal Cost Pricing on a Road Network with Several Traffic Types”. In *Proceedings of the Fifth International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation, Berkeley (1971)*, G. F. Newell (ed.), American Elsevier, New York, N. Y., 1972.
- Nguyen, S. and James L.: “TRAFFIC – Equilibrium Traffic Assignment Program”. Publication No. 17, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal, 1975.

- Novaes, A. G.: "Modelos em Planejamento Urbano, Regional e de Transporte". Editora Edgar Blücher Ltda, São Paulo, 1981.
- Novaes, A. G.: "Sistemas de Transportes". Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1986.
- Novaes, A. G.: "Introdução aos modelos de participação de mercado em serviços de transporte". pp. 1-15, 1992.
- Novaes, A. G. e Carvalho, M. C. M.: "Market Share Modeling of Intercity Bus Travel in Brazil". Seventh International Conference on Travel Behaviour, Vol. II, pp. 577-588, Chile, 1994.
- Oppenheim, N.: "Urban Travel Demand Modeling: From Individual Choices to General Equilibrium". John-Wiley & Sons, 1995.
- Pas, E. I. and Principio, S. L.: "Braess' Paradox: Some new insights". Transport Research, B31 (3), pp. 265-276, June, 1997.
- Proost, S.; Dender, K. V.; Courcelle, C.; Peirson, J.; Sharp, D.; Vickerman, R.; Gibbons, E.; O'Mahony, M.; Heaney, Q.; van den Bergh, J. and Verhoef, E.: "How large is the gap between present and efficient transport prices in Europe?". Transport Policy, Vol. 9, pp. 41-57, January, 2002.
- Pucher, J.: "The transformation of urban transport in the Czech Republic, 1988-1998". Transport Policy, Vol. 6, pp. 225-236, October, 1999.
- Pucher, J.: "Driving Forces: The Automobile, Its Enemies and the Politics of Mobility". Transportation Research, Part A: Policy and Practice, Vol. 34, pp. 645-648, November, 2000.
- Quandt R. E. and Baumon W. J.: "The Demand for Abstract Transport Modes: Theory and Measurement". J. Reg. Science - 6, pp. 13-26, 1966.
- Reed, T. B.: "Waiting for public transit: The utility of real-time schedule information". Transportation Research, Part A: Policy and Practice, Vol. 31, pp.70-78, January, 1997.

- Rietveld, P.; Bruinsma, F. R. and Vuuren, D. J. V.: "Coping with unreliability in transport chains: A case study for Netherlands". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 35, pp. 539-559, July, 2001.
- Safwat, K. N. A. and Magnanti T. L.: "A Combined Trip Generation, Trip Distribution, Modal Split and Traffic Assignment Model: Work Paper". *Operations Research*, Vol. 10, pp. 62-83, 1982.
- Senna, L. A. D. S.: "Travelers Willing to Pay for Reduction in Travel Time Variability". VI World Conference on Transportation Research, Lion, França, 1992.
- Sheffi, Y.: "Urban transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods". Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1985.
- Smith, P. and Chin, A.: "Automobile ownership and government policy: the economics of Singapore's vehicle quota scheme". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 31, pp. 129-140, March, 1997.
- Song, Y. N.: "Inferring the value of walking time from parking rent data in a diffused CBD model". *Transport Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 31, pp. 79-86, January, 1997.
- Stead, D.: "Transport intensity in Europe – indicators and trends". *Transport Policy*, Vol. 8, pp. 29-46, January, 2001.
- Steg, L; Geurs, K. and Ras, M.: "The effects of motivational factors on car use: a multidisciplinary modeling approach". *Transportation Research, Part A: Policy and practice*, Vol. 35, pp. 789-806, November, 2001.
- Steinberg, R. and Zangwill W. I.: "The Prevalence of Braees Paradox". *Transport Science*, 17(3), pp. 301-318, 1983.
- Stradling, S. G.; Meadows, M. L. and Beatty, S.: "Helping drivers out of their cars integrating transport policy and social psychology for sustainable change". *Transport Policy*, Vol. 7, pp. 207-215, July, 2000.

- Sugie, Y. and Fujiwara, A.: "Dynamic Analysis of Stated Preference for Travel Modes Using Panel Data". Seventh International Conference on Travel Behaviour, Vol. II, pp. 507-518, Chile, 1994.
- Tertoolen, G.; Kreveld D. V. and Verstraten B.: "Psychological resistance against attempts to reduce private car use". Transportation Research, Part A: Policy and Practice, Vol. 32, pp. 171-181, April, 1998.
- Tisato, P.: "Service unreliability and bus subsidy". Transportation Research, Part A: Policy and Practice, Vol. 32, pp. 423-436, August, 1998.
- TRÂNSITO, TRANSPORTES COLETIVOS E COMUNICAÇÕES – TTC. Gerência do sistema de transporte público de passageiros: Planejamento da operação. Brasília: EBTU, 8v, 1988.
- UMTA Urban Transportation Planning System (UTPS) User's Guide, U. S. Department of Transportation, Urban Mass Transportation Administration, Office of Transit Planning Methodology and Technical Support Decision, Washington, D. C., 1976.
- van de Velde, D. M.: "Organizational forms and entrepreneurship in public transport: classifying organizational forms". Vol. 6, pp. 147-157, July, 1999.
- Vasconcellos, E. A.: "The demand for cars in developing countries". Transportation Research". Part A: Policy and Practice, Vol. 31, pp. 245-258.
- Wardman, M.: "Stated Preference Methods and Travel demand Forecasting: Na Examination of the Scale Factor Problem". Transportation Research, Part A, Vol. 25A, No. 2, pp. 79-89, 1991.
- Wardrop J. G.: "Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research". Proc. Instn. Civ. Engrs., Part 2, pp. 325-378, 1952.
- Wigan M. R. and Banford T. J. G.: "Equilibrium Model of Bus and Car Travel Over a Road Network". Report LR 559, Transport and Road Research Laboratory, 1973.

- Williams, H. C. W. L.: "On the Formulation of Travel Demand Models and Economic Evaluation Measures of User Benefit". *Environment and Planning, A* 9(3), pp. 285-344, 1977.
- Yang, H. and Bell, M. G. H.: "A capacity paradox in network design and how to avoid it". *Transport Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 31, pp. 539-545, September, 1998.
- Yoon, J.: "The structure of aggregate travel demand in the United States and the Netherlands: An Application to predict modal shares under the goal of the sustainable development program". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 31, pp. 87-94, January, 1997.
- Zhang, J.: "Traffic assignment models with multiple user class". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 31, pp. 77-78, January, 1997.
- Zhang, Y.: "Parameter estimation for combined models of urban travel choices consistent with equilibrium travel costs". *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 31, pp. 86-94, January, 1997.

.....

Apêndice 1

**Problemas de equilíbrio em redes de transporte  
(Exemplos)**



## Problemas de equilíbrio em redes de transporte (Exemplos)

### Exemplo – 01:

Considere-se uma rede hipotética como a apresentada na figura A1.1 deste Apêndice. Esta rede está composta pelos centróides  $C_1, C_2, C_3, C_4$  e  $C_5$ ,<sup>37</sup> com 7 nós de conexão.

Considere-se a função de performance tal como na expressão (4.19) do modelo de **Florian (1977)** apresentado no Capítulo 4:  $t_a(x_a) = t_a^0 \left[ 1 + \lambda_a \left( \frac{x_a}{c_a} \right)^{\pi_a} \right]$ , onde:

$t_a^0$  é o tempo de viagem de fluxo livre;  $x_a$  é o fluxo no arco  $a$ ; e  $c_a$  é a capacidade do arco  $a$ .<sup>38</sup>

Além do mais, considerem-se as demais informações sobre a rede mencionada acima as quais estão dispostas na tabela A1.1 a seguir.

Arco (a)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
$t_a^0$ (minutos)	3	4	5	4	1	2	1	3	4	5	4	1	2	1	2	2	1	1	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1
$c_a$	4000	2000	2000	4000	4000	2000	4000	4000	2000	2000	4000	4000	-	4000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela A1.1: dados de tempo de fluxo livre e capacidade dos arcos

onde foram adotados  $\lambda = 1,15$  e  $\pi = 4$  para todos os arcos, como se observa na tabela acima, exceto para os *Links* de acesso os quais adotou-se  $\lambda = 0$  e  $\pi = 1$ , de modo a manter o tempo de viagem constante.

O problema de equilíbrio é:

$$\text{Min. } \sum_a \int_0^{X_a} t_a(w) dw$$

<sup>37</sup> Se o número de usuários que embarcam e/ou desembarcam de um veículo num determinado trecho (ou arco) da rede é significativo, ou mesmo se os automóveis tiverem muitos deslocamentos curtos, então este trecho passa a ser relevante em termos de demanda de tráfego, e assim, na identificação dos “centróides”. Estes “centróides” são pontos (representando, por exemplo, um bairro de uma cidade) geradores ou atratores de tráfego ou demanda. Não obstante, na rede tem-se que diferenciar “nó” de “centróide”: existem os nós simples que são pontos de conexão ou interseção de vias que, de modo geral, não representam pontos de geração de tráfego ou demanda; e existem aqueles nós que são chamados de centróides. Por sua vez, “*Links*” ou arcos são ligações entre os nós.

<sup>38</sup> Segundo **Braston (1976)** *Apud Florian (1977)*, esta é a forma funcional mais geral para uma função de performance.

$$\text{Sujeito a: } \sum_k f_k^{rs} = q_{rs} \quad \forall r, s$$

$$x_a = \sum_k \sum_{rs} f_k^{rs} \delta_{ak}^{rs} \quad \forall a$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s$$

onde:  $f_k^{rs}$  é o fluxo no caminho  $k$  que conecta o par origem-destino definido por  $r$  e  $s$ ;  $q_{rs}$  é a demanda com origem em  $r$  e destino  $s$ ; e  $\delta_{ak}^{rs}$  assume os valores 1 ou 0 conforme, respectivamente, o caminho  $k$  usa ou não o arco  $a$ .

Suponha-se uma matriz OD (origem – destino) como abaixo:

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	0	500	200	700	400
C2	300	0	300	500	600
C3	100	100	0	400	300
C4	200	300	450	0	200
C5	200	400	300	600	0

Resolvendo o problema no “SoftWare” GAMS (*General Algebraic Modeling System*) obteve-se os seguintes resultados:

**FLUXO NO CAMINHO K (1, 2, ..., 8) QUE CONECTA OS CENTRÓIDES  $C_i$  e  $C_j$**

	1	2	3	4	7
C1.C2	500				
C1.C3	200				
C1.C4	502	198			
C1.C5				400	
C2.C1	300				
C2.C3		300			
C2.C4		500			
C2.C5			111		489
C3.C1	100				
C3.C2	037	063			
C3.C4	400				
C3.C5			224	076	
C4.C1		200			
C4.C2				300	
C4.C3	496	004			
C4.C5	200				
C5.C1		024		176	
C5.C2				400	
C5.C3			300		
C5.C4	600				

**FLUXO NO ARCO "A"**

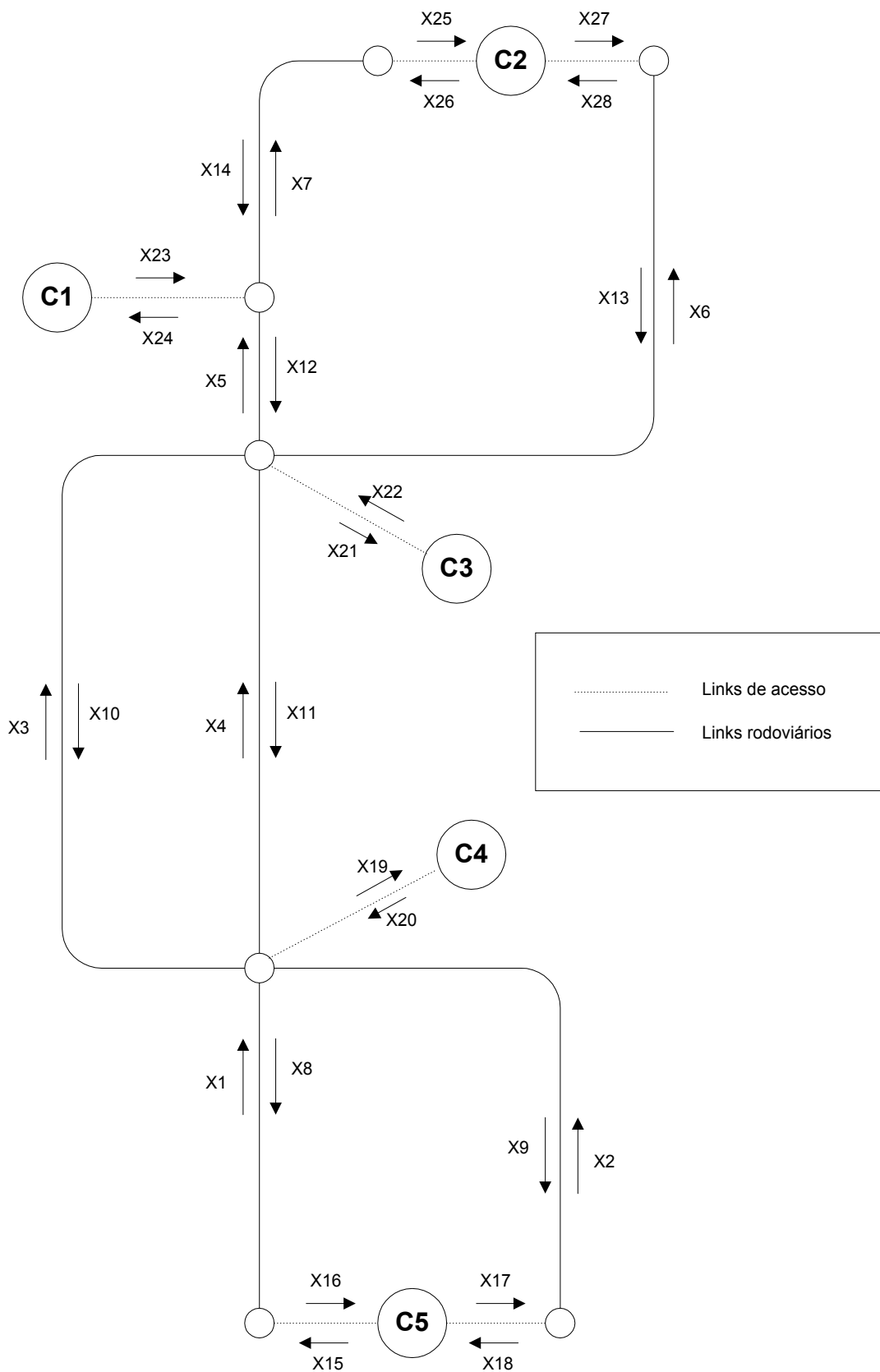
A1	1.024	A2	0.476	A3	0.496	A4	1.404	A5	0.537	A6	0.763
A7	0.537	A8	1.024	A9	0.476	A10	0.902	A11	1.998	A12	1.011
A13	0.789	A14	0.911	A15	1.024	A16	1.024	A17	0.476	A18	0.476
A19	2.200	A20	1.200	A21	1.300	A22	0.900	A23	1.800	A24	0.800
A25	0.537	A26	0.911	A27	0.789	A28	0.763				

**TEMPO DE VIAGEM NO ARCO "A"**

A1	3.309	A2	4.309	A3	5.455	A4	5.455	A5	1.008	A6	3.016
A7	1.008	A8	3.309	A9	4.309	A10	9.972	A11	9.972	A12	1.098
A13	3.163	A14	1.065	A15	2.000	A16	2.000	A17	1.000	A18	1.000
A19	2.000	A20	2.000	A21	2.000	A22	2.000	A23	3.000	A24	3.000
A25	2.000	A26	2.000	A27	1.000	A28	1.000				

Note-se que os resultados são consistentes. Embora, neste exemplo, todos os arcos tenham fluxo, mesmo que pequeno, o tempo de viagem neste arco é próximo do tempo mínimo.

