**ROTEIRIZAÇÃO DE ÔNIBUS URBANO: ESCOLHA DE
UM MÉTODO PARA AS GRANDES CIDADES
BRASILEIRAS**

Alexandre Barra Vieira

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Eiji Kawamoto

São Carlos

1999

Para

Ana Lúcia, amor dedicação

Paulo Roberto, exemplo amigo

com todo o carinho e reconhecimento

do seu filho.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Eiji Kawamoto, pela orientação da pesquisa, pela sua dedicação, pelo seu profissionalismo, e pela amizade demonstrada em seus conselhos e no ótimo convívio nesses 28 meses. Enfim, por ter sido mais do que um orientador, e sim um exemplo. Muito obrigado, prof. Eiji!

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro (bolsa de mestrado).

À Área de Pós-Graduação em Transportes da EESC/USP, pela aceitação no Programa, e provisão de equipamentos e local de trabalho adequados. Aos pós-graduandos, professores e funcionários do Departamento de Transportes – STT da EESC que colaboram de alguma forma para o desenvolvimento desta pesquisa, ou simplesmente pela boa convivência.

Às bibliotecas que forneceram material bibliográfico, especialmente: Biblioteca Central da EESC, Biblioteca da Área de Engenharia da UNICAMP, Biblioteca da Engenharia Civil da EPUSP, Biblioteca Central da UFSCar, e Biblioteca do STT. À Internet, recurso importante para o desenvolvimento da pesquisa científica.

À UFMG, pela nossa formação em Engenharia.

Ao prof. Antônio Nélon, pelos auxílios durante o curso, pelas referências bibliográficas, pela atuação cordial enquanto Coordenador da Área, por ter participado da banca de Qualificação, pela amizade.

Ao prof. Setti, por coordenar-nos no Programa de Aperfeiçoamento de Ensino da EESC.

Ao prof. Edson, pelas dicas sobre fundamentos de roteirização, e pela leitura da dissertação e participação na banca de Defesa.

Ao prof. Sorratini, da UFU, pela leitura da dissertação e participação na banca de Defesa.

Ao prof. Carlos Nassi, da COPPE/UFRJ, pelo envio de cópia de uma dissertação por ele orientada, bem como o algoritmo desenvolvido na pesquisa.

Ao prof. Hugo Pietrantonio, do Departamento de Engenharia de Transportes

da EPUSP, pela indicação e cessão de importante material bibliográfico.

Aos professores Pablo Moscato (*Universidad de la Plata*) e Reinaldo Morábito (UFSCar), pelas dicas em questões computacionais.

Aos professores Felipe Loureiro e Vanildo Medeiros (DET/UFC), pela cessão do micro e facilitação de trabalho, durante as “férias” de jan/fev de 1998.

Aos professores da UFSCar, Archimedes Raia Júnior, pela boa vontade em atender, e Suely Sanches, por ter participado da banca de Qualificação, pelas importantes referências bibliográficas e também por sua boa vontade.

À prof^a. Regina Berretta (ICMC/USP), pela dedicação demonstrada nas aulas de linguagem C, durante as “férias” de julho de 1998.

Ao prof. Nigel Wilson, do *Massachusetts Institute of Technology*, EUA, pela indicação de trabalhos importantes de roteirização no TPU.

Ao prof. Avi Ceder, do *Technion-Israel Institute of Technology*, Israel, pelo envio de importante material bibliográfico e troca constante de informações.

Um agradecimento especial ao prof. Hani Mahmassani, da *University of Texas at Austin*, EUA, pela indicação e envio de material bibliográfico muito importante e informações.

Ao prof. Vukan Vuchic, da *University of Pennsylvania*, EUA, pelo grande exemplo de profissionalismo e consideração demonstradas no curso “*Transportation Planning and Its Role in Cities*”, e pela entrevista concedida.

Às secretárias da Pós-Graduação do STT, Heloísa e Angélica, pela cordialidade no cumprimento da função. Ao pessoal da secretaria geral, Líliam, Magaly, Nelsão e Suely, e dos laboratórios, ao Oliveira, pelo bom convívio. Ao Carlos “Toco” e ao Fio, pelo suporte em informática.

Aos funcionários da área administrativa da Escola de Engenharia de São Carlos, por cumprirem bem sua função, especialmente as bibliotecárias Elenise, Helena e Heleninha e todo o pessoal do Serviço de Pós-Graduação.

À Diretoria da FIPAI, especialmente ao prof. Odilson Fernandes Coimbra (diretor presidente), pela assinatura do convênio que possibilitou a cooperação entre a BHTRANS e a EESC.

À Diretoria da BHTRANS, especialmente Dr. Carlos Andrade Pereira

(presidente) e Dr. João da Silva Dias (diretor de Planejamento), que assinaram o convênio. Ao Dr. João Ernani Antunes Costa, gerente do BHBUS, que o facilitou. Ao amigo Alexandre Meirelles, pela interlocução, facilitando o convênio e outros tantos contatos nessa empresa. À Elisabeth Gomes de Moura, pelas diversas reuniões sobre a prática da roteirização dessa empresa. Aos profissionais também da BHTRANS, por seus auxílios na obtenção de informações: Amélia Silva, Fernando Pessoa, Rogério Carvalho.