Note-se que neste problema ainda não aparece a questão do transporte público ônibus. Além do mais, está se levando em consideração apenas o tempo de viagem como fator de desutilidade.

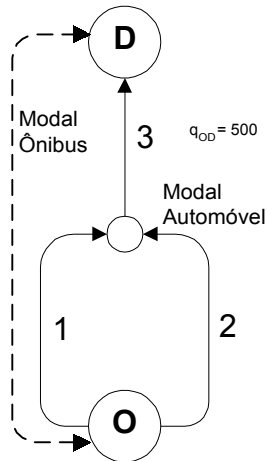


**Figura A1.1:** uma rede hipotética

De acordo com o exemplo acima, o caminho mais curto de **C4** até **C2** é aquele que compreende os arcos 20, 4, 6 e 28, ao qual está associado um tempo de viagem igual a 9 minutos nas condições de fluxo livre. O tempo neste caminho mais curto é denotado por **Florian** de  $u_{42}$ . Na situação de equilíbrio, todos os usuários estariam passando por este caminho. Assim, deve existir fluxo somente neste caminho. Isto acontece porque nos demais caminhos o tempo de viagem é maior que o tempo mínimo. Esta situação satisfaz as equações (4.13a) e (4.13b) do modelo de equilíbrio de **Florian**: para os caminhos onde a soma dos tempos é igual ao tempo mínimo, para um dado par O-D, então o fluxo será maior ou igual a zero, isto é, para os caminhos nos quais se tem fluxo, a soma dos tempos de viagem será igual ao tempo mínimo; por outro lado, se o tempo de viagem é maior do que o tempo mínimo observado, então o fluxo será zero.

### Exemplo – 02:

Considere-se, um outro problema hipotético onde se tem apenas uma origem e um destino como mostrado na rede hipotética, conforme figura A1.2 a seguir.



**Figura A1.2:** uma rede hipotética

Considere-se a função utilidade como sendo:

$$U = (-1) \cdot \text{Custo} + (-0,1) \cdot \text{Tempo}$$

para todos os usuários.

Problema:

$$\text{Min. } \sum_a \int_0^{x_a} t_a(w) dw$$

Sujeito a:

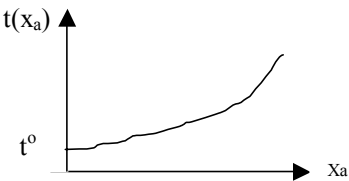
$$\sum_k f_k^{rs} = q_{rs} \quad \forall r, s$$

$$x_a = \sum_k \sum_{rs} f_k^{rs} \delta_{ak}^{rs} \quad \forall a$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s$$

onde:  $f_k^{rs}$  é o fluxo no caminho  $k$  que conecta o par origem-destino definido por  $r$  e  $s$ ;  $q_{rs}$  é a demanda com origem em  $r$  e destino  $s$ ; e  $\delta_{ak}^{rs}$  assume os valores 1 ou 0 conforme, respectivamente, o caminho  $k$  usa ou não o arco  $a$ .

A função de performance considerada para os arcos é:

$$t_a(x_a) = t_a^o \left[ 1 + \lambda_a \left( \frac{x_a}{c_a} \right)^{\pi_a} \right]$$


Neste exemplo, adotou-se como:

a) arco 1:  $\lambda = 1,50$ ,  $\pi = 4$ , e  $c_a = 200 \rightarrow t_1 = 10' + 15 \left( \frac{x_1}{200} \right)^4$ ;

b) arco 2:  $\lambda = 1,67$ ,  $\pi = 4$ , e  $c_a = 400 \rightarrow t_2 = 12' + 20 \left( \frac{x_2}{400} \right)^4$ ;

c) arco 3:  $\lambda = 1,00$ ,  $\pi = 4$ , e  $c_a = 500 \rightarrow t_3 = 10' + 10 \left( \frac{x_3}{500} \right)^4$ .

Considere-se:

$u_{pq}^{\hat{o}} = 36'$   $\rightarrow$  é o tempo de viagem de ônibus;

$C_{\hat{o}} = 1 \$$   $\rightarrow$  é o custo da viagem de ônibus;

$u_{pq}^{au} = 20'$   $\rightarrow$  é o tempo de viagem de automóvel;

$C_{au} = 0,08 \times 20 = 1,60 \$$   $\rightarrow$  é o custo da viagem de automóvel, onde 0,08 \$/min. é o custo por minuto.

Alternativas:

$A_A = (20' ; 1,60)$   $\rightarrow$  alternativa automóvel;

$A_{\hat{o}} = (36' ; 1,00)$   $\rightarrow$  alternativa ônibus.

Utilidades:

$U_A = (-1) \cdot 1,60 + (-0,1) \cdot 20 = -3,6$ ;

$U_{\hat{o}} = (-1) \cdot 1,00 + (-0,1) \cdot 36 = -4,6$ .

Probabilidades:

$P(A) = \frac{e^{-3,6}}{e^{-3,6} + e^{-4,6}} = 73,10586\%$  é a demanda de automóvel em relação à demanda de ônibus;

e

$P(\hat{O}) = \frac{e^{-4,6}}{e^{-4,6} + e^{-3,6}} = 26,89414\%$  é a demanda de ônibus em relação à demanda de automóvel.

Considerando que a demanda total de passageiros entre a origem **O** e o destino **D** é  $q_{OD} = 500$ , tem-se:

$$q_A = 500 \cdot 0,7310586 = 365,53 \text{ é a demanda por automóvel;}$$

e

$$q_{\hat{O}} = 500 \cdot 0,2689414 = 134,47 \text{ é a demanda por ônibus.}$$

E o problema de equilíbrio é:

$$\text{Min} \int_0^{x_1} \left[ 10 + 15 \left( \frac{w}{200} \right)^4 \right] dw + \int_0^{x_2} \left[ 12 + 20 \left( \frac{w}{400} \right)^4 \right] dw + \int_0^{x_3} \left[ 10 + 10 \left( \frac{w}{500} \right)^4 \right] dw$$

Sujeito a:

$$x_1 + x_2 = 365,53$$

$$x_1 \geq 0$$

$$x_2 \geq 0$$

$$x_3 \geq 0$$

$$x_1 + x_2 = x_3$$

Integrando a expressão acima, aplicando os limites de integração e resolvendo o problema, resulta:

$$X_1 = 132,60 \quad ; \quad X_2 = 184,17 \quad ; \quad X_3 = 316,77.$$

Estes fluxos determinam os seguintes tempos de viagem:

$$t_1 = 12,90 \quad ; \quad t_2 = 12,90 \quad ; \quad t_3 = 11,61$$

e portanto o tempo de caminho mínimo da modalidade automóvel é  $\mathbf{u}_{OD}^{au} = 24,51$ .



Este problema foi implementado na planilha “*Microsoft Excel*”, cujos procedimentos para se obter a solução apresentada acima são descritos a seguir.

Solução inicial:

Corresponde a solução de fluxo nulo. Considera-se que toda a demanda está sendo atendida pelo modal ônibus. Assim, os tempos de viagem nos arcos serão os tempos de fluxo livre correspondentes, conforme pode ser observado na tabela A1.2 a seguir.

ARCO	T0	LAMBDA	PI	CAP	FLUXO	TA	INTEGRAL	
1	10,00	1,50	4,00	200,00	0,00	10,00	0,00	
2	12,00	1,67	4,00	400,00	0,00	12,00	0,00	
3	10,00	1,00	4,00	500,00	0,00	10,00	0,00	
<b>SOMA</b>								0,00

Tabela A1.2: solução inicial onde: **T0** é tempo de fluxo livre no arco; **TA** é o tempo de viagem de automóvel no arco; “Lambada” e “PI” são constantes na função de performance para cada arco; **CAP** é a capacidade do arco.

Considerando o tempo de viagem total pelo modal automóvel, a demanda será distribuída segundo o modelo *Logit*, conforme tabela A1.3. A demanda por automóvel será utilizada na primeira iteração, para fim de equilíbrio na rede de transporte.

	Tempo	Custo	Utilidade	Exp(Util)	Fluxo
<b>Auto</b>	20,00	1,60	-3,60	0,027324	365,53
<b>Onibus</b>	36,00	1,00	-4,60	0,010052	134,47

### 1ª Iteração:

Nesta iteração considera-se, como ponto de partida, a demanda por automóvel ( $q_A = 365,53$ ) calculada na tabela A1.3 acima. Resolvendo o problema de equilíbrio, obtém-se a solução apresentada na tabela A1.4.

ARCO	T0	LAMBDA	PI	CAP	FLUXO	TA	INTEGRAL	
1	10,00	1,50	4,00	200,00	142,97	13,92	1.541,69	
2	12,00	1,67	4,00	400,00	222,56	13,92	2.756,06	
3	10,00	1,00	4,00	500,00	365,53	12,86	3.864,12	
<b>SOMA</b>								8.161,86

Tabela A1.4

E com base nisto, obtém-se a distribuição da demanda, calculada pelo modelo *logit*, conforme mostra a tabela A1.5.

	Tempo	Custo	Utilidade	Exp(Util)	Fluxo
<b>Auto</b>	26,77	1,60	-4,28	0,013880	289,99
<b>Onibus</b>	36,00	1,00	-4,60	0,010052	210,01

### 2ª Iteração:

Nesta iteração repete-se o procedimento apresentado na 1ª iteração com base no valor 289,99, obtendo-se os resultados mostrados nas tabelas A1.6 e A1.7, e assim sucessivamente até se atingir a solução de equilíbrio na 8ª iteração (com a diferença entre os tempos de viagem de automóvel, entre uma iteração e outra, sendo menor que um **erro** pré-fixado suficientemente pequeno), conforme tabelas A1.8 e A1.9 as quais apresentam o resumo de todas as iterações realizadas.

ARCO	T0	LAMBDA	PI	CAP	FLUXO	TA	INTEGRAL	
1	10,00	1,50	4,00	200,00	128,23	12,53	1.347,33	
2	12,00	1,67	4,00	400,00	161,76	12,53	1.958,40	
3	10,00	1,00	4,00	500,00	289,99	11,13	2.965,52	
<b>SOMA</b>								6.271,25

Tabela A1.6

	Tempo	Custo	Utilidade	Exp(Util)	Fluxo
<b>Auto</b>	23,67	1,60	-3,97	0,018937	326,63
<b>Onibus</b>	36,00	1,00	-4,60	0,010052	173,37

Tabela A1.7

### Resumo das iterações:

ITERAÇÃO	DEMANDA		FLUXOS ARCOS AUTO			TEMPOS ARCOS AUTO			TEMPO DE VIAGEM	ERRO (%)
	AUTO	ONIBUS	1	2	3	1	2	3		
0	0,00	500,00	0,00	0,00	0,00	10,00	12,00	10,00	20,00	
1	365,53	134,47	142,97	222,56	365,53	13,92	13,92	12,86	26,77	33,85
2	289,99	210,01	128,23	161,76	289,99	12,53	12,53	11,13	23,67	11,58
3	326,63	173,37	134,47	192,16	326,63	13,07	13,07	11,82	24,89	5,15
4	312,56	187,44	131,85	180,71	312,56	12,83	12,83	11,53	24,36	2,13
5	318,69	181,31	132,96	185,73	318,69	12,93	12,93	11,65	24,58	0,90
6	316,14	183,86	132,49	183,65	316,14	12,89	12,89	11,60	24,49	0,37
7	317,22	182,78	132,69	184,53	317,22	12,91	12,91	11,62	24,53	0,16
8	316,77	183,23	132,60	184,17	316,77	12,90	12,90	11,61	24,51	0,08

Tabela A1.8

	Tempo	Custo	Utilidade	Exp(Util)	Fluxo
Auto	24,51	1,60	-4,05	0,017405	316,96
Onibus	36,00	1,00	-4,60	0,010052	183,04

Tabela A1.9

O sistema está em equilíbrio na medida em que ambos os caminhos da rede de transporte por automóvel apresentam tempos de viagem iguais, uma vez que existe fluxo nos mesmos. Por outro lado, nota-se que a distribuição da demanda total entre os modais automóvel e ônibus, considerando os respectivos tempos de viagem, são compatíveis com o modelo *logit*.

Neste segundo exemplo, foi incorporado o modal ônibus, embora não exista interação entre ônibus e automóvel. Além disso, a demanda total de passageiros entre o par O-D é distribuída por modal segundo o modelo *logit*, onde a utilidade é função do tempo e do custo da viagem.

## Apêndice 2

**Aplicação do modelo de planejamento de oferta de serviços de um sistema de transporte público multimodal no Corredor Sudoeste da cidade de Florianópolis (SC)**

## **Aplicação do modelo de planejamento de oferta de serviços de um sistema de transporte público multimodal no Corredor Sudoeste da cidade de Florianópolis (SC)**

Neste apêndice, são apresentadas as etapas para a aplicação do modelo de planejamento de oferta de serviços de um sistema de transporte público multimodal no Corredor Sudoeste da cidade de Florianópolis (SC), de acordo com a metodologia apresentada na seção 5.6.

### **I - Configuração da rede**

A área de estudo está localizada na região centro sul da Ilha de Santa Catarina, sendo interligado o centro da cidade de Florianópolis com o bairro Carianos, localizado próximo ao Aeroporto Internacional Hercílio Luz, conforme mostram as figuras A2.1 e A2.2. A rede correspondente ao Corredor Sudoeste está apresentada esquematicamente na figura A2.3 onde se pode observar mais detalhadamente a localização dos centróides, nós e arcos que a compõe. A linha do Corredor Sudoeste, operada pela Empresa Ribeironense Ltda, compreende os bairros: Carianos (CA), Costeira do Pirajubaé (CO) e Saco dos Limões (SL), além do Centro da cidade (CE).

O arco SL-CE (Saco dos Limões – Centro) é utilizado, também, pela linha “Volta ao Morro” (saída Norte e saída Sul), operada pela Empresa Transol Ltda, bem como pelas linhas que servem aos bairros localizados na região sul da Ilha de Santa Catarina, operada pela Empresa Ribeironense Ltda. Assim, este trecho ou arco não conta efetivamente em termos de demanda para o Corredor Sudoeste. Mais precisamente neste trecho não há embarque de passageiros nos ônibus da linha do Corredor Sudoeste.

Neste estudo, considera-se que o usuário realiza o percurso a pé desde a sua residência até o ponto de ônibus mais próximo, bem como desde o estacionamento (ou ponto de desembarque) até o destino final da viagem. Na tabela A2.1 são apresentados os tempos correspondentes a estes percursos.

Percurso a pé		Tempo (minutos)
CA	Ponto de ônibus	17
CO	Ponto de ônibus	12
SL	Ponto de ônibus	17
Terminal	Destino Final	8
Estacionamento	Destino Final	6

Tabela A2.1: tempos de percurso a pé estimados

Considerando que o tempo de viagem varia com o fluxo, foi realizada uma contagem de tráfego (veículos/minuto) no início do arco CO-SL, entre os horários de 07:00h e 09:00h. Nestes mesmos horários fez-se tomada do tempo (em segundos) que um veículo gasta para percorrer uma distância de 40,0 metros (entre dois postes de luz da rede elétrica) para se calcular a velocidade média deste veículo. De posse do comprimento do trecho CO-SL, pode-se obter o tempo de viagem gasto por um veículo, viajando nesta velocidade, para realizar o percurso neste trecho. Estes resultados estão na tabela A2.2 a seguir.

Horário	Fluxo (veículos/minuto)	tempo de viagem no arco (minutos)
07:30	32	25
08:00	25	20
08:30	17	15
09:00	13	5

Tabela A2.2: dados observados de fluxo e correspondentes tempos no arco CO-SL.

As informações sobre a capacidade e os tempos de fluxo livre para os arcos da rede estão na tabela A2.3 a seguir.

Trecho	Capacidade	Tempo de fluxo livre
CA-CO	1600 veículos/hora	7min. (ou 7/60 horas)
CO-SL	800 veículos/hora	5min. (ou 5/60 horas)
SL-CE	1500 veículos/hora	8min. (ou 8/60 horas)

Tabela A2.3: dados de capacidade e tempos de fluxo livre

Considerando os dados nas tabelas A2.2 e A2.3 acima, o tempo de viagem  $t_{a,p}$  foi ajustado em função do fluxo  $x_{a,p}$  pela expressão  $t_{a,p} = t_a^{\min} \left[ 1 + \lambda_a \frac{x_{a,p}}{C_a} \right]^{\pi_a}$  fornecendo valores de  $\lambda_a = 0,924$  e  $\pi_a = 1,725$ . Nesta expressão, para o arco em

questão, foram considerados valores de capacidade ( $C_a = 800$  veículos/hora) e tempo de fluxo livre ( $t_a^{min} = 5$  minutos). Na impossibilidade de se fazer a coleta de dados para todos os arcos, foram adotados os mesmos valores  $\lambda_a = 0,924$  e  $\pi_a = 1,725$  para os demais arcos. Tem-se a seguir, o gráfico referente aos dados contidos na tabela A2.2.

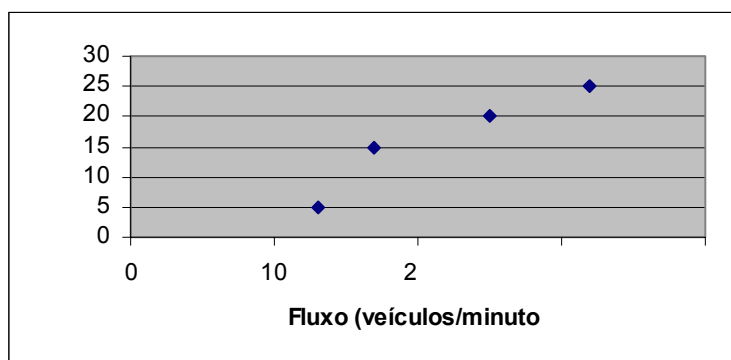


Gráfico A2.1: fluxo x tempo de viagem

Tempo de viagem do modal público é igual ao tempo de viagem do modal privado, acrescido de uma constante  $\alpha_m$  (tempo médio de embarque e desembarque do usuário do modal público  $m$ ) multiplicada pelo respectivo fluxo de passageiros transportados, dividido pelo número de viagens, conforme apresentado na equação 5.5 do Capítulo 5. Estudos em **TTC (1998, pág. 87)** mostraram que: para um ônibus com duas portas, uma de entrada e outra de saída, de tamanho padrão, os tempos de embarque e desembarque são, respectivamente, 2,5 segundos e 2,0 segundos; com duas portas, uma de entrada e outra de saída, mas com a porta de saída mais larga (dupla), os tempos de embarque e desembarque são, respectivamente, 1,2 segundos e 0,8 segundos. Na impossibilidade do modelo poder distinguir usuários que embarcam de usuários que desembarcam, foram adotados:  $\alpha_2 = 2,5$  segundos (0,0006944 horas) para o modal público convencional e  $\alpha_3 = 4,5$  segundos = 2,5s + 2,0s (0,00125 horas) para o modal público executivo. Este valor de  $\alpha_3 = 4,5$  segundos se deve ao fato do modal executivo ter somente uma porta que serve tanto para o embarque como também para o desembarque, e por conseguinte dois passageiros não podem embarcar e desembarcar ao mesmo tempo. Além do mais, o motorista do modal executivo gasta parte do tempo da

viagem na tarefa de cobrar do usuário a passagem, geralmente no momento do desembarque, o que não acontece com o modal convencional que tem o cobrador.



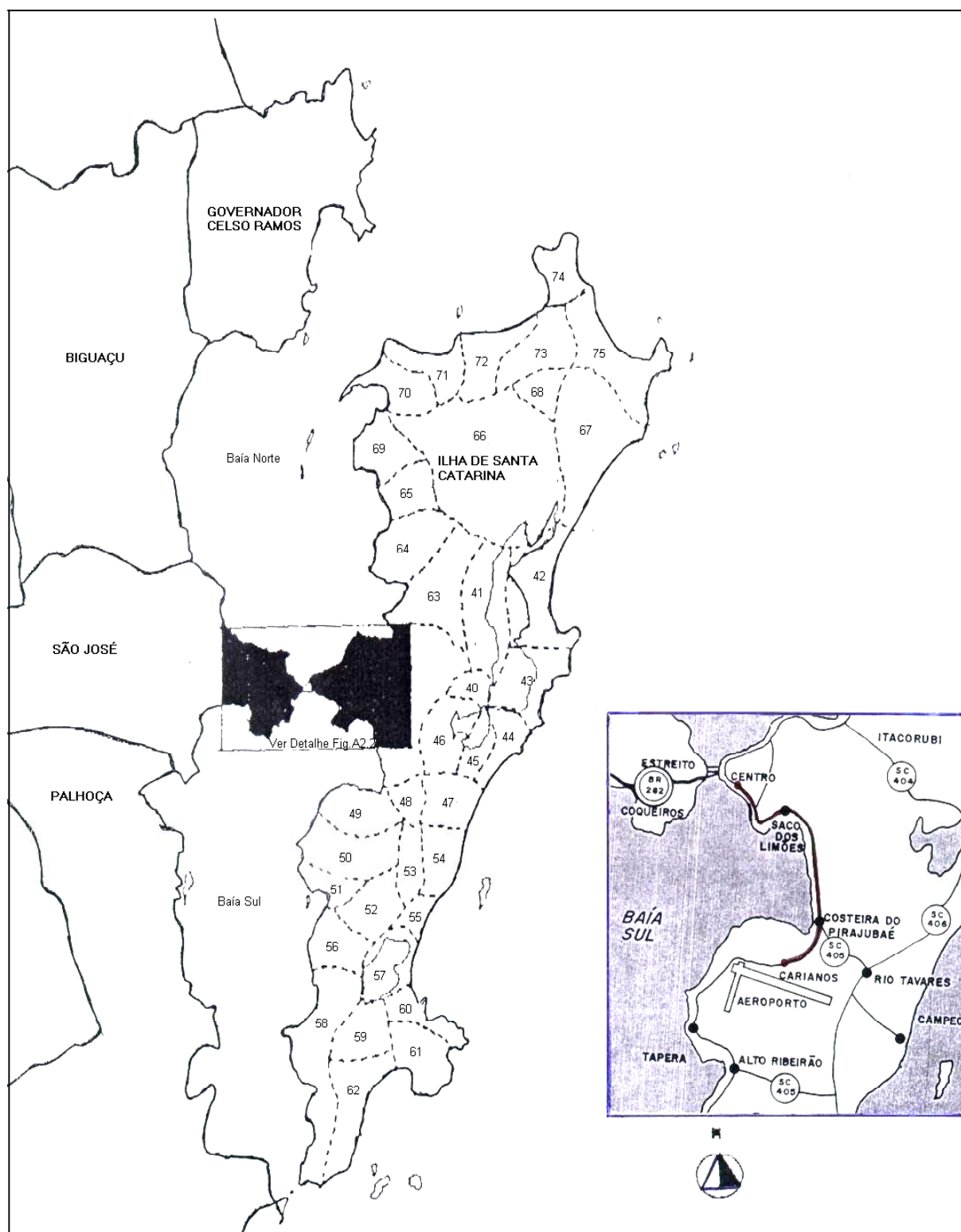


Figura A2.1: zoneamento de tráfego (1993) realizado pelo Núcleo de Transporte do Município de Florianópolis (SC).

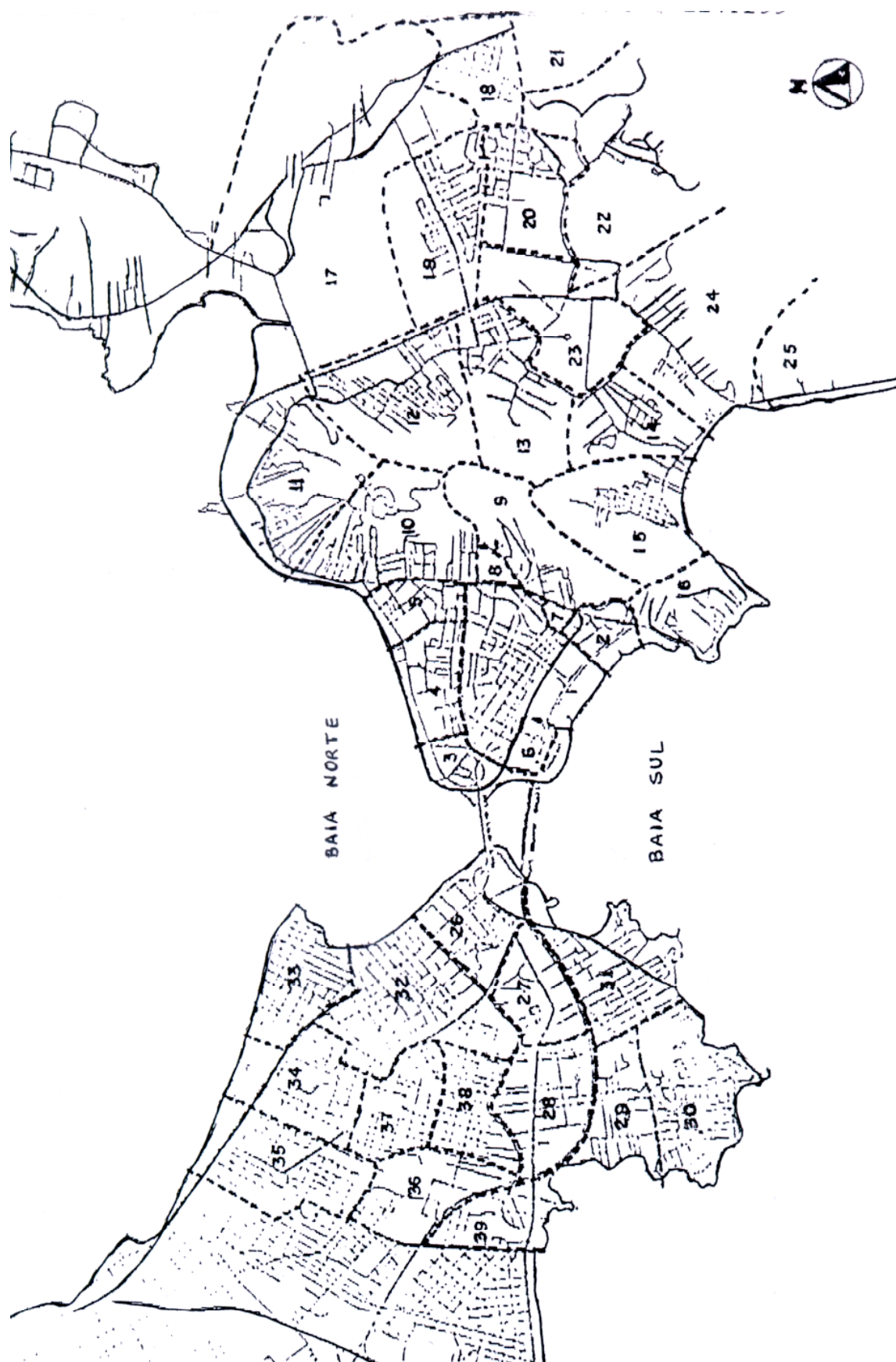


Figura A2.1: zoneamento de tráfego (1993) realizado pelo Núcleo de Transporte do Município de Florianópolis (SC).

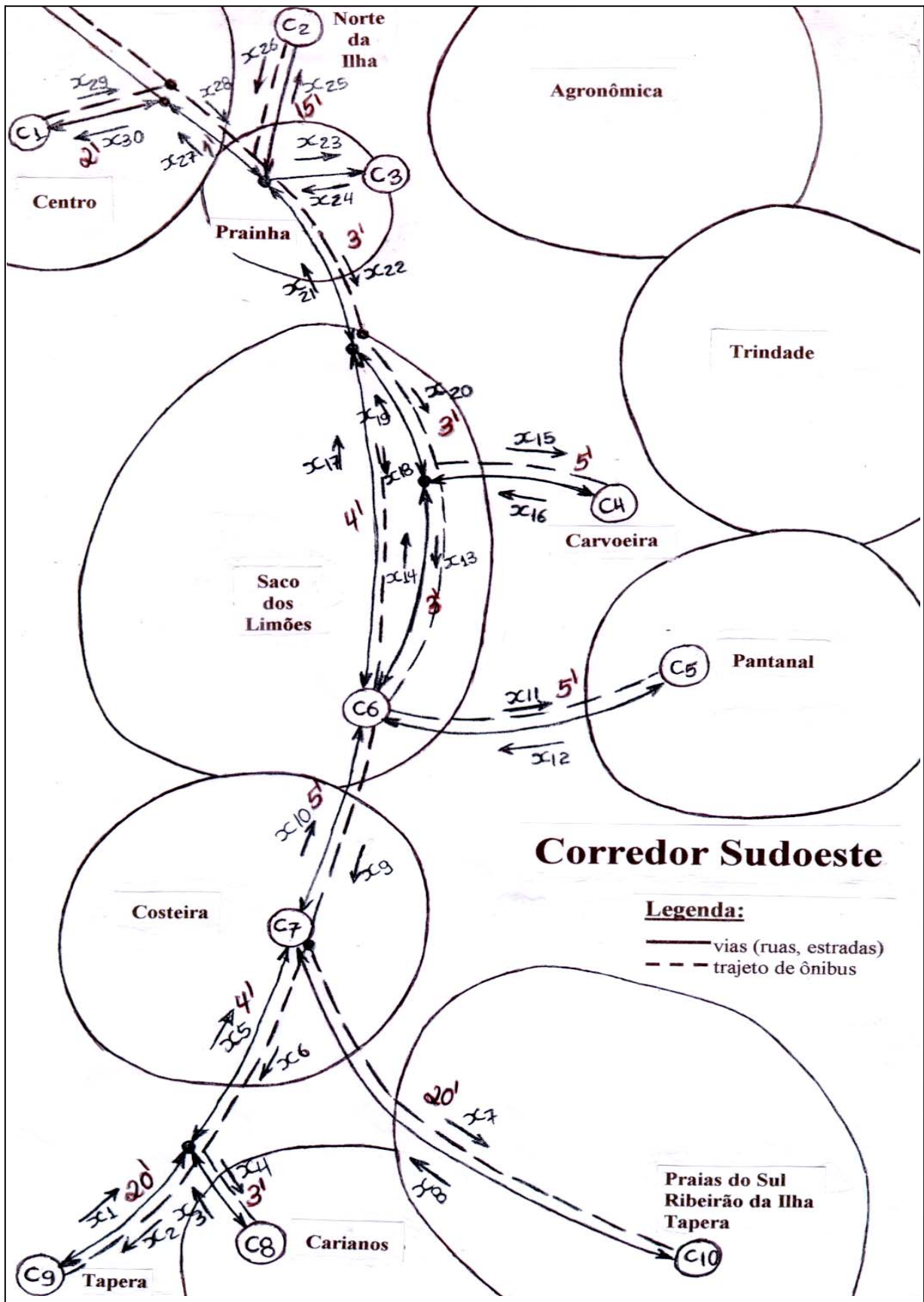


Figura A2.3: rede correspondente à linha do Corredor Sudoeste, contendo os arcos conectando os vários centróides e nós, direções dos fluxos e correspondentes tempos de fluxo livre (em minutos).