Aos técnicos em transporte de todo o país que contribuíram de forma direta ou indireta para o EPROLB. Especialmente a: José de Oliveira Guerra (IPLANRIO) e, pelo intermédio, Marcelo Camilli Landmann e Ilce Marília Dantas Pinto (CET-Rio); Sandra Borges e Rômulo Montezuma (ETTUSA); Wagner Emanuel da Silva Mota e Patrícia Bittencourt T. das Neves, e, pelo intermédio, Frederico da Cunha Mendes (CTBel); Sandoval Jorge Guimarães Loureiro, Maria Perpetuo Socorro Gonçalves e Maurílio Ribeiro (EMTU Manaus); Luiz Filla e Eric Kerin (URBS); Milton Pires Batista (TRANSURB); Danyela Moraes da Silva (CARRIS); Alberto F. Lauletta, Hughson Paiva de Castro e Pedro Luiz de Brito Machado (SPTrans); Lúcia Guimarães Recena e Ricardo Rios, pelo contato inicial (EMTU Recife); Elba Torres, Inês Alves e Paulo Viana (STP). Agradecemos àqueles que contribuíram, mas que infelizmente não temos como citar porque não termos tomado conhecimento de seus nomes.

Ao amigo Frederico Torres Fonseca (PRODABEL), pela paciência na tentativa de conversão dados do APIC para o TransCAD.

Ao colega Ricardo Esteves, da COPPE/UFRJ, pelo envio das cópias de duas dissertações defendidas no Rio de Janeiro.

À Diretoria da TECTRAN, TECGIS e TECBUS, especialmente Dr. Eduardo, Dr. Silvestre, Dr. Francisco e Dra. Sabina, pela confiança na cessão dos dados geográficos e tentativa de apoio em algumas fases da pesquisa.

À Diretoria da ANTP, especialmente ao Dr. Ayrton Camargo e Silva e Sra. Maria Palmira Mançano, pela lista de contatos com os órgãos de transporte no país.

Ao Eng^o. Maurício Olbrick, da Viação Renascença, pelas informações sobre o sistema de transporte coletivo de São Carlos.

Aos amigos que cederam material bibliográfico, especialmente: Marcelo Luna, Eric Amaral e Cynthia “cunhada”. Ao Pastor, também pelas referências bibliográficas, e pela verdadeira amizade e convívio respeitoso de religiões.

Ao Dr. Nilder Furtado, pelo exemplo de trabalho e dicas de organização.

À D. Leonor, companheira na Catequese, e à sua família, pela amizade, pelas orações, por apresentarem-me os ensinamentos da Rainha da Paz. A nossos catequizandos, que me ensinaram mais do que nós a eles. Aos demais companheiros da Catequese da Nossa Senhora de Fátima: Ari Luís, Célia, Janaína, Leandro, Mário, D. Flora e Márcia, e nosso pároco, Pe. João Roberto, Rita e D. Daicy. Ao Grupo de Oração Universitária da USP, o “G.O.U. Sal e Terra”, principalmente a Bertini, Jô, Kelly e Vívian. E a toda comunidade cristã de São Carlos, em particular pertencente às Paróquias de N. S. de Fátima, de São Sebastião, de São Benedito e à Catedral.

Ao prof. Pierre, e colegas do francês, pelo aprendizado desse idioma.

À equipe de pólo aquático do CAASO, especialmente a nosso amigo e coordenador, Gui, pelos treinos durante 1997 principalmente.

Ao CEFER, pela oportunidade da prática esportiva e de lazer. Ao SESC São Carlos, pelas tantas atividades culturais e desportivas.

À prof^a. Aline, ao Walter e demais colegas do Shiatsu, por apresentar-me uma técnica oriental muito útil às atividades de pesquisa.

Aos colegas da UFPB Campina Grande: Norma (em especial), Dorinha, Júlio e Adriano, pela amizade iniciada no XII ANPET.

Aos amigos do IQSC/USP: Ana Paula Joaquim, Ana Paula Camargos, Anelise, Marcinha, Teko e Angélica “Shakira”, especialmente às três primeiras, que nos receberam com muita boa vontade, desde a primeira visita à São Carlos.

À turma do ICMC/USP, pela amizade, indicação de bibliografia e auxílio em questões de programação, em especial: Jaque, Mari, Marisa, Mirla e Roberto. À Aletéia, pela amizade e pelas dicas em linguagem C.

À turma do SHS, pela amizade: Lu Nalim (em especial), e Rachel. À Karlinha, pela ajuda na organização da nossa biblioteca, pela amizade.

Às amigas Con, Adriana, Aline e Ângela, pelo humor na fase final.