- a) obtenção da matriz de demanda de passageiros de ônibus (modal público);
- b) determinação dos períodos típicos de demanda;
- c) determinação do fluxo de automóveis (modal privado);
- d) determinação da demanda total (de automóvel e ônibus).

## II.a - Obtenção da matriz de demanda de passageiros de ônibus

Esta matriz foi obtida com uma certa dificuldade com respeito à disponibilidade de dados:

- 1º) o Núcleo de Transporte do Município disponibilizou uma matriz contendo dados de demanda de passageiros entre cada uma das 75 zonas de tráfego conforme zoneamento mostrado nas figuras A2.1 e A2.2. Estes dados de demanda são referentes ao ano de 1993;
- 2º) foi elaborado um programa no qual esta matriz O-D original foi transformada para representar as demandas dos pares O-D que se utilizam dos arcos do Corredor Sudoeste;<sup>39,40,41</sup>

Considerando o procedimento acima, a matriz contendo os dados de demanda referentes ao ano de 1993 para o Corredor Sudoeste é apresentada na tabela A2.4 a seguir.

<sup>39</sup> Cada demanda da matriz O-D original a qual faz uso de algum arco da rede em estudo é alocada a um par de centróides em uma matriz de dimensão menor, onde apenas são considerados os centróides de interesse da região de estudo.

<sup>40</sup> Alguns passageiros realizam viagem com origem em pontos dentro do Corredor Sudoeste (na ida tem-se CA--CO--CE e na volta CE--CO--CA). São passageiros que, por exemplo, saem do Carianos (CA) [zona 48] e vão somente até CO [zona 25] ou SL [zona 15] ou CE [zona 1]; ou que saem de CA [zona 48] em direção ao norte da ilha [zonas 41 e 42, 63 a 75] e, portanto, deverão ir até o Centro (CE) [zona 1] para tomar outro ônibus.

<sup>41</sup> Outros passageiros de outras linhas apenas utilizam arcos do trajeto do Corredor Sudoeste, como por exemplo: a linha da Empresa Transol Ltda a qual utiliza o trecho SL-CE (ou CE-SL); a linha de ônibus da Empresa Ribeironense Ltda que transporta passageiros do Sul da Ilha [zonas 47 a 62] com destino ao Centro; a linha da Empresa Ribeironense Ltda que transporta passageiros do bairro da Tapera [zona 49], passando pela Base Aérea, com destino ao Centro; a linha da Empresa Ribeironense Ltda a qual transporta passageiros do bairro da Tapera [zona 49], passando pela Base Aérea, com destino à Universidade Federal de Santa Catarina. Estas linhas contribuem para o fluxo de veículos no trajeto do Corredor Sudoeste e, por conseguinte, precisam ser consideradas. Tais movimentos de passageiros não representam demanda para a linha do Corredor Sudoeste.

MATRIZ OD 1993

	A	B	C	D	E	F	G	H
A						2889	288	
B						43	0	
C						41	0	
D						11	16	
E						641	23	
F	3638	80	272	29	488	141	27	
G	307	0	35	0	24	19	0	
H								

Tabela A2.4: Matriz O-D (1993) para o Corredor Sudoeste

onde:

LEGENDA	
A	Centro (1) + 26 a 39, 41 a 42, 63 a 75
B	Prainha (16)
C	Saco dos Limões (15)
D	Carvoeira (14) + Trindade (23) + 17 a 22
E	Pantanal (24) + Trindade (23) + 17 a 22
F	Costeira (25)
G	Carianos (48)
H	Tapera (49)

Os números de **1** a **75** correspondem às zonas, conforme zoneamento de tráfego (1993) do Núcleo de Transporte da Prefeitura de Florianópolis-SC apresentado nas figuras A2.1 e A2.2.

Os dados desta matriz O-D (1993) foram atualizados para setembro de 2001 a partir de dados de crescimento populacional da área urbana de Florianópolis de 1970 a 2000, conforme mostrados na tabela A2.5 a seguir.

<b>População Residente do Aglomerado Urbano de Florianópolis, 1970 a 2000</b>					
<b>Ano</b>	<b>Florianópolis</b>	<b>Biguaçu</b>	<b>Palhoça</b>	<b>São José</b>	<b>Total</b>
1970*	138.337	15.337	20.652	42.535	216.861
1980*	187.871	21.434	38.031	87.817	147.282
1991*	254.941	34.027	68.298	139.318	496.584
1992	260.593	35.283	71.316	144.453	511.645
3	266.858	36.563	74.394	149.691	527.506
4	272.073	37.870	77.534	155.033	542.510
5	277.156	39.202	80.736	160.483	557.577
6	*271.281	40.561	84.003	166.041	561.886
7	285.279	41.948	87.335	171.710	586.272
8	299.999	42.852	86.861	152.734	582.446
9	315.479	44.804	94.200	183.392	637.875
0	341.781	48.010	102.671	173.239	665.701

Fonte: Fundação IBGE - \*Censo Demográfico de SC, 1991 Anuário Estatístico de SC – 1995  
\* Contagem IBGE

Tabela A2.5: dados de crescimento populacional da área urbana de Florianópolis de 1970 a 2000.

Para a cidade de Florianópolis (SC), primeira coluna, a variação de crescimento nos sete períodos de 1994 a 2000 é igual a  $1,28076 = 341.781 / 266.858$ . E a projeção para o ano de 2001 é a partir da taxa de crescimento de **1,32685** =  $(1,28076)^{8/7}$  correspondente aos oito períodos de 1994 a 2001. Multiplicando-se os valores de demanda da matriz O-D (1993) por 1,32685 obtém-se a atualização das demanda para setembro do ano de 20001, conforme a tabela A2.6 a seguir.

MATRIZ OD 2001

	A	B	C	D	E	F	G	H
A						3834	382	
B						57	0	
C						54	0	
D						15	21	
E						851	31	
F	4828	106	361	38	648	187	36	
G	407	0	46	0	32	25	0	

A demanda total de passageiros de ônibus na linha Corredor Sudoeste é a soma dos elementos da matriz O-D (2001), isto é, 11.771 passageiros.

Observação: Por exemplo, para o trecho CO-SL (ida: Costeira e Saco dos Limões), na tabela A2.6, a soma das demandas FC + FD + FE da matriz O-D (2001) é  $1.047 = 361 + 38 + 648$ . Já o valor **920** para o trecho SL-CO (volta: Saco dos Limões e Costeira), na tabela A2.6, a soma das demandas CF + DF + EF da matriz O-D (2001) é  $920 = 54 + 15 + 851$ .

É preciso determinar a demanda de passageiros para cada arco do Corredor Sudoeste para um dia (24 horas) de operação. Estas demandas estão nas tabelas A2.7, A2.8 e A2.9 a seguir.

DEMANDA	
CA-CO	25
CA-SL	78
CA-CE	407
CO-SL	1.047
CO-CE	4.934

Tabela A2.7: demanda no sentido Bairro-Centro

DEMANDA	
CO-CA	36
SL-CA	52
CE-CA	382
SL-CO	920
CE-CO	3.891

Tabela A2.8: demanda no sentido Centro-Bairro

DEMANDA		
CA-CO	CO-CA	61
CA-SL	SL-CA	130
CA-CE	CE-CA	789
CO-SL	SL-CO	1.967
CO-CE	CE-CO	8.825

Tabela A2.9: demanda, considerando-se os dois sentidos.

## II.b - Determinação dos períodos típicos de demanda

É preciso determinar a distribuição da demanda diária para os vários períodos do dia e para os arcos da rede do Corredor Sudoeste. Os únicos dados de demanda diária de passageiros para a linha do Corredor Sudoeste estão na tabela A2.10 a seguinte. Para o sentido Bairro-Centro foram coletados dados em vários dias da semana compreendendo a faixa de horário entre 05:00h e 08:50h.

<b>DEMONSTRATIVO DA OCUPAÇÃO MÉDIA POR VIAGENS</b>					
Linha: 6101 - Corredor Sudoeste					
Corredor	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta
Saida Bairro	16/abr	17/abr	18/abr	19/abr	20/abr
05:00	9	10	13	17	16
05:15	20	16	13	10	15
05:30	41	28	27	28	28
05:40	24	35	29	36	29
05:47	30	23	31	34	42
05:55	71	42	55	50	43
06:00	37	55	47	49	48
06:05	23	16	8	18	10
06:10	89	92	52	52	55
06:15	36	48	87	65	79
06:20	55	59	77	69	64
06:25	8	53	60	73	81
06:30	58	99	86	42	54
06:35	130	112	120	133	134
06:40	77	91	80	75	86
06:45	92	92	93	98	93
06:50	92	94	94	90	100
06:55	100	105	110	68	98
07:00	106	94	104	98	82
07:05	91	90	92	87	89
07:10	82	94	91	71	81
07:15	55	64	69	88	62
07:20	64	54	31	61	59
07:25	84	43	59	38	46
07:30	36	29	41	49	58
07:35	42	49	62	41	51
07:40	35	33	69	22	47
07:45	63	92	47	87	61
07:50	47	54	43	32	49
07:55	22	30	34	44	59
08:00	13	11	64	69	23
08:05	71	76	33	51	14
08:10	25	70	28	87	70
08:15	6	21	48	29	48
08:20	45	11	29	15	38
08:25	26	7	21	13	37
08:30	39	16	20	7	12
08:40	6	30	17	48	57
08:50	30	0	57	0	50

Tabela A2.10: dados de demanda por viagem, nos horários de pico da manhã, na linha do Corredor Sudoeste.

Ainda falta fazer a distribuição da demanda para cada arco e para os vários períodos do dia, identificando os períodos de maior ou menor demanda. Um gráfico de distribuição de demanda para os horários entre 05:00h e 08:50, segundo a tabela A2.10 acima, é mostrado a seguir.



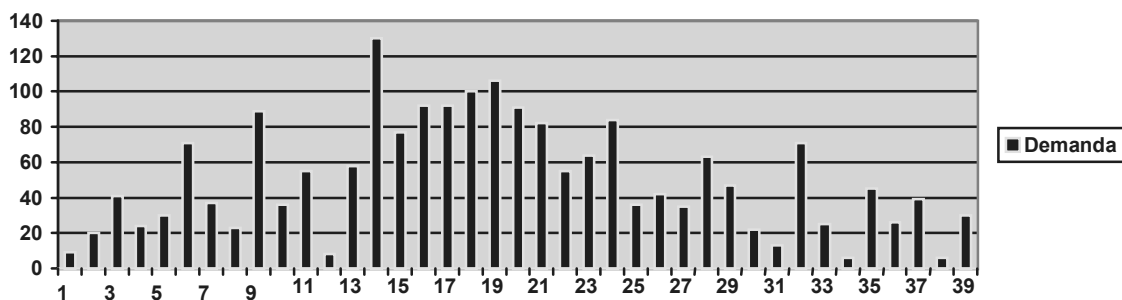


Gráfico A2.2: gráfico de distribuição de demanda referente aos dados da tabela A2.10

Através deste gráfico, pode-se identificar dois períodos distintos onde a demanda é característica:

1º período, de 1 (05:00) a 12 (06:25);

2º período, de 13 (06:30) a 31 (08:00).

Na falta de dados para os demais períodos do dia, recorreu-se aos dados da linha do bairro Abrão de Florianópolis (SC) operada pela Empresa Transol Ltda. Esta linha tem características semelhantes à linha do Corredor Sudoeste. As demandas diárias totais de passageiros em ambas são próximas uma da outra. Além disso, entre os horários de 05:00h e 08:30 as distribuições de demanda de passageiros são quase idênticas. Os dados de demanda da linha Abrão foram obtidos de **Cruz (1999)** e são apresentados nas tabelas A2.11 e A2.12 a seguir.

a) Passageiros transportados no sentido Abrão (bairro) - Centro:

	Hora	Passageiros						
1	05:30	24	42	11:41	37	83	16:58	32
2	05:47	5	43	11:50	35	84	17:08	43
3	06:00	28	44	12:00	45	85	17:15	47
4	06:10	39	45	12:10	35	86	17:31	64
5	06:18	39	46	12:19	65	87	17:35	71
6	06:30	59	47	12:30	69	88	17:43	55
7	06:36	71	48	12:41	79	89	17:48	66
8	06:45	86	49	12:42	98	90	17:50	27
9	06:50	93	50	12:50	79	91	17:59	46
10	07:00	54	51	12:58	95	92	18:02	66
11	07:02	85	52	12:59	45	93	18:10	48
12	07:05	89	53	13:00	58	94	18:15	31
13	07:15	93	54	13:10	90	95	18:17	31
14	07:33	99	55	13:15	80	96	18:23	42
15	07:35	92	56	13:20	82	97	18:28	14
16	07:42	97	57	13:28	44	98	18:48	24
17	07:50	94	58	13:33	100	99	18:55	67
18	07:58	71	59	13:40	79	100	19:06	26
19	08:10	58	60	13:45	60	101	19:24	16
20	08:19	60	61	13:50	50	102	19:37	24
21	08:20	63	62	13:55	36	103	19:41	39
22	08:30	20	63	14:00	34	104	19:50	18
23	08:35	57	64	14:05	15	105	19:55	30
24	08:42	48	65	14:15	82	106	20:13	24
25	08:52	34	66	14:20	50	107	20:23	22
26	09:01	47	67	14:25	40	108	20:31	25
27	09:10	41	68	14:30	44	109	20:47	25
28	09:15	63	69	14:40	32	110	21:06	14
29	09:30	31	70	14:50	84	111	21:25	34
30	09:40	70	71	14:55	54	112	21:32	13
31	09:50	57	72	15:12	75	113	21:48	21
32	09:56	12	73	15:21	26	114	22:05	19
33	10:08	32	74	15:30	72	115	22:28	34
34	10:20	48	75	15:42	42	116	22:31	12
35	10:31	53	76	15:48	21	117	22:38	23
36	10:40	36	77	15:57	51	118	22:53	1
37	10:50	29	78	16:11	21	119	23:05	14
38	10:55	30	79	16:17	36	120	23:16	21
39	11:09	13	80	16:24	33	121	23:35	11
40	11:19	35	81	16:35	8	122	23:41	13
41	11:30	18	82	16:52	45	123	23:45	15
						124	23:59	18

Tabela A2.11: dados de demanda (diária) por viagem na linha do Abrão, no sentido Bairro-Centro, contidos em **Cruz (1999)**.

b) Passageiros transportados no sentido Centro - Abrão (bairro):

	Hora	Passageiros
1	05:48	6
2	06:05	13
3	06:20	16
4	06:33	24
5	06:40	21
6	06:52	13
7	06:59	33
8	07:13	68
9	07:19	29
10	07:23	25
11	07:31	35
12	07:34	29
13	07:43	35
14	07:57	20
15	07:58	71
16	08:00	40
17	08:09	38
18	08:14	7
19	08:23	30
20	08:28	32
21	08:42	35
22	08:45	25
23	08:58	41
24	09:10	22
25	09:20	36
26	09:30	37
27	09:40	73
28	09:50	44
29	09:59	48
30	10:08	43
31	10:20	41
32	10:30	43
33	10:34	67
34	10:50	53
35	10:58	50
36	11:08	67
37	11:18	85
38	11:32	87
39	11:40	87
40	11:45	88
41	11:48	79
42	11:50	94
43	12:00	91
44	12:07	91
45	12:10	94
46	12:20	78
47	12:25	58
48	12:29	41
49	12:35	23
50	12:40	42
51	12:58	46
52	13:15	27
53	13:23	39
54	13:25	11
55	13:26	15
56	13:32	13
57	13:38	19
58	13:43	50
59	14:01	34
60	14:11	15
61	14:17	19
62	14:33	28
63	14:36	47
64	14:50	23
65	14:55	35
66	15:14	17
67	15:18	29
68	15:24	43
69	15:39	62
70	15:51	47
71	16:00	43
72	16:05	60
73	16:10	56
74	16:20	76
75	16:30	56
76	16:40	62
77	16:50	76
78	16:56	95
79	17:05	60
80	17:15	86
81	17:30	68
82	17:40	55
83	17:50	66
84	17:55	80
85	18:01	71
86	18:06	83
87	18:15	82
88	18:16	73
89	18:22	55
90	18:25	72
91	18:34	77
92	18:42	84
93	18:46	73
94	18:54	61
95	19:00	73
96	19:07	76
97	19:15	75
98	19:25	68
99	19:33	61
100	19:40	61
101	19:52	37
102	20:00	64
103	20:15	51
104	20:30	50
105	20:45	86
106	21:00	47
107	21:15	47
108	21:30	32
109	21:45	63
110	22:00	54
111	22:15	66
112	22:30	67
113	22:45	75
114	23:00	84
115	23:15	60
116	23:45	60
117	23:50	16
118	23:59	16

Tabela A2.12: dados de demanda (diária) por viagem na linha do Abrão, no sentido Centro-Bairro, contidos em **Cruz (1999)**.

A seguir, são apresentados os gráficos de distribuição da demanda diária nos dois sentidos.

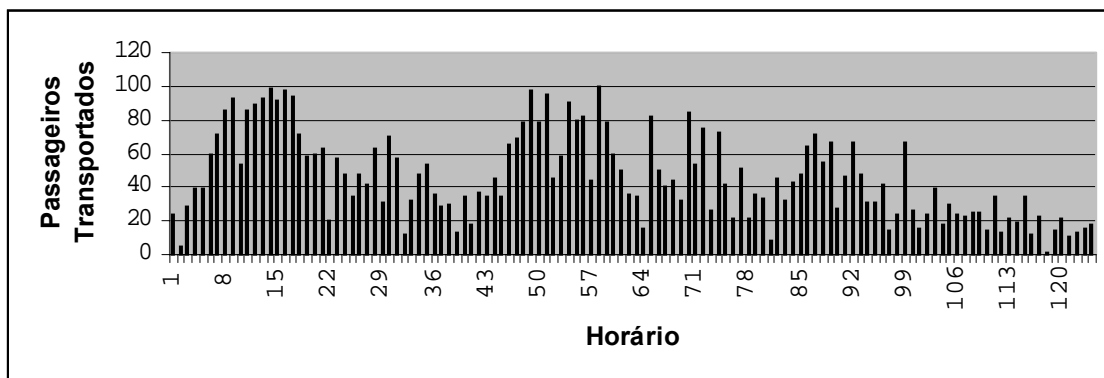


Gráfico A2.3: gráfico de distribuição da demanda (sentido Bairro-Centro), conforme dados da tabela A2.11.

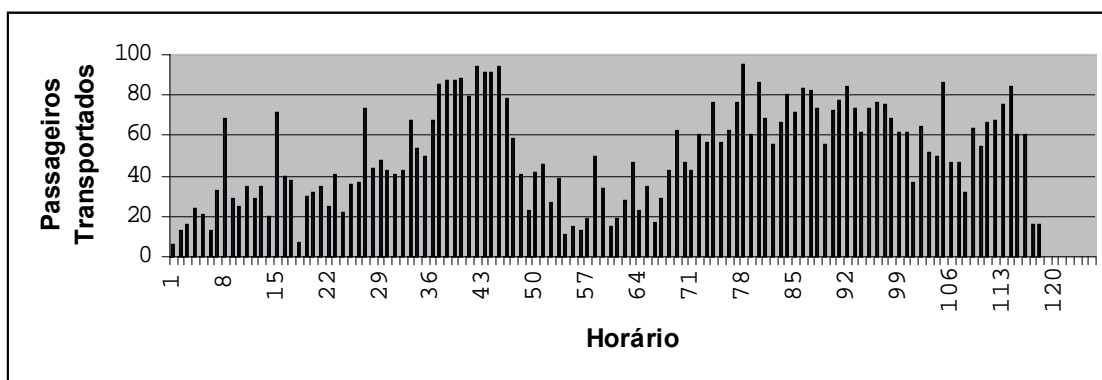


Gráfico A2.4: gráfico de distribuição da demanda (sentido Centro-Bairro), conforme dados da tabela A2.12.

Através destes gráficos foi possível identificar os períodos de maior demanda em cada sentido. Estes dados estão resumidos a seguir.

1) Sentido Abrão-Centro: Demanda total igual a 5685 passageiros transportados. Depois de serem identificados os períodos de maior ou menor demanda, tem-se a seguinte distribuição ao longo do dia.

**Período 1** (05:30h - 06:18h)

Passageiros Transportados segundos as viagens no período: 24, 5, 28, 39, 39

Total = 135, ou seja, **2,4%** da demanda total diária

**Período 2** (06:18h - 08:30h)

Passageiros Transportados segundos as viagens no período: 59, 71, 86, 93, 54, 85, 89, 93, 99, 92, 97, 94, 71, 58, 60, 63, 20, 57

Total = 1.341, ou seja, **23,59%** da demanda total diária.

**Período 3** (08:30h - 11:45h)

Passageiros Transportados segundos as viagens no período: 48, 34, 47, 41, 63, 31, 70, 57, 12, 32, 48, 53, 36, 29, 30, 13, 35, 18, 37, 35

Total = 769, ou seja, **13,53%** da demanda total diária.

**Período 4** (11:45h - 14:30h)

Passageiros Transportados segundos as viagens no período: 45, 35, 65, 69, 79, 98, 79, 95, 45, 58, 90, 80, 82, 44, 100, 79, 60, 50, 36, 34, 15, 82, 50, 40, 44, 32

Total = 1.586, ou seja, **27,9%** da demanda total diária.

**Período 5** (14:30h - 16:40h)

Passageiros Transportados segundos as viagens no período: 84, 54, 75, 26, 72, 42, 21, 36, 33, 8, 45

Total = 568, ou seja, **9,99%** da demanda total diária.

**Período 6** (16:40h - 18:45h)

Passageiros Transportados segundos as viagens no período: 32, 43, 47, 64, 71, 55, 66, 27, 46, 66, 48, 31, 31, 42, 14, 24, 67

Total = 774, ou seja, **13,6%** da demanda total diária.

**Período 7** (18:45h - 23:30h)

Passageiros Transportados segundos as viagens no período: 26, 16, 24, 39, 18, 30, 24, 22, 25, 25, 14, 34, 13, 21, 19, 34, 12, 23, 1, 14, 21, 11, 13, 15, 18

Total = 512, ou seja, **9%** da demanda total diária.

2) Sentido Centro-Abrão: Demanda total igual a 5962 passageiros transportados. Depois de serem identificados os períodos de maior ou menor demanda, tem-se a seguinte distribuição ao longo do dia.

**Período 1** (05:30h - 06:18h)

Passageiros Transportados segundos as viagens no período: 6, 13, 16

Total = 35, ou seja, **0,59%** da demanda total diária.

**Período 2** (06:18h - 08:30h)

Passageiros Transportados segundo as viagens no período: 24, 21, 13, 33, 68, 29, 25, 35, 29, 35, 20, 71, 40, 38, 7, 30

Total = 454, ou seja, **7,6%** da demanda total diária

**Período 3** (08:30h - 11:45h)

Passageiros Transportados segundos as viagens no período: 32, 35, 25, 41, 22, 36, 37, 73, 44, 48, 43, 41, 43, 67, 53, 50, 67, 85, 87, 87

Total = 1.016, ou seja, **17,00%** da demanda total diária.

**Período 4** (11:45h - 14:30h)

Passageiros Transportados segundos as viagens no período: 88, 79, 94, 91, 94, 78, 58, 41, 23, 42, 46, 27, 39, 11, 15, 13, 19, 50, 34, 15

Total = 1.048, ou seja, **17,6%** da demanda total diária.

**Período 5** (14:30 - 16:40)

Passageiros Transportados segundos as viagens no período: 19, 28, 47, 23, 17, 29, 43, 62, 47, 43, 60, 56, 76, 56

Total = 641, ou seja, **10,75%** da demanda total diária.

**Período 6** (16:40 - 18:45)

Passageiros Transportados segundos as viagens no período: 62,76, 95, 60, 86, 68, 55, 66, 80, 71, 83, 82, 73, 55, 72, 77, 84, 73, 61

Total = 1.379, ou seja, **23,13%** da demanda total diária.

**Período 7** (18:45h - 23:30h)

Passageiros Transportados segundos as viagens no período: 73, 76, 75, 68, 61, 37, 64, 51, 50, 86, 47, 32, 63, 54, 66, 67, 75, 84, 60, 60, 16, 16

Total = 1.389, ou seja, **23,3%** da demanda total diária.

Como já foi dito anteriormente, na falta de dados de demanda e distribuição de demanda para a linha do Corredor Sudoeste, usar-se-ão as porcentagens 2,4%, 23,6%, 13,5%, 27,9%, 13,6%, 9,0% no sentido Centro-Bairro e 1,3%, 17,3%, 15,6%, 14,0%, 37,9%, 6,5%, 8,3% no sentido Bairro-Centro obtidas da linha Abrão. De posse destas porcentagens, foi possível obter uma distribuição aproximada da demanda diária, para os vários arcos e períodos, para a linha do Corredor Sudoeste, a qual é mostrada nas tabelas A2.13 e A2.14 a seguir.

Demanda no sentido bairro-centro distribuída nos sete períodos do dia (24horas)								
DEMANDA		1o Per.	2o Per.	3o Per.	4o Per.	5o Per.	6o Per.	7o Per.
CA-CO	25	1	6	3	7	2	3	2
CA-SL	78	2	18	11	22	8	11	7
CA-CE	407	10	96	55	114	41	55	37
CO-SL	1.047	25	247	142	292	105	143	94
CO-CE	4.934	117	1.164	667	1.376	493	672	444
Percentual		2,4%	23,6%	13,5%	27,9%	10,0%	13,6%	9,0%

Tabela A2.13: demanda entre pares O-D da linha do Corredor Sudoeste, no sentido Bairro-Centro, distribuída nos sete períodos do dia considerados.

Observação: Por exemplo, a demanda total do arco CO-SL é 1.047 e está distribuída nos sete períodos do dia conforme os percentuais:  $1.047 = 25 + 247 + 142 + 292 + 105 + 143 + 94$ .

Demanda no sentido centro-bairro distribuída nos sete períodos do dia (24horas)								
DEMANDA		1o Per.	2o Per.	3o Per.	4o Per.	5o Per.	6o Per.	7o Per.
CO-CA	36	0	3	6	6	4	8	8
SL-CA	52	0	4	9	9	6	12	12
CE-CA	382	2	29	65	67	41	88	89
SL-CO	920	5	70	156	162	99	213	214
CE-CO	3.891	23	296	661	685	418	900	907
Percentual		0,59%	7,62%	17,00%	17,60%	10,75%	23,13%	23,30%

Tabela A2.14: demanda entre pares O-D da linha do Corredor Sudoeste, no sentido Centro-Bairro, distribuída nos sete períodos do dia considerados.

A demanda a ser considerada no modelo de planejamento de oferta de serviços de um sistema de transporte público multimodal é a demanda que compreende uma viagem de ida e volta. Esta demanda é a soma das demandas nos dois sentidos. Esta demanda é mostrada na tabela A2.15 a seguir.

Soma das demandas nos dois sentidos distribuída nos sete períodos do dia (24horas)								
DEMANDA		1o Per.	2o Per.	3o Per.	4o Per.	5o Per.	6o Per.	7o Per.
CA-CO	CO-CA	1	9	9	13	6	12	11
CA-SL	SL-CA	2	22	19	31	13	23	19
CA-CE	CE-CA	12	125	120	181	82	144	126
CO-SL	SL-CO	30	317	298	454	203	355	309
CO-CE	CE-CO	140	1.460	1.329	2.061	911	1.572	1.351
Período de maior movimentação de passageiros por intervalo de tempo								
total passageiros		185	1.933	1.776	2.740	1.216	2.105	1.815
Intervalo de tempo		48 min.	132 min.	195 min.	165 min.	130,2 min.	124,8 min.	285 min.
Passag./min.		4	15	9	17	9	17	6
Percentuais		0,43%	0,45%	0,53%	0,48%	0,52%	0,56%	0,58%
		1,16%	1,16%	1,09%	1,13%	1,10%	1,07%	1,05%
		6,43%	6,47%	6,76%	6,60%	6,72%	6,83%	6,93%
		16,35%	16,40%	16,78%	16,57%	16,73%	16,88%	17,00%
		75,62%	75,53%	74,84%	75,22%	74,93%	74,66%	74,44%
Total (%)		100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Tabela A2.15: demanda entre pares O-D da linha do Corredor Sudoeste, distribuída nos sete períodos do dia considerados.

A partir desta tabela, pode-se concluir que os períodos de maior movimentação de passageiros por intervalo de tempo (tamanho do período) são os períodos **2º**, **4º**, e **6º**, correspondendo, respectivamente, a **15**, **17** e **17** passageiros/minuto. Observação: por exemplo, 48 min. = (6,30h - 5,50h) x 60. Assim, 5,50h e 6,30h correspondem, respectivamente, a 05:30h e 06:18h no primeiro período.

### II.c - Determinação do fluxo de automóveis

São informações sobre demanda de automóvel e a distribuição desta demanda nos vários períodos do dia. É preciso obter a demanda de automóvel que, efetivamente, se origina em CA ou CO e distribuí-la nos sete períodos do dia de acordo com os procedimentos realizados na determinação e distribuição da demanda de passageiros de ônibus. Consideraram-se os dados obtidos através de



contagem tráfego de veículos em um dos arcos (ou seja, CO-SL) da rede, os quais foram usados para calibração da função de performance conforme mostrado na etapa I.

Para se ter uma estimativa da demanda de automóvel, foi considerado o zoneamento de tráfego (1993) do sistema de transporte público de Florianópolis (SC), conforme mostrado nas figuras A2.1 e A2.2, onde se usou a mesma matriz de demanda de passageiros de ônibus entre cada par das 75 zonas. Esta demanda corresponde a 16.459 passageiros no sentido bairro-centro e 15.017 passageiros no sentido centro-bairro, num total de 31.476 passageiros. Este total foi atualizado para o ano 2001 utilizando a taxa de crescimento populacional de 32,7% a mesma que foi usada para atualizar os dados da matriz O-D (1993) de demanda de passageiros de ônibus. Assim, o total de passageiros de ônibus que utilizam o trajeto da linha do Corredor Sudoeste é igual a  $41.769 = 31.476 \times 1,327$  passageiros. A demanda total pelo modal ônibus que, efetivamente, se origina em pontos dentro do Corredor Sudoeste é 11.771 passageiros. Este valor é obtido da matriz O-D (2001), como já mencionada anteriormente. O valor  $11.771/41.769 = 28\%$  é a fração do número de passageiros da linha do Corredor Sudoeste em relação ao total de passageiros de ônibus que somente utilizam o trajeto do Corredor Sudoeste. Este percentual 28% é usado para se obter o valor aproximado do fluxo de automóveis cujas viagens se originam em pontos dentro da linha do Corredor Sudoeste.

É assumido que a ocupação média nos automóveis é de 1 (um) passageiro por veículo. O fluxo total de automóveis estimado que trafega pelo trajeto da linha Corredor Sudoeste foi obtido através de contagem de tráfego, realizada em um ponto do trecho CO-SL, para alguns horários da manhã, considerando-se um minuto de observação. O tabela A2.16 com estes dados de fluxo é rerepresentada a seguir.

Hora do dia	Veículos/min.
07:30	13
08:00	25
08:30	17
09:00	32

Tabela A2.16: valores observados do fluxo de veículos (por minuto) no arco CO-SL.