Aos vizinhos do Astúrias I, pela boa convivência, principalmente D. Maria

Helena (a “mãezona” do prédio), Sr. Plínio, D. Adélia, Cláudio, Werner, prof. Ancelmo, e Laffaiete, Filó e Léo.

Aos colegas da APG: Flávia, Hélio, Jane, Maurício, Everaldo “Pacato”, Sérgio, Silvana, Vânia, e Volnei, pela luta por qualidade no desenvolvimento científico e tecnológico do Brasil. Amigos da COMSENSO, valeu a pena!

A todos nossos colegas de turma: Cely, Cláudio, Hilário, Lisle, Márcia, Marco, Simone e Zerbini, que iniciaram o mestrado em março de 1997.

Aos goianos Ricardão e Renatinho, pela grande amizade.

Aos colegas que já se encontravam no STT quando chegamos: Nair Cristina, Delfos, Ely, Mário, Renata e também aos que chegaram depois e têm se mostrado igualmente bons companheiros: Ana Paula, Andréa, Carlos Prado, César, Cris, Heliana, Josi, Omar “Lobo Solitário”, Tule, Zé Maria e Zé Roberto.

À diretoria da Rádio Alternativa, especialmente ao Renato “Gorpo”, pela possibilidade de transmitir semanalmente o programa Brasileiríssimo, com o Topó. Aos companheiros de rádio “Buda”, “Buck” e “Mindu”, pela amizade.

Aos alagoanos Júlio e Romel, também pela amizade.

Aos nossos amigos e colegas do Engana Samba: “Beraba”, Fábio, José Luiz, Juninho, Júnior, Marcão, Mateus, Ricardinho e Rone. E também Rita (em especial), Simone, Fernanda e Suzana.

Aos são-carlenses: Italinho, Madalena, Nadja, Nádia e Puff, pela amizade.

Àqueles que apesar de distantes demonstram sua amizade: Flávio e Nadja.

À D. Maria, por manter nosso lar limpo e cozinhar nos últimos meses. Igualmente agradecemos às faxineiras anteriores: D. Carolina, Maria e Maria.

À Dani e família, pelo incentivo inicial e auxílio na mudança para Sanca.

Aos “novos” cearenses: Andrezão, Evim, Fábio, Iran, João Fernando e Tibério, pela grande amizade iniciada e acolhida em seus lares no último mês.

Ao Guilherme, pela amizade, companheirismo e divisão de despesas no nosso lar. Valeu, “nó cego cachorrão”!

Ao caro amigo Henrique, o “Benzinho”, pela cessão de alguns artigos, mas principalmente pela amizade.

A Ângela, Nora Nei e Wanderson, da PROMAVI, pelo apoio na confecção da versão definitiva.

À Anette, pelo esclarecimento de dúvidas na Língua Portuguesa e a toda sua família, pela amizade.

Ao grande amigo Rodrigo “Palhaço”, pela inestimável ajuda na conferência.

À grande amiga Ana Elisa, por tentar mostrar a todos como a vida é bela.

Ao grande amigo Marcos Kutova, pelas caronas a BH, pela amizade.

Ao Márcio, companheiro na representação discente dos pós-graduandos do STT, e grande amigo. Diz “macho réi”!

Ao grande amigo que nos apoia sempre, o Eng^o. Alexandre Lima Marques da Silva, também conhecido como Parêia, Topó, Maceió e outros tantos apelidos carinhosos. Nosso muito obrigado!

A todos nossos familiares que já partiram, especialmente padrinho Dedé, tia Lourdes, tio Zezé, tia Cecília, vô José e vô Jair. Aos amigos de Rio Pomba, especialmente Maria e Carola. À toda nossa família (madrinha Vânia, primos, tios e nossas queridas avós Cleide e Joaquina, D. Mercedes e Mami). Aos amigos, principalmente Alessandro, Beto, Darino, Érika, Gil, Léo, Mucci, Tau, Valesca e Verde, que estão em Belo Horizonte, mas apesar da distância sempre mostraram-se uma referência constante de apoio.

À Michelle, por seu amor, e à sua família, pelo apoio incondicional, mesmo a 3.300 km de distância.

Às queridas irmãs, Letícia e Denise, pelo constante incentivo e carinho.

Ao papai e à mamãe muito amados, pelo auxílio financeiro e apoio moral.

E, acima de tudo, a Deus.