Assim, por exemplo, no primeiro período compreendido entre os horários 05:30h e 06:18h, o fluxo total (estimado) de passageiros de automóveis usando o trajeto da linha do Corredor Sudoeste é  $624 = [(6,30 - 5,50) \times 13 \times 60]$  passageiros. Analogamente, para os demais períodos tem-se:

<b>Período 1</b>	05:00h a 06:18h	fluxo = $(6,30 - 5,50) \times 13 \times 60 =$ <b>624</b> passageiros;
<b>Período 2</b>	06:18h a 08:30h	fluxo = $(8,50 - 6,30) \times 32 \times 60 =$ <b>4.224</b> passageiros;
<b>Período 3</b>	08:30h a 11:45h	fluxo = $(11,75 - 8,50) \times 13 \times 60 =$ <b>2.535</b> passageiros;
<b>Período 4</b>	11:45h a 14:30h	fluxo = $(14,50 - 11,75) \times 25 \times 60 =$ <b>4.125</b> passageiros;
<b>Período 5</b>	14:30h a 16:40h	fluxo = $(16,67 - 14,50) \times 13 \times 60 =$ <b>1.693</b> passageiros;
<b>Período 6</b>	16:40h a 18:45h	fluxo = $(18,75 - 16,67) \times 25 \times 60 =$ <b>3.120</b> passageiros;
<b>Período 7</b>	18:45h a 23:30h	fluxo = $(23,50 - 18,75) \times 13 \times 60 =$ <b>3.705</b> passageiros.

Como já visto, da demanda total de passageiros de ônibus que usam o trajeto da linha do Corredor Sudoeste apenas 28% desta demanda se origina em pontos dentro desta linha. Por outro lado, também, apenas uma parte do fluxo de passageiros de automóveis é proveniente de pontos dentro da linha do Corredor Sudoeste. Por falta de dados, assume-se que o fluxo de automóveis para cada período é 28% do fluxo total estimado acima e assim, tem-se:

<b>Período 1</b>	05:00h a 06:18h	fluxo local = $624 \times 0,28 =$ <b>175</b> passageiros;
<b>Período 2</b>	06:18h a 08:30h	fluxo local = $4.224 \times 0,28 =$ <b>1.183</b> passageiros;
<b>Período 3</b>	08:30h a 11:45h	fluxo local = $2.535 \times 0,28 =$ <b>710</b> passageiros;
<b>Período 4</b>	11:45h a 14:30h	fluxo local = $4.125 \times 0,28 =$ <b>1.155</b> passageiros;
<b>Período 5</b>	14:30h a 16:40h	fluxo local = $1.693 \times 0,28 =$ <b>474</b> passageiros;
<b>Período 6</b>	16:40h a 18:45h	fluxo local = $3.120 \times 0,28 =$ <b>874</b> passageiros;
<b>Período 7</b>	18:45h a 23:30h	fluxo local = $3.705 \times 0,28 =$ <b>1.037</b> passageiros.

Na tabela A2.15, a demanda total de passageiros de ônibus (nos dois sentidos Bairro-Centro e Centro-Bairro) foi distribuída nos sete períodos e nos diversos arcos da linha do Corredor Sudoeste. Da demanda total de passageiros de ônibus, para um determinado período, obteve-se os percentuais correspondentes aos arcos. Para a distribuição dos fluxos de automóveis nos sete períodos considerados, são assumidos estes mesmos percentuais. E multiplicando-se o fluxo

de automóveis em cada período pelos respectivos percentuais, obtém-se a distribuição deste fluxo nos arcos e períodos, conforme mostra a tabela A2.17 a seguir.

Período	Horário		O-D	Demanda		
	Início	Fim		Onibus	Auto	Total
1	5,50	6,30	CA - CO	1	1	2
			CA - SL	2	2	4
			CA - CE	12	11	23
			CO - SL	30	29	59
			CO - CE	140	132	272
			SL - CE	0	0	0
2	6,30	8,50	CA - CO	9	5	14
			CA - SL	22	14	36
			CA - CE	125	77	202
			CO - SL	317	194	511
			CO - CE	1.460	893	2.353
			SL - CE	0	0	0
3	8,50	11,75	CA - CO	9	4	13
			CA - SL	19	8	27
			CA - CE	120	48	168
			CO - SL	298	119	417
			CO - CE	1.329	531	1.860
			SL - CE	0	0	0
4	11,75	14,50	CA - CO	13	6	19
			CA - SL	31	13	44
			CA - CE	181	76	257
			CO - SL	454	191	645
			CO - CE	2.061	869	2.930
			SL - CE	0	0	0
5	14,50	16,67	CA - CO	6	25	31
			CA - SL	13	5	18
			CA - CE	82	32	114
			CO - SL	203	79	282
			CO - CE	911	355	1.266
			SL - CE	0	0	0
6	16,67	18,75	CA - CO	12	5	17
			CA - CO	23	9	32
			CA - CE	144	60	204
			CO - SL	355	147	502
			CO - CE	1.572	652	2.224
			SL - CE	0	0	0
7	18,75	23,50	CA - CO	11	6	17
			CA - SL	19	11	30
			CA - CE	126	72	198
			CO - SL	309	176	485
			CO - CE	1.351	772	2.123
			SL - CE	0	0	0

Tabela A2.17: Demanda total (ônibus e automóvel) distribuída nos arcos e nos sete períodos do dia

**II.d - Determinação da demanda total (automóvel e ônibus).**

A demanda total (estimada) de passageiros que se origina em pontos dentro da linha do Corredor Sudoeste, ou seja, a demanda de passageiros de ônibus mais o fluxo (demanda) de passageiros de automóvel, foi mostrada na tabela A2.17. Esta demanda total (ou fluxo total) de passageiros, será redistribuída em cada arco e período através do modelo *Logit*, conforme o primeiro sub-modelo de distribuição de viagem apresentado no Capítulo 5.

### III Determinação dos custos de transporte

Considerando o usuário, o custo da viagem de automóvel (modal privado) está agregado: tem-se o gasto com combustível e o preço do estacionamento. Para o usuário de ônibus (modal público), seu custo é o valor da tarifa cobrada. Estes custos dizem respeito ao deslocamento de  $d^{rs} = 24$  km (distância de ida e volta) para realizar o caminho entre o par O-D definido por  $r,s$  onde  $r = CA$  e  $s = CE$ . No cálculo da receita da empresa tem-se que levar em conta que o modal público convencional e executivo, respectivamente, tem capacidade para transportar 70 e 25 passageiros. Isto é,  $Cap_2 = 70$  e  $Cap_3 = 25$ . Em contra partida, esta empresa tem custos os quais serão vistos a seguir.

Os dados de custo foram obtidos junto à Empresa de Transporte Ribeironense Ltda os quais são mostrados nas tabelas A2.18 e A2.19 a seguir.

SISTEMA EXECUTIVO (Outubro 2000)		
RESUMO		
CUSTO	Custo (R\$/km)	%
<b>CUSTOS VARIÁVEIS:</b>	0,4362	24,51%
Combustível	0,2076	11,66%
Lubrificantes	0,0343	1,92%
Rodagem	0,0371	2,08%
Peças e Acessórios	0,1573	8,84%
<b>CUSTOS FIXOS:</b>	1,2430	69,84%
Capital:	0,4759	26,74%
Depreciação:	0,2585	14,52%
Veículos	0,2564	14,40%
M.I.E.*	0,0021	0,12%
Remuneração:	0,2175	12,22%
Veículos	0,1374	7,72%
M.I.E.	0,0737	4,14%
Almoxarifado	0,0063	0,36%
Pessoal:	0,7084	39,80%
Operação	0,5117	28,75%
Manutenção	0,0691	3,88%
Administração	0,0537	3,02%
Benefícios	0,0739	4,15%
Diretoria	-	0,00%
Administração	0,0587	3,30%
<b>IMPOSTOS</b>	0,1006	5,65%
<b>TOTAL</b>	1,7798	100,00%

<b>QUILOMETRAGEM PERCORRIDA</b>		
..... Quilometragem Produtiva (média dos últimos doze meses)	(44)	186.526,00
..... Quilometragem Improdutiva	(44) x 0,05 = (45)	9.326,30
..... Quilometragem Mensal Percorrida	(44) + (45) = (46)	195.852,30
<b>PERCURSO MÉDIO MENSAL (PMM)</b>		
PMM =	(46) 195.852,30 / (38) 40 = (47)	4.896,31
<b>ÍNDICE DE PASSAGEIROS EQUIVALENTES POR QUILOMETRO (IPKe)</b>		
IPKe =	(37) 115.678 / (46) 195.852,30 = (48)	0,5906
Depreciação + Juros (mensal) =	2.330,38	R\$/mes
Depreciação + Juros (diário) =	77,68	R\$/dia
Custo Variável =	1,01697	R\$/km

Tabela A2.18: dados de custo para o modal público executivo.

Os custos que são influenciados, respectivamente, pelo número de veículos da frota e pelo número de viagens (frequência das viagens) realizadas são:

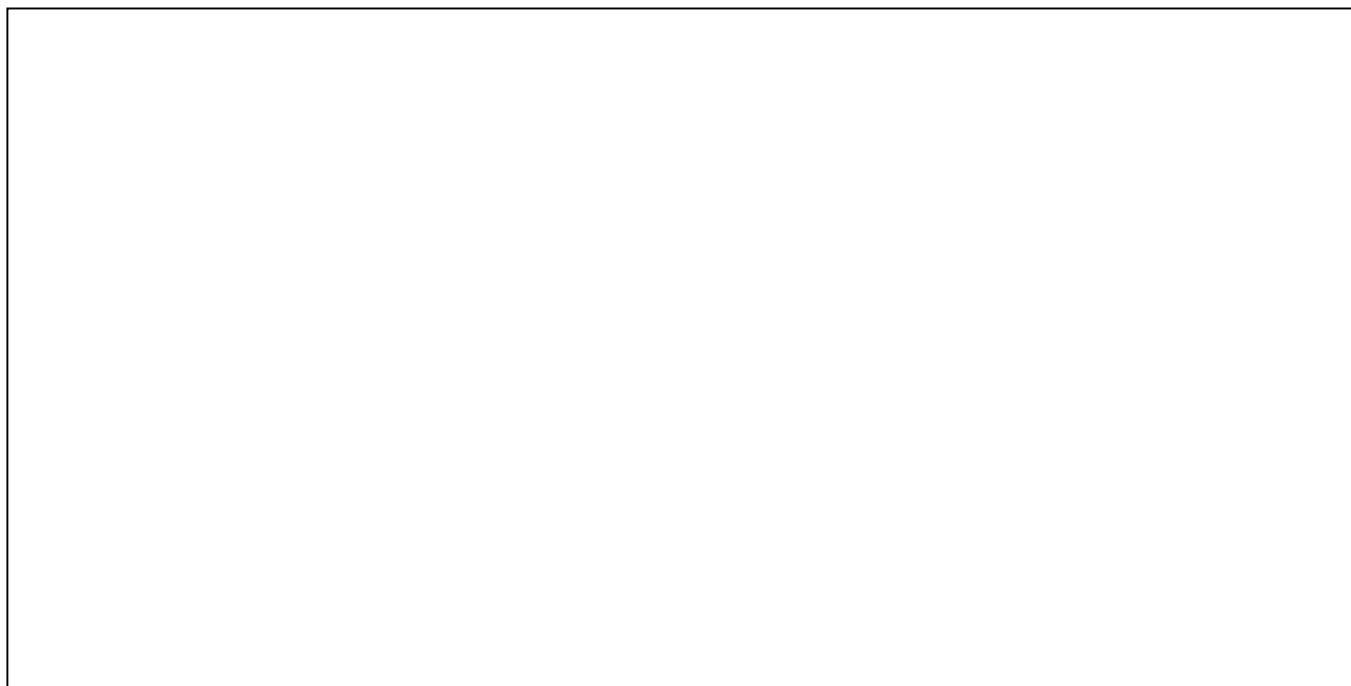
Depreciação + Juros (mensal) =	2.330,38	R\$/mes
Depreciação + Juros (diário) =	77,68	R\$/dia
Custo Variável =	1,01697	R\$/km

**Custo fixo** = depreciação + juros (diário) = (depreciação + remuneração do capital) x (Km percorrido/frota operante)/30 = **77,68** reais/veículo/dia.

**Custo variável (R\$/km)** = custo com combustível + Lubrificante + Rodagem + Peças.

Assim, para um percurso de 24,00 Km de ida e volta no Corredor Sudoeste através do modal público executivo, o custo de uma viagem é igual a **24,41** (1,01697 x 24) reais.

Observação: Os dados de custo de depreciação + remuneração do capital para o sistema modal público convencional foram atualizados para outubro/2000 com base no IPCA (maio/outubro de 2000). A atualização está no canto inferior direito da tabela A2.19 a seguir.



Os custos que são influenciados, respectivamente, pelo número de veículos da frota e pelo número de viagens (frequência das viagens) realizadas são:

<b>Depreciação + Juros (mensal) =</b>	2.330,38	R\$/mes
<b>Depreciação + Juros (diário) =</b>	77,68	R\$/dia
<b>Custo Variável =</b>	1,01697	R\$/km

**Custo fixo** = depreciação + juros (diário) = (depreciação + remuneração do capital) x (Km percorrido/frota operante)/30 = **51,17** reais/veículo/dia.

**Custo variável (R\$/km)** = custo com combustível + Lubrificante + Rodagem + Peças.

Assim, para um percurso de 24,00 Km de ida e volta no Corredor Sudoeste através do modal público convencional, o custo de uma viagem é igual a **40,95** (1,7064 x 24) reais.

#### **IV Calibração do modelo de escolha modal**

Foi realizada uma pesquisa de Preferência Declarada para modelar o comportamento de escolha modal dos usuários. Os lugares escolhidos para as entrevistas foram os locais de estacionamento, conforme mostrado na figura A2.5 onde se observa a localização “•” na planta do centro da cidade. O modelo de formulário para as entrevistas é mostrado a seguir, onde foram considerados 22 entrevistados.





**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**  
**LabTrans – LABORATÓRIO DE TRANSPORTES**

Esta pesquisa é parte integrante de um trabalho que está sendo desenvolvido no Programa do Pós-Graduação em Engenharia de Produção, e tem por objetivo identificar o comportamento dos usuários dos sistemas de transporte urbano, nos deslocamentos realizados para fins de trabalho, estudo e compras. Gostaríamos de contar com sua valiosa colaboração. Desde já agradecemos. LabTrans ☎ (048) 234-7270

- A. Principal motivo da viagem:  
 Trabalho  Escola  Compras  Serviços  Lazer
- B. Origem: \_\_\_\_\_ Destino: \_\_\_\_\_ Distância (km): \_\_\_\_\_
- C. Enumere as alternativas abaixo em ordem crescente de utilização (1ª. mais utilizada, 2ª. mais utilizada, etc).  
 Automóvel  Ônibus executivo  Ônibus convencional
- D. Com relação à alternativa AUTOMÓVEL, solicitamos que você faça uma estimativa dos seguintes elementos para a viagem em questão (somente preencha se tiver uma razoável confiança na informação, e se a alternativa é disponível):

		<b>Resposta</b>
1	Tempo gasto no deslocamento com o veículo, da origem até o estacionamento (em minutos)	
2	Tempo gasto no deslocamento a pé, do estacionamento até o destino (em minutos)	
3	Consumo médio de combustível do automóvel (km/litro)	
4	Custo total do estacionamento (entrada-saída)	
5	Quantos ocupantes em média realizam a viagem com você ?	