Sinceramente agradecemos,

Alexandre Barra

julho/99

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	I
LISTA DE TABELAS.....	II
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS.....	2
1.2. JUSTIFICATIVA.....	3
1.3. ETAPAS DO TRABALHO.....	4
1.4. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	6
1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	8
2. METODOLOGIA DA ROTEIRIZAÇÃO DE TRANSPORTE PÚBLICO URBANO POR ÔNIBUS	11
2.1. INTRODUÇÃO À ROTEIRIZAÇÃO	11
2.2. PRINCÍPIOS BÁSICOS NA DEFINIÇÃO DE REDES DE TRANSPORTE.....	21
2.3. OS MÉTODOS DE ROTEIRIZAÇÃO DE TPU POR ÔNIBUS	24
2.4. MÉTODOS APLICÁVEIS A GRANDES SISTEMAS	41
3. PROCEDIMENTOS ADOTADOS NOS ESTADOS UNIDOS E CANADÁ.....	71
3.1. O LEVANTAMENTO NORTE-AMERICANO	71
3.2. ANÁLISE DO LEVANTAMENTO NORTE-AMERICANO	81
4. A PRÁTICA DA ROTEIRIZAÇÃO NO TPU POR ÔNIBUS NO BRASIL.....	91
4.1. ROTEIRIZAÇÃO NO PAÍS.....	91
4.2. PROCEDIMENTOS ADOTADOS NO PAÍS.....	109
4.3. COMPARAÇÃO DO LEVANTAMENTO DO TRB COM O EPROLB	111
5. ESCOLHA DO MÉTODO MAIS ADEQUADO ÀS GRANDES CIDADES BRASILEIRAS.....	115
5.1. COMPARAÇÃO DOS PADRÕES BRASILEIROS COM OS PADRÕES NORTE-AMERICANOS E CANADENSES	115
5.2. PARA A ESCOLHA DO MÉTODO MAIS ADEQUADO.....	119
5.3. ESCOLHA DO MÉTODO	128
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	133
6.1. COMENTÁRIOS SOBRE O TRABALHO DESENVOLVIDO.....	133
6.2. CONCLUSÕES RELATIVAS À ROTEIRIZAÇÃO NO TPU	135
6.3. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	137
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141
OBRAS CONSULTADAS.....	147
APÊNDICES	

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - REDES HIPOTÉTICAS DE NEWELL	30
FIGURA 2 - PORCENTAGEM DE ADOÇÃO DE PADRÕES PELAS EMPRESAS NORTE-AMERICANAS E CANADENSES	72
FIGURA 3 - CAPACIDADE DE TRANSPORTE DOS MODOS.....	126

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	NÍVEIS DE PLANEJAMENTO DE UM SISTEMA DE ÔNIBUS.....	14
TABELA 2	MÉTODOS HEURÍSTICOS EUROPEUS	26
TABELA 3	MÉTODOS HEURÍSTICOS BRASILEIROS DE ROTEIRIZAÇÃO	27
TABELA 4	INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA FROTA NO RESULTADO	48
TABELA 5	AS CINCO CATEGORIAS DOS DADOS DE ENTRADA DO ALGORITMO RGA	54
TABELA 6	CRITÉRIOS DOS PADRÕES PARA PROJETO DE ROTAS, SELECIONADOS POR TAMANHO DO SISTEMA.....	82
TABELA 7	PESOS PARA PONDERAÇÃO DAS RESPOSTAS POR TAMANHO DA FROTA	83
TABELA 8	AS DOZE CAPITAIS BRASILEIRAS MAIS POPULOSAS.....	101
TABELA 9	OS QUATRO MAIS POPULOSOS MUNICÍPIOS BRASILEIROS DO INTERIOR.....	102
TABELA 10	RESPOSTAS À QUESTÃO 10.1 DO FORMULÁRIO DO EPROLB	104
TABELA 11	RESPOSTAS À QUESTÃO 10.3 DO FORMULÁRIO DO EPROLB	107
TABELA 12	VALOR DO TEMPO DE VIAGENS A TRABALHO	131

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	– Algoritmo Genético
ANTP	– Associação Nacional de Transportes Públicos
APG	– Associação de Pós-Graduandos
ASTEF	– Associação Técnica Paulo de Frodin
BNDES	– Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BH	– Belo Horizonte
BHBUS	– Plano de Reestruturação do Sistema de Transporte Coletivo
BHTRANS	– Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte S.A.
CAPES	– Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CARRIS	– Cia. Carris Porto-Alegrense
CC	– Condições de Contorno
CBD	– <i>Central Business District</i>
CBTU	– Companhia Brasileira de Trens Urbanos
CET-Rio	– Companhia de Engenharia de Tráfego do Rio de Janeiro
CET-SP	– Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo
COPPE	– Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia
COP	– <i>Combinatorial Optimization Problem</i>
CTBel	– Companhia de Transportes do Município de Belém
CTPP	– <i>Census Transportation Planning Package</i>
DET	– Departamento de Engenharia de Transportes
DIPLAN	– Diretoria de Planejamento
EESC	– Escola de Engenharia de São Carlos
EMTU	– Empresa Municipal de Transportes Urbanos (Manaus)
EMTU	– Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos (Recife)
EMTU/SP	– Empresa Metropolitana de Transporte Urbano de São Paulo
EPROLB	– Estado da Prática da Roteirização de Ônibus: Levantamento Brasileiro
EPTC	– Empresa Pública de Transporte e Circulação
EPUSP	– Escola Politécnica da USP
ETTUSA	– Empresa de Trânsito e Transporte Urbano S.A.
EUA	– Estados Unidos da América
FIPAI	– Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial
GEIPOT	– Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes
IA	– Inteligência Artificial
ICMC	– Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação
IQSC	– Instituto de Química de São Carlos
IPK	– Índice de Passageiro Quilômetro
IPLANRIO	– Empresa Municipal de Informática e Planejamento S.A.
MD	– <i>Maximum Demand insertion</i>
MDMC	– <i>Maximum Demand per Minimum Cost insertion</i>

MDML	– <i>Maximum Demand per Minimum Route Length Increase insertion</i>
MDMT	– <i>Maximum Demand per Minimum Time insertion</i>
MPO	– <i>Metropolitan Planning Organization</i>
NETAP	– <i>Network Analysis Procedure</i>
NHL	– <i>National Hockey League</i>
NTU	– Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos
O/D	– Origem/Destino
PED	– ponto(s) de embarque e desembarque
PET	– Programa de Engenharia de Transportes
PRODABEL	– Empresa de Processamento de Dados de Belo Horizonte S/A
PROMAVI	– Serviços Técnicos e Empreendimentos S/C Ltda.
RGA	– <i>Route Generation Design Algorithm</i>
RGP	– <i>Route Generation Procedure</i>
SCP	– <i>Set Covering Problem</i>
SHS	– Departamento de Hidráulica e Saneamento
SIG	– Sistema(s) de Informação Geográfica
SIG-T	– Sistema(s) de Informação Geográfica para Transportes
SPT	– Sistema(s) para Planejamento de Transportes
SPTrans	– São Paulo Transporte S.A.
STP	– Superintendência de Transporte Público
STT	– Departamento de Transportes
TAZ	– <i>Traffic Analysis Zone</i>
TECBUS	– Consultoria e Projetos Ltda.
TECGIS	– Sistemas de Informação e Engenharia Ltda.
TECTRAN	– Técnicos em Transporte Ltda.
TCRP	– <i>Transit Cooperative Research Program</i>
TPU	– Transporte Público Urbano
TRANSURB	– Empresa de Transporte Urbano do Estado de Goiás S.A.
TRB	– <i>Transportation Research Board</i>
TSP	– <i>Travel Salesman Problem</i>
UFC	– Universidade Federal do Ceará
UFMG	– Universidade Federal de Minas Gerais
UFPB	– Universidade Federal da Paraíba
UFPE	– Universidade Federal de Pernambuco
UFRJ	– Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFRN	– Universidade Federal do Rio Grande do Norte
UFSCar	– Universidade Federal de São Carlos
UFU	– Universidade Federal de Uberlândia
UMTA	– <i>Urban Mass Transportation Administration</i>
UnB	– Universidade de Brasília
UNICAMP	– Universidade Estadual de Campinas
URBS	– Urbanização de Curitiba S.A.
USP	– Universidade de São Paulo
UTPS	– <i>Urban Transportation Planning System</i>
VLT	– Veículo Leve sobre Trilhos
ZCN	– Zona Central de Negócios

LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha(i,j)$	– matriz de excesso aceitável no tempo de viagem (diferença entre o tempo de viagem da rota e o menor tempo de viagem), expresso como uma percentagem do tempo de viagem gasto pela rota mais rápida que liga i a j , $\forall i,j \in N \Rightarrow \alpha(i,j)$ é maior ou igual a zero [%]
$\Delta p_H(i,j)$	– matriz da diferença entre o tempo de viagem da rota e o menor tempo de viagem entre i e j , $\forall i,j \in N$ [passageiro–hora]
λ_r	– frequência de atendimento associada à rota r
$\lambda_{\min}$	– frequência mínima de projeto (o equivalente a headway máximo)
ρ	– densidade espacial das viagens realizadas por unidade de tempo
γ_a	– custo por unidade de distância de caminhada por passageiro
γ_o	– custo operacional por unidade de distância percorrida pelo ônibus
γ_r	– custo por unidade de distância percorrida dentro do ônibus por passageiro
γ_w	– custo (médio) de espera por unidade de tempo por passageiro
A	– extensão da malha viária, no sentido Norte–Sul
a	– espaçamento entre as vias da malha viária tipo I
a^*	– espaçamento entre as vias da malha viária tipo II
a_1, a_2, a_3	– coeficientes de peso.
A_d	– distância percorrida pelo veículo para, partindo do repouso, alcançar a velocidade de cruzeiro (velocidade operacional), e imediatamente frear até sua completa parada [m]
a_{tr}^r	– $\begin{cases} 1, & \text{se o caminho com transferência } tr \text{ conter a rota } r \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
A_t	– tempo gasto no processo descrito na variável A_t [s]
B	– extensão da malha viária, no sentido Leste–Oeste
C_1	– valor de um passageiro–hora do tempo de viagem
C_2	– custo de um veículo (incluindo o custo de capital e custo operacional relativo ao período de tempo)
D	– distância em linha reta entre a origem e o destino [km]
d	– espaçamento médio entre os PED, [m]
d_o	– carregamento desejável para cada veículo (carregamento padrão)
d_{ij}^{tr}	– demanda entre i e j ao longo do caminho de transferência tr
d_{ij}^r	– demanda entre i e j , sendo $i, j \in N$, carregando a rota r
E	– esforço físico médio requerido por unidade tempo durante a viagem [kcal/min]
EH_r	– horas vazias em rota r (definido como os lugares vazios no veículo em uma base horária, medidas em relação à capacidade de projeto do veículo)
F	– velocidade média de caminhada [m/s]
F_k	– frequência de serviço da rota k

FL_i	– fluxo de passageiros na unidade de tempo, no arco i .
F_m	– mínima frequência para uma rota (o recíproco de headway máximo)
FS	– frota (número de veículos necessários para prover todas as viagens nos conjuntos de rotas escolhidos)
h	– headway nas linhas da segunda configuração
h_1	– headway na linha 1, que compete com a linha 2
h_2	– headway na linha 2, que compete com a linha 1
L	– distância média percorrida dentro do ônibus, pelos passageiros [m]
L_1	– menor extensão possível para uma rota
L_2	– maior extensão possível para uma rota
L_k	– extensão da rota
L_r	– carregamento máximo de passageiros na rota r
m	– número máximo de rotas
M	– número mínimo de rotas requerido para uma determinada área
N	– número de pares centrais
n	– número de rotas
NB_i	– número de viagens por ônibus a serem realizadas numa unidade de tempo, no arco i
N_R	– número de dependentes da renda familiar
N_r	– conjunto de nós localizados na rota r
N_{tr}	– conjunto de nós localizados no caminho de transferência tr
P_s	– valor máximo que o passageiro está disposto a pagar para usar o serviço ‘s’ oferecido [US\$]
$PH(i,j)$	– ‘passageiro . hora’ entre nós i e j , sendo $i, j \in N$ (definido como o tempo do passageiro <u>no veículo</u> em uma base horária entre os dois nós)
R	– $\{r\}$ = conjunto de rotas
$r(i,j)$	– tempo total de transferência gasto pelo usuário entre i e j , $\forall i,j \in N$ [passag.–hora]
R_f	– renda familiar mensal [US\$/mês]
S	– tempo perdido no PED [s]
T	– distância média de caminhada, do ponto de origem ao PED, geralmente adota-se $0,25.D$ [m]
T_s	– tempo de viagem no serviço ‘s’ oferecido [min]
$t(i,j)$	– matriz dos tempos de viagem de i para j , $\forall i,j \in N$
$t'(i,j)$	– matriz do tempo de espera estimado para a demanda de i para j , $\forall i,j \in N$ [passag.–hora]
$t_m(i,j)$	– matriz dos menores tempos de viagem de i para j , $\forall i,j \in N$
TR	– $\{tr\}$ = conjunto de todos os caminhos de transferência
t_r	– tempo total de viagem da rota r
t_{ij}^r	– tempo de viagem entre i e j na rota r
t_{ij}^{tr}	– tempo de viagem entre i e j no caminho de transferência tr
V	– velocidade operacional do veículo [m/s]
$WH(i,j)$	– tempo de espera entre nós i e j , sendo $i, j \in N$ (definido como a quantidade de tempo gasto nos pontos de parada entre os dois nós)
w_r	– tempo de espera do usuário da rota r
Z	– número de veículos requeridos para operar o sistema

RESUMO

VIEIRA, A. B. (1999). *Roteirização de ônibus urbano: escolha de um método para as grandes cidades brasileiras.* São Carlos, 1999. 148p. **Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.**

O ônibus é o principal modo de transporte público de passageiros das grandes cidades brasileiras. Ultimamente as redes de transporte público vêm sofrendo modificações estruturais importantes, visando sua melhoria. Esta Dissertação descreve a pesquisa de mestrado que teve como objetivo o estudo de métodos racionais de Roteirização de Ônibus Urbano para a escolha de um método adequado à aplicação nas grandes cidades brasileiras. A revisão bibliográfica dá mais ênfase aos métodos que atendem a esse objetivo e que possibilitam sua aplicação imediata com ou sem modificação. Para se conhecer as diferenças locais em termos de planejamento dos itinerários nas maiores capitais brasileiras, apresenta-se um levantamento feito junto a 11 (onze) órgãos gestores. Comparam-se os procedimentos adotados no Brasil com os adotados nos Estados Unidos e Canadá e escolhe-se o melhor método com base em critérios existentes na literatura. O objetivo principal foi alcançado: o método indicado pode ser aplicado, com algumas modificações concernentes principalmente à coleta de dados. Espera-se que esta pesquisa contribua para a divulgação das técnicas de roteirização baseadas em modelos matemáticos de modo a auxiliar o especialista: (a) na alteração e/ou concepção das rotas (b) na completa reformulação de complexos sistemas de transporte público.

Palavras-chave: planejamento de transportes transporte público urbano redes roteirização – ônibus.

ABSTRACT

VIEIRA, A. B. (1999). *Bus transit routing: choosing a model for large-sized Brazilian cities.* São Carlos, 1999. 148p. **Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.**

Bus transit is the main urban public transportation mode available in large-size Brazilian cities. Brazilian transit networks have held important structural modifications lately, seeking their improvement. This dissertation describes a master's research that had as the main objective the study of rational bus transit routing methods. The goal is to choose the best of these methods for application in large-size Brazilian cities. The literature review focused on methods which are addressed to this objective, and that could be used with or without changes for this purpose. A total of 11 (eleven) transit agencies answered a national survey made to identify local differences in the planning techniques used in the largest Brazilian capitals. Procedures adopted in Brazil were compared with the ones applied in the United States and in Canada and one method was then chosen, taken into account evaluation criteria found in the literature. The main objective of this research was reached: the method selected can be applied with some minor modifications concerning mainly the data collection procedure. This research shall contribute for the popularization of mathematical models as routing techniques that could help planners: (a) to design a new bus route and/or to redesign an existing one (b) to completely redesign complex transit systems.

Keywords: transportation planning urban public transportation transit networks
routing – bus.

1. INTRODUÇÃO

O processo de determinação de novas linhas de ônibus, ou de completa reestruturação de uma rede de transporte coletivo de uma cidade é um problema complexo, pois envolve muitas variáveis. Entretanto, o traçado de novos itinerários geralmente é feito considerando-se um conjunto restrito delas, conforme será mostrado nos Capítulos 3 e 4 desta Dissertação.

Isto é compreensível, visto que em sua grande maioria os órgãos de planejamento e gestão de transportes do país e do exterior não possuem ferramentas específicas para este fim. Cabe, então, somente ao planejador executar essa tarefa, baseando-se quase que unicamente em sua experiência profissional.

Com esta pesquisa de mestrado, pretende-se preencher uma lacuna no que tange à sistematização das técnicas, já consagradas, porém pouco utilizadas, de roteirização no Transporte Público Urbano - TPU por ônibus. Sabe-se que no geral as técnicas objetivas de roteirização de ônibus urbanos não fazem parte do cotidiano das agências governamentais de gestão dos transportes públicos. Muitas vezes, são inclusive desconhecidas dos especialistas que diariamente lidam com o problema de alteração de itinerários.

A roteirização no TPU por ônibus não deve ser confundida com o *travel salesman problem* (TSP), o problema do caixeiro viajante, muito estudado nos últimos trinta anos. As características do problema em estudo diferem bastante do TSP, no sentido que um modelo matemático deve ser construído considerando-se não só aspectos da rede de transporte, mas também a demanda e o nível de serviço a ser ofertado. Assim, o problema pode ser caracterizado como um *combinatorial optimization problem* (COP), ou seja, um problema de otimização combinatória.

Já no final da década de 1970 se constatava:

“A seleção da estrutura ótima de rotas para uma rede de tamanho real é um tipo de problema de otimização combinatória de proporções astronômicas”.

(NEWELL, 1979)

Os COP têm a seguinte forma: dado um conjunto de X soluções s e uma função objetivo f alocando a cada solução s em X um valor real $f(s)$, encontrar a solução s^* em X para a qual $f(s)$ seja mínima (COSTA, 1995). Modernos sistemas de busca, cujos algoritmos são simples e flexíveis, estão sendo utilizados para resolução dos COP (por exemplo: o Algoritmo Genético, a Busca Tabu e o *Simulated Annealing*). COSTA (1995) utilizou uma combinação dos dois primeiros para estudar o problema da Liga Nacional de Hóquei dos Estados Unidos (NHL), que foi traduzido matematicamente por uma função objetivo dotada de várias condições de contorno.

Como conclusão desta pesquisa, vislumbra-se a necessidade de se construir um novo sistema informatizado, que: (a) garanta um atendimento otimizado à demanda (característica mais importante), o que implica em analisar-se a oferta tanto do ponto de vista do operador quanto do usuário; (b) permita a inserção de conceitos modernos de planejamento de sistemas de transporte, para adequação às novas exigências do mercado de transporte urbano de passageiros (c) possibilite a análise de alternativas ordenadas por uma medida de valor que contemple também aspectos de nível de serviço ofertado e (d) possua fácil visualização gráfica dessas alternativas.

1.1. Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é apresentar o método de roteirização no Transporte Público Urbano por Ônibus mais adequado para aplicação nas grandes cidades brasileiras. Pretende-se analisar criticamente as funções objetivo existentes, para escolher um método que possa ser utilizado, em formato original ou modificado, no processo de planejamento das rotas de novas linhas de ônibus, bem como modificação das existentes. Pretende-se também analisar os procedimentos para avaliação e redimensionamento de linhas de ônibus urbanos dos Estados Unidos e Canadá, e compará-los com os procedimentos adotados no Brasil. Com base na

revisão bibliográfica e na análise dos procedimentos, é que se pretende definir qual dos métodos é o mais indicado.

1.2. Justificativa

Atualmente, o traçado de novas rotas de ônibus urbanos é estabelecido basicamente utilizando-se da experiência dos especialistas, não sendo usados muitos métodos objetivos que possam auxiliá-los. Não foi encontrada nenhuma referência bibliográfica contrária a esta assertiva, mas também não foi encontrada nenhuma que a corroborasse. Porém, com base no levantamento do Estado da Prática da roteirização no país, pode-se considerar como verdadeira a afirmação.

Na literatura científica, pode-se perceber que a Roteirização no TPU começou a ser estudada no final da década de 1970, estendendo-se basicamente até meados da década de 1980. A grande maioria das publicações a respeito concentra-se nesse período. BLACK (1995) dedica um capítulo inteiro de seu livro “*Urban Mass Transportation Planning*” ao planejamento de redes de transporte público. A bibliografia indicada ao final desse capítulo confirma o que foi afirmado no início do parágrafo. Pois, apesar de se tratar de um livro publicado há somente quatro anos, o referido capítulo foi escrito com base em publicações da época descrita acima.

Porém, atualmente alguns trabalhos importantes estão sendo publicados, o que indica que novamente a comunidade científica percebe a necessidade de se estudar o assunto. Na descrição dos principais métodos de roteirização de ônibus urbanos (ver Seção 2.4), observa-se claramente uma localização temporal que pode ser subdividida em dois grupos: o primeiro, da “consolidação das técnicas”, localizados em meados da década de 1980, e o segundo, das “novas perspectivas”, apresentados a partir de 1990.

Pergunta-se então: se é um assunto consolidado, por quê a necessidade de estudá-lo agora? Há no mínimo três respostas a esta pergunta: 1º.) o número de trabalhos consistentes é reduzido (VUCHIC, 1998)¹ e produzido em sua maioria há pelo menos uma década, o que os torna de difícil acesso como informação aos

¹VUCHIC, V. R. (1998). *Entrevista pessoal*. USP. Escola de Engenharia de São Carlos. (06 ago.)

técnicos de transporte em geral; 2º.) falta uma sistematização do que foi desenvolvido, de modo a aplicar os métodos na prática do planejamento de transportes; 3º.) há uma demanda real por maiores conhecimentos e domínio das técnicas de Roteirização por parte dos profissionais e pesquisadores brasileiros.

Experiências bem sucedidas corroboram esses motivos. Iniciativas de se utilizar métodos racionais para a otimização de redes de Transporte Público Urbano mostraram-se eficientes. Um software denominado VIPS II (VTS Transportation Systems), baseado em diversas funções objetivo desenvolvidas por HASSELSTRÖM (1981), foi aplicado em algumas cidades. Dentre elas Londres (Reino Unido), Estocolmo (Suécia) e Singapura (ver folder da VTS², e STOCKHOLM TRANSPORT, 1987a, b). O ganho em termos de diminuição do custo operacional global foi de 10 a 15 %, com uma redução de frota em torno de 14 %. O nível de serviço permaneceu inalterado, no caso da capital sueca, piorou em 2 %, no caso londrino, e melhorou em 1% em Singapura. Ou seja, com mudanças mínimas na qualidade da oferta, pôde-se otimizar o sistema, obtendo-se ganhos expressivos, com base em um método objetivo.

1.3. Etapas do Trabalho

Primeiramente, apresenta-se os métodos de roteirização e em seguida os padrões definidos pelo *Transportation Research Board* – TRB, órgão norte-americano de Transportes. Mostra-se como foi realizado o levantamento da prática no Brasil. Analisa-se as respostas para comparar os procedimentos brasileiros com os procedimentos estrangeiros disponíveis. Com base em critérios definidos na literatura, escolhe-se o método de roteirização do TPU por ônibus mais adequado para ser utilizado pelos órgãos gestores e empresas operadoras de grandes sistemas do Brasil. Finalmente, apresentam-se as conclusões desta pesquisa, e faz-se algumas recomendações para trabalhos futuros.

² VTS TRANSPORTATION SYSTEMS CO. *Can you really cut operating costs without losing riders? The answer is VIPS...* Göteborg, Sweden. /folder/

1.3.1 Estado da Arte

Consiste na pesquisa bibliográfica de todos os métodos de roteirização de ônibus urbanos já propostos em todo o mundo para serem aplicados em sistemas de transporte público de grandes cidades. Foram selecionados e classificados aqueles que atendem aos objetivos desta pesquisa. Foram detalhados somente aqueles que se mostraram mais adequados a uma implementação prática e que levam em consideração os fatores indispensáveis ao planejamento otimizado de redes de transporte público, mas é dada uma breve explanação sobre alguns dos métodos que antecederam esses métodos mais modernos.

A revisão bibliográfica contemplou, além dos métodos objetivos propriamente ditos, as