- E. Qual o principal fator considerado na escolha do estacionamento ?  
 Custo  Localização  Segurança  Disponibilidade de vaga  Outros serviços
- F. Com relação às alternativas ÔNIBUS CONVENCIONAL e EXECUTIVO, solicitamos que você faça uma estimativa dos seguintes elementos para a viagem em questão (somente preencha se tiver uma razoável confiança na informação, e se a alternativa é disponível):

		<b>CONVENCIONAL</b>	<b>EXECUTIVO</b>
1	Tempo gasto no deslocamento com o ônibus, do embarque ao desembarque (em minutos)		
2	Tempo gasto no deslocamento a pé, da origem ao ponto de embarque (em minutos)		
3	Tempo médio de espera no ponto para chegada do ônibus (em minutos)		
4	Tempo gasto no deslocamento a pé, do desembarque até o destino (em minutos)		
5	Valor da tarifa (somente ida), em reais		

Tabela A2.20: modelo de formulário utilizado nas entrevistas de Preferência Declarada.

São consideradas as alternativas: modal privado, modal público convencional e modal público executivo. Essas alternativas competem entre si em termos dos níveis dos seus atributos quais sejam: tempo de deslocamento a pé; tempo de deslocamento no modal; tempo de espera; custo da viagem (incluindo o preço do estacionamento para viagem no modal privado); e o conforto do modal.

Considerando as respostas apresentadas nos formulários preenchidos pelos 22 entrevistados, pode-se processar as informações de interesse nesta pesquisa, dispondo-as na tabela apresentada a seguir.

Esta tabela está disponível no exemplar impresso!

Nesta tabela pode-se observar a ordem com que cada uma das alternativas foi escolhida (ou preferida). A partir desta ordem, usando os recursos de otimização disponibilizados pelo *Microsoft EXCEL*, foram determinados os coeficientes ( $\beta$ ) de máxima verossimilhança para a função utilidade, conforme método descrito no Anexo 1.

O valor relativamente pequeno associado à variável conforto indica que este atributo é pouco importante na escolha modal. Pode-se verificar por este resultado, que o usuário estaria disposto a pagar somente nove (9) centavos (= 0,23 / 2,504) de Real para uma unidade de conforto. Já, os demais atributos apresentam valor absoluto significativo indicando a sua importância na escolha do modal.

A função utilidade obtida é a seguinte:

$$U = \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \beta_3 \cdot X_3 + \beta_4 \cdot X_4 + \beta_5 \cdot X_5$$

onde  $\beta_1 = -2,5021$ ;

$\beta_2 = -1,9404$ ;

$\beta_3 = -1,0814$ ;

$\beta_4 = -2,5040$ ;

$\beta_5 = 0,23$ ;

e

$X_1$  = tempo de deslocamento a pé;

$X_2$  = tempo de viagem no modal;

$X_3$  = tempo de espera pelo modal;

$X_4$  = custo da viagem; e

$X_5$  = conforto do modal.

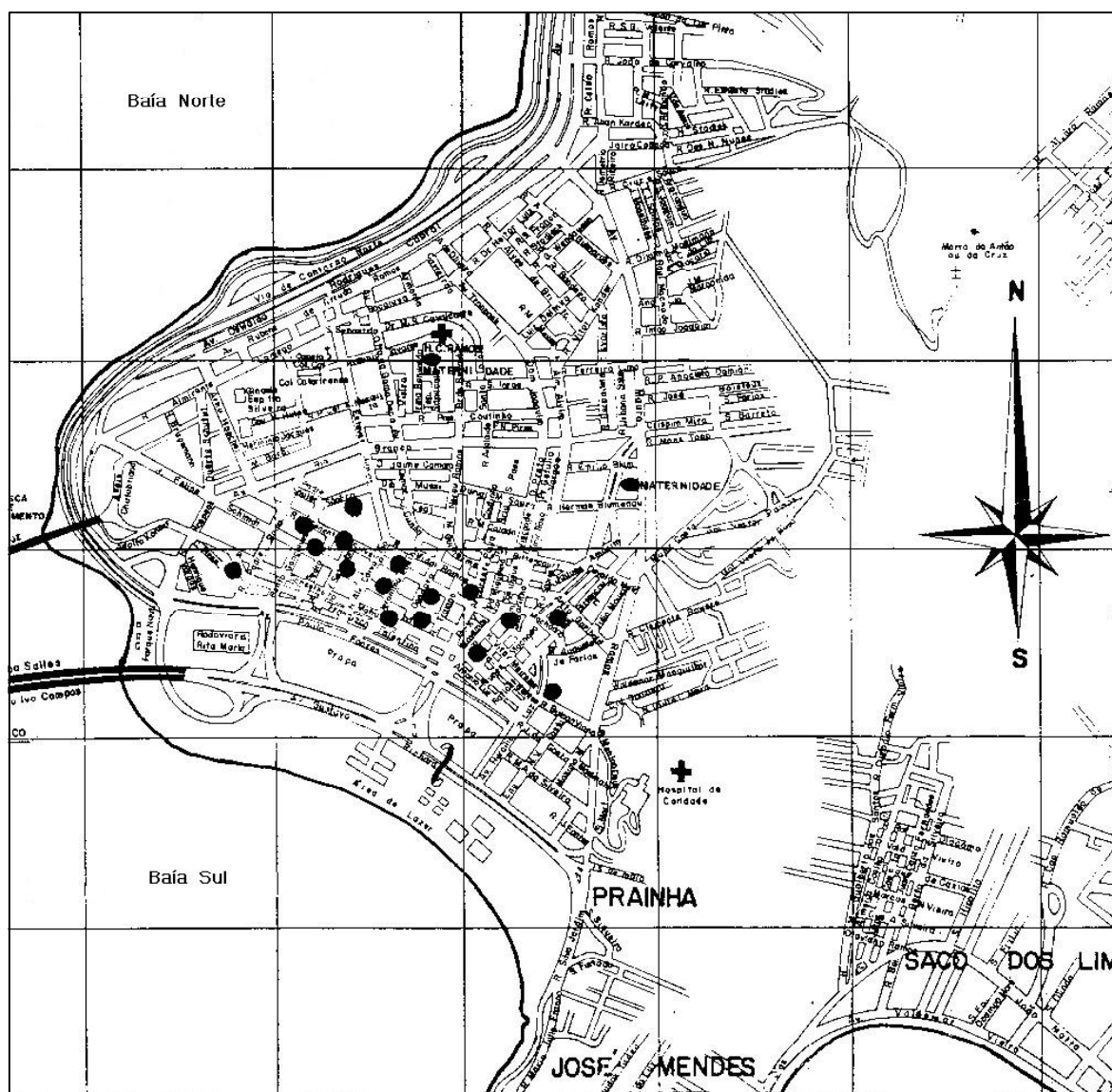


Figura A2.5: pontos “•” representando as localizações dos estacionamentos no Centro da cidade, onde foram realizadas as entrevistas de Preferência

## V Aplicação do modelo

Na planilha “*Microsoft Excel*” apresentada a seguir, onde o modelo foi implementado,<sup>42,43</sup> são apresentados os resultados obtidos quais sejam: valores dos fluxos, valores dos tempos de viagem associados à rede, bem como o número de veículos ônibus (modais público convencional e executivo) necessário para compor a frota de modo a atender à demanda de passageiros do transporte público. Esta planilha contém os resultados correspondentes ao **Cenário 2a** (ver Capítulo 6), onde o valor da tarifa do modal público convencional é 0,95 reais (tarifa social) fixo para todos os sete períodos do dia e a tarifa do modal público executivo é uma variável cujo valor é determinado pelo modelo.

Nesta implementação do modelo, existe a execução de uma “macro” que atualiza os tempos de viagem estimados pelos tempos de viagem calculados em função dos fluxos distribuídos através do modelo *Logit*. Mais precisamente, os tempos estimados são atualizados pelos tempos médios, fazendo com que o processo convirja mais rapidamente para o ponto de equilíbrio do usuário, como foi visto no Capítulo 5.

---

<sup>42</sup> Não foi escrito um código ou programa específico em uma linguagem para a implementação do modelo. A planilha “*Microsoft Excel*” preencheu os requisitos para que o modelo pudesse ser implementado. Nesta planilha tem-se: uma certa flexibilidade para a entrada de dados; ferramentas de trabalho; opções para definir variáveis, restrições e função objetivo a ser otimizada; e uma interface amigável.

<sup>43</sup> **Davi (2001)**, em seu artigo “Implementação de modelos: Um estado da arte”, questiona o porque de tantos modelos serem projetados e tão poucos usados. Segundo o autor, esta questão é freqüentemente discutida dentro da comunidade da Pesquisa Operacional (PO). No trabalho do autor, ele primeiro faz uma análise das várias definições de “modelos” apresentadas na literatura em PO e propõe uma síntese das funções que um modelo pode tratar. Então o conceito de “implementação” é definido, e troca-se então progressivamente de ponto de vista tradicional de “projeto então implementação” para uma teoria mais geral de um *design/implementation* de modelo, vista como um processo de construção-cruzada (*cross-construction*) entre o modelo e a organização em que ele é implementado. A organização, por conseguinte, não é considerada como um contexto simples mas como um componente ativo no “*design*” de modelos. Isto conduz a se propor seis modelos de implementação de modelos: O modelo tecnocrata, o modelo político, o modelo administrativo, o modelo “*self-learning*”, o modelo de conquista e o modelo experimental.

Anexo 1

**Técnicas de Preferência Declarada**

## Técnicas de Preferência Declarada

### 1 - Introdução

Modelar a estrutura decisória dos indivíduos quando defrontados com um conjunto de alternativas não é uma tarefa muito simples. A literatura tem apresentado algumas técnicas que estimam o comportamento decisório dos indivíduos através de modelos matemáticos. Dentre estas técnicas têm-se as técnicas de preferência revelada (PR) ou observada e as técnicas de preferência declarada (PD). As Técnicas de Preferência Declarada ainda são a maneira mais natural de modelar o comportamento do usuário.

### 2 - Conceitos

Segundo **Kroes and Sheldon (1988)**, o termo técnicas de preferência declarada referem-se a uma família de técnicas, as quais utilizam respostas dos indivíduos para estimar uma função utilidade. As opções são tipicamente descrições de situações ou contextos construídos por pesquisadores.

Para **Green and Srinivasan (1978) Apud Kroes and Sheldon (1988)**, o termo é definido como sendo qualquer método decomposicional que estima a estrutura de preferência de um indivíduo, dado a sua avaliação global de um conjunto de alternativas que pré-estabelecidas em termos dos níveis de diferentes atributos.

As técnicas de preferência declarada são baseadas em entrevistas nas quais apresenta-se ao entrevistado um conjunto de cenários (alternativas) hipotéticos, para que seja escolhida qual a situação que eles preferem. Os dados coletados são processados por modelos estáticos que ajustam os parâmetros de forma a definir uma função utilidade.



### 3 - Preferência Revelada x Preferência Declarada

Historicamente, as técnicas de preferência revelada são anteriores às técnicas de preferência declarada. As técnicas de **PR** são elaboradas através de informações selecionadas de diferentes indivíduos num determinado ponto no tempo que conduzem a situações reais observadas. Em cada uma destas seções os indivíduos revelam efetivamente suas preferências, podendo, posteriormente, aferir o comportamento dos mesmos ao longo do tempo.

As técnicas de **PD**, por outro lado, fundamentam-se em entrevistas mediante as quais é apresentado ao entrevistado um número de situações hipotéticas (alternativas) que se aproximem o máximo possível da realidade. O entrevistado, mediante um leque de alternativas, registra suas preferências. A partir das informações, pode-se estimar o comportamento do indivíduo diante das diversas alternativas possíveis.

Uma vantagem da técnica de **PD** sobre a técnica de **PR** é o fornecimento de um número significativamente maior de informações sobre o conjunto de alternativas avaliadas para cada entrevistado. Isto acontece em razão das várias relações que o entrevistado faz entre os atributos para realizar sua escolha. Por outro lado, a técnica de **PR** fornece apenas uma informação específica.

Em particular, uma vantagem relevante das técnicas de **PD** é a possibilidade de fornecer dados para modelagem com base em alternativas que ainda não existem.

Várias experiências desenvolvidas comprovam que os dados e as metodologias de **PD** e **PR** podem ser empregados de forma complementar, ressaltando-se as potencialidades de ambas. Se por um lado **PD** fornece um poderoso instrumento pela introdução de alternativas hipotéticas, através de **PR** estes dados podem ser comparados com uma situação real.

#### 4 - Conceito de Função Utilidade

Para representar a atratividade de uma alternativa em comparação a outras, adota-se o conceito de utilidade, oriundo da Teoria do Consumidor. A utilidade representa a satisfação ou benefício que um indivíduo percebe quando consome seus recursos em bens ou serviços.

Esta utilidade é quantificada por meio de expressões matemáticas denominadas de **função utilidade**. A função utilidade serve para expressar a hipótese do pesquisador sobre a maneira com a qual os indivíduos combinam parte da utilidade dentro de uma avaliação total ou utilidade total. Esta função utilidade exprime matematicamente as preferências do entrevistado.

O objetivo da aplicação dos estudos de **PD** é decompor as preferências advindas dos entrevistados em pequenas utilidades para cada atributo. Com isto, pode-se estabelecer o efeito relativo de cada atributo na função utilidade total. As variáveis da função utilidade podem ser contínuas ou discretas.

Assume-se, normalmente, que os indivíduos seguem um modelo linear aditivo para a função utilidade. Assim pode-se definir uma expressão matemática:

$$U_{in} = \sum_{k=1}^K \beta_k X_{ink} \quad (1)$$

onde

$U_{in}$  = utilidade da alternativa  $i$  para o indivíduo  $n$ ;

$X_{ink}$  = valor do atributo  $k$  para a alternativa  $i$ ;

$\beta_k$  = coeficiente do modelo para o atributo  $k$ ;

$K$  = quantidade de atributos das alternativas.

Os coeficientes podem ser utilizados para variados propósitos, assim como:

- a) determinar a importância relativa dos atributos;
- b) determinar valores monetários dos atributos (quando tais atributos e custos tenham sido incluídos no experimento);
- c) especificar a função utilidade para modelos de predição; e

d) determinar valores de tempo (quando, ambos os atributos de tempo e custo são incluídos no experimento).

Esse tipo de função utilidade é denominado de compensatória porque o número (ou diminuição) do nível de um atributo pode ser compensado diretamente pela diminuição (ou aumento) de um outro atributo. Há situações reais em que o efeito compensatório não condiz com a realidade. Nesses casos a função acima não é adequada.

## **5 - Características da Técnica de Preferência Declarada**

Um dos principais objetivos de experimentos de preferência declarada é construir um conjunto de alternativas hipotéticas, porém realistas. É necessário que as alternativas conservem características para que possam ser imaginadas pelos entrevistados.

As principais características da técnica de preferência declarada são:

- a) cada entrevistado é submetido a uma série de escolhas. Este conjunto de alternativas é construído de maneira que sejam considerados os principais atributos que influenciam no problema de escolha, no problema em estudo;
- b) cada alternativa é representada por um conjunto de atributos que identificam o produto ou serviço. O pesquisador deve incluir no experimento aqueles atributos que mais identificam o produto ou serviço analisado;
- c) os valores ou níveis dos atributos em cada alternativa são especificados pelo pesquisador e são apresentados ao entrevistado na forma de opções. O pesquisador deve considerar o maior número possível de níveis, que lhe permita distinguir até quando os indivíduos estariam dispostos a trocar uma opção pela outra. Contudo, a quantidade de níveis não deve ser muito numerosa, pois isto tornaria muito difícil projetar o experimento;

- d) o conjunto de alternativas é especificado, baseando-se num projeto experimental, no qual assegura-se que a variação de um atributo é estatisticamente independente dos demais; e
- e) os indivíduos informam as suas preferências com relação às alternativas colocando-as em ordem de preferência (*ranking*), submetendo-as a uma escala de avaliação (*rating*) ou escolhendo a opção preferida do conjunto de alternativas disponíveis (*choice*). A seleção por um dos três métodos dependerá de uma série de análises discutidas posteriormente.

## 6 - Método de Pesquisa

Para desenvolver um estudo com técnicas de preferência declarada, devem ser consideradas algumas etapas como:

- a) método de entrevista;
- b) a seleção da amostra;
- c) a forma e a complexidade do experimento;
- d) a medição da escolha; e
- e) a análise dos dados.

## 7 - O Método de Entrevista

- a) face-a-face: as entrevistas são realizadas junto ao indivíduo em seu local de trabalho, em sua residência, ou em um lugar qualquer. A vantagem deste tipo de pesquisa é que o entrevistador pode explicar pessoalmente os objetivos do trabalho e administrar a aplicação da pesquisa. Uma outra vantagem é a alta taxa de segurança no retorno das respostas. As desvantagens deste método são a necessidade de entrevistadores e o alto custo da pesquisa.
- b) questionário: os questionários auto-explicativos são enviados ao entrevistado pelo correio, fax, *internet*, etc. Este método tem como vantagens um custo reduzido em sua aplicação e a cobertura de um percentual maior da amostra. Por outro lado, as questões devem ser mais simplificadas; o entrevistador perde um

pouco o controle de qualidade das respostas e, ainda ocorre em geral uma baixa taxa de retorno dos questionários; e

- c) híbrido: neste método o material de estímulo é enviado aos entrevistados por correio, fax, etc. e, posteriormente, as entrevistas são realizadas por telefone.

## **8 - A Seleção da Amostra**

Um ponto importante a considerar é a seleção da amostra (composição e tamanho). Pode ser do tipo exaustivo, abrangendo toda a população ou pode-se definir um estrato para a aplicação do experimento. Quando o último caso é utilizado, deve-se fazer correções para que as decisões das pessoas daquele estrato não sejam superestimadas em detrimento de todo o grupo.

A seleção da amostra pode ser feita de diversas maneiras. Porém, devem ser considerados alguns pontos importantes na escolha de uma amostra, tais como:

- a) a amostra deve ser aleatória ou escolhida a partir de um grupo que não esteja diretamente envolvido no processo; e
- b) fazer com que o entrevistado consiga vivenciar a presente situação para que a pesquisa seja o menos artificial possível.

## **9 - A Forma e a Complexidade do Experimento**

Inicialmente, devem ser tomadas decisões com respeito a quais atributos e quantos níveis de cada atributo devem ser considerados. Quanto maior o número de atributos e de níveis, melhor a avaliação das diferentes respostas. Entretanto, maior será a complexidade da tarefa dos entrevistados podendo tornar-se até inviável.

O objetivo no projeto de um experimento é definir a combinação dos níveis de todos os atributos incluídos no experimento, de tal maneira que eles não sejam completamente correlacionados entre as alternativas. O número total de alternativas deve ser definido em função do número de atributos e do número de níveis dos

atributos. Combinando todos os níveis dos atributos é possível gerar todas as alternativas possíveis, resultando num *experimento fatorial completo*.

Na busca de respostas realistas dos entrevistados é importante apresentar os atributos de forma similar ao que eles estão familiarizados. Deve-se, ainda dar considerável atenção à qualidade gráfica do material.

## 10 - A Medição da Escolha

Os entrevistados podem ser solicitados a responder (ou registrar suas preferências) de três formas diferentes:

- a) a avaliação (ou *rating*): as respostas são dadas para cada alternativa. As respostas podem ser interpretadas como uma mensuração da utilidade de uma alternativa. Normalmente a avaliação é representada por uma preferência relativa entre duas alternativas numa escala semântica de desejabilidade ou probabilidade de escolha;
- b) ordenação (ou *ranking*): um número de alternativas é simultaneamente apresentado aos entrevistados. O objetivo é colocar estas alternativas em ordem de preferência; e
- c) escolha (ou *choice*): várias opções são apresentadas ao entrevistado, sendo que ele escolhe a preferida.

A utilização de dados do tipo ordenação é uma prática comum entre os analistas que defendem o ponto de vista que os indivíduos são mais capazes de ordenar alternativas do que, através de uma tarefa de avaliação, conceder graus de preferência.

A seleção da abordagem a ser utilizada está diretamente relacionada com o método de análise de dados que é empregado.

## 11 - A Análise dos Dados

Os métodos de análise de dados obtidos por preferência declarada vêm evoluindo. Paralelamente, as técnicas de estimação têm melhorado substancialmente. As técnicas de análise mais utilizadas são:

- a) análise monotônica de variância: pode ser aplicada para experimentos do tipo ordenação das alternativas;
- b) regressão múltipla: que pode ser aplicada em experimento do tipo avaliação. Como resultado final, obtém-se a importância relativa de cada atributo; e
- c) modelo *Logit* Multinomial: é a forma mais comum de modelos de escolha discreta e pode ser utilizado para estimar modelos de escolha a partir de dados de preferência como classificação, ordenação e escolha. Detalhes do modelo são dados na seção 13. O método de estimação normalmente utilizado baseia-se no princípio estatístico de maximização da função de verossimilhança.

## 12 - Utilidade Aleatória

A equação (1) dada para a função utilidade é uma forma simplificada para modelar a utilidade, pois os indivíduos podem exibir inconsistência em sua conduta ou considerar fatores que não foram percebidos pelo pesquisador. Surge, então, o conceito de utilidade aleatória que completa a equação anterior incluindo um erro relativo a elementos que não foram observados. Desta forma, define-se a função utilidade como soma de componentes observáveis e não observáveis:

$$U_{in} = V_{in} + \varepsilon_{in} \quad (2)$$

onde

$U_{in}$  = utilidade aleatória da alternativa  $i$  para o indivíduo  $n$ ;

$V_{in}$  = parcela determinística da alternativa  $i$  para o indivíduo  $n$ ;

$\varepsilon_{in}$  = parcela aleatória da alternativa  $i$ .

**Manski (1973) Apud Bem-Akiva (1985)** identificou quatro fontes de aleatoriedades das utilidades:

- a) os atributos não observados;
- b) as variáveis de gostos não observadas;
- c) os erros de medidas e a informações imperfeitas; e
- d) as variáveis instrumentais.

A teoria da Utilidade Aleatória foi primeiramente proposta por **Thurstone (1927) Apud Louviere (1988)** como uma maneira de modelar os comportamentos dominantes num contexto de comparação para a par. Essencialmente, a teoria diz que os consumidores tentam escolher as alternativas, baseando-se nos atributos de maior importância, tais como renda e tempo. Entretanto, sabe-se que os consumidores nem sempre adquirem aquilo que mais lhe agradam. Pode-se explicar estas flutuações no comportamento através de uma componente aleatória na função utilidade.

Assume-se que os indivíduos selecionam a alternativa com a mais alta utilidade. Entretanto, as utilidades são tratadas como variáveis aleatórias. Define-se  $C_n$  o conjunto de alternativas apresentadas ao indivíduo  $n$ . Desta forma, a probabilidade de escolha da alternativa  $i$  é igual à probabilidade da utilidade da alternativa  $i$  ser maior ou igual à utilidade de todas as outras alternativas no conjunto de escolha  $C_n$ . Isto pode ser escrito como:

$$\begin{aligned}
 P(i/C_n) &= P[U_{in} \geq U_{jn}, \forall j \in C_n] = P[V_{in} + \varepsilon_{in} \geq V_{jn} + \varepsilon_{jn}, \forall j \in C_n] \\
 &= P[\varepsilon_{jn} - \varepsilon_{in} \leq V_{in} - V_{jn}, \forall j \in C_n] \quad (3)
 \end{aligned}$$

A parcela determinística da utilidade de uma alternativa é definida como uma função do conjunto de alternativas (ou variáveis). A tarefa do pesquisador é identificar todas as variáveis e outras possíveis influências na hora da escolha. Uma vez especificadas as variáveis, deve-se identificar como estas variáveis se combinam para influenciar na decisão. A regra de combinação será a expressão de relacionamento entre as variáveis e o comportamento de escolha. A regra mais



comumente utilizada entre os pesquisadores tem sido uma função linear aditiva, expressa da seguinte forma:

$$V_{in} = \beta_1 x_{in1} + \beta_2 x_{in2} + \dots + \beta_k x_{ink}. \quad (4)$$

onde

$X_{in} = [x_{in1}, x_{in2}, \dots, x_{ink}]$  é o vetor dos atributos da alternativa  $i$ ;  
 $\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k]$  é um vetor de  $k$  parâmetros desconhecidos a serem calibrados.

A equação acima indica que o objeto da análise é estimar os parâmetros  $\beta$ 's associados com os atributos que explicam hipoteticamente o comportamento do indivíduo. Para isso é necessário conhecer a distribuição de probabilidade da parcela aleatória ou da diferença das parcelas. Uma variedade de modelos de probabilidades de escolha discreta pode ser formulada dependendo da distribuição assumida. Segundo **Bem-Akiva and Lerman (1985)**, quando se assume, por exemplo, uma distribuição normal, produz-se um modelo *PROBIT*; assumindo uma distribuição de **Gumbel**, resulta-se no modelo *Logit Multinomial*.

### 13 - Modelo *Logit Multinomial*

Admitindo-se que a parcela aleatória é regida por uma distribuição de **Gumbel**, chega-se ao modelo *Logit Multinomial* dado pela expressão:

$$P_n(i) = \frac{\exp(V_{in})}{\sum_{j \in C_n} \exp(V_{jn})} = \frac{\exp(\beta' x_{in})}{\sum_{j \in C_n} \exp(\beta' x_{jn})} \quad (5)$$

onde:

$P_n(i) = P(i/C_n)$  = a probabilidade da alternativa  $i$  ser escolhida pelo indivíduo  $n$  de um conjunto  $C_n$ .

O modelo *Logit* multinomial é aplicado aos casos com número de alternativas maior que dois. Quando o número de alternativas é igual a dois, tem-se o modelo *Logit* binomial, que é um caso particular do primeiro.

Uma propriedade chave dos modelos estocásticos, que é o caso do *Logit* multinomial, é a Independência das Alternativas Irrelevantes (IIA). Na prática, em uma amostra de 100 consumidores, onde 80 escolhem a marca **A** e 20 escolhem a marca **B**, espera-se a mesma desigualdade de escolha (isto é,  $80/20 = 4$ ) se os mesmos escolhessem entre as marcas **A**, **B**, **C** (por exemplo: 60%, 15% e 25%).

As técnicas para calibração dos parâmetros do modelo podem ser:

- a) mínimos quadrados;
- b) linearização aproximada; e
- c) máxima verossimilhança.

A técnica freqüentemente utilizada nos estudos de preferência declarada tem sido a máxima verossimilhança.

#### 14 - Ajuste Através de Máxima Verossimilhança

É o método de estimativa que se baseia na escolha dos parâmetros  $\beta$ , os quais, para uma variável discreta, maximiza a probabilidade de se obter o evento particular analisado ou a densidade de probabilidade no ponto considerado.

Uma vez definido a função densidade de probabilidade  $f(x, \beta)$  e o conjunto de valores  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , a função de máxima verossimilhança é dada por:

$$L(\beta) = \prod_{n=1}^N f(x_n, \beta) \quad (6)$$

onde **N** é o número de observações.

O estimador de máxima verossimilhança é o valor de  $\beta$  que maximiza a função  $L(\beta)$ .

### 15 - Modelo *Logit* Explodido

O modelo *logit* explodido é utilizado quando o método de pesquisa de preferência declarada envolve ordenamento de alternativas em um conjunto de seleções. Supondo que o conjunto de escolha  $C_n$  possui um número de  $J$  alternativas, então, o modelo explode a seqüência a um indivíduo em  $J-1$  seqüências como se fossem escolhas feitas por diferentes entrevistados.

Para explodir a informação contida nos dados ordenados com  $J$  alternativas é necessário, primeiramente, considerar a ordem de escolha. Se as probabilidades de escolha seguem o mesmo modelo *logit*, a probabilidade de observar uma ordem de classificação para a alternativa **1** ser preferida a **2**, a alternativa **2** a **3**, e assim por diante, é dada pelo produto de  $J-1$  funções do modelo *logit* multinomial:

$$P_n(1,2,\dots,J) = \prod_{i=1}^{J-1} \frac{\exp(\beta x_{in}^i)}{\sum_{j=i}^J \exp(\beta x_{jn}^i)} \quad (7)$$

Se foram feitas  $N$  observações de dados ordenados, a função de verossimilhança para um modelo *logit* é dada por:

$$L^*(\beta) = \prod_{n=1}^N \prod_{i=1}^{J-1} \frac{\exp(\beta x_{in}^i)}{\sum_{j=i}^J \exp(\beta x_{jn}^i)} \quad (8)$$

Tendo em vista que a função exponencial é monótona crescente, o ponto que maximiza  $L^*$  também maximiza  $\ln(L^*)$ . O logaritmo da função de verossimilhança a ser maximizada é dado pela expressão:

$$L(\beta) = \ln(L^*(\beta)) = \sum_{i=1}^{J-1} \sum_{n=1}^N \left[ \beta x_{in}^i - \ln \sum_{j=i}^J (\beta x_{jn}^i) \right] \quad (9)$$

Este é um modelo *logit* multinomial estimado com dados de escolha expandido de ordenação de alternativas. Tal modelo é referido como modelo *logit* explodido porque a função de log-verossimilhança é um somatório das log-verossimilhança do modelo *logit* multinomial de todas as decomposições dos dados expandidos.

A ordenação deve ser construída em ordem crescente de preferência para cada entrevistado. Falhas nesse sentido podem gerar ruídos e até mesmo invalidar os resultados do modelo.

## **16 - Aplicações das Técnicas de Preferência Declarada (TPD)**

A técnica de preferência declarada foi originalmente desenvolvida em pesquisa de *marketing* no início de 1970, tornando-se mais usada desde 1978. Na área de transporte tais métodos receberam uma expressiva utilização. Na década de 80 essa atenção tornou-se mais visível com o crescente número de artigos em jornais e revistas especializadas na área.

As informações provenientes de pesquisas de preferência declarada podem ser utilizadas, dentre outros, para:

- a) desenvolvimento de novos produtos;
- b) análise de investimento em infra-estrutura;
- c) estimar elasticidade;
- d) planejamento de *marketing*; e
- e) estimar demanda/ market share.

Segundo **Novaes e Carvalho (1994)**, em nível de Brasil, vários são os estudos que já foram desenvolvidos com o auxílio de técnicas de preferência declarada. Dentre eles pode-se destacar:

- a) estudo sobre as modalidades de transporte público;
- b) desenvolvimento de uma *busway*;
- c) comparação dos sistemas de ônibus e VLT (veículo leve sobre trilho);
- d) sistema de média e alta capacidade para transporte público;

- e) implantação de parâmetros condicionantes à implementação dos planos e projetos de ciclovias;
- f) análise de demanda por serviços ferroviários e a relação com a qualidade de serviços prestados.
- g) o valor do conforto nos serviços de transporte público urbano;
- h) demanda de viagens a *shopping centers*; e
- i) o valor da marca no transporte aéreo.

Ainda, pode-se mencionar outros trabalhos:

- j) planejamento de rede escolar, em **Bastos (1994)**;
- k) avaliação de hotéis segundo o ponto de vista dos turistas, em **Efrón (1994)** Apud **de Freitas (1995)**;
- l) modelagem comportamental de decisores no setor imobiliário, em **de Freitas (1995)**;
- m) divisão de mercado no transporte intermunicipal de passageiros, em **Carvalho (1993)** Apud **de Freitas (1995)**; e
- n) análise do nível de serviço logístico de empresas exportadoras contêinerizadas, em **Vieira (1994)** Apud **de Freitas (1995)**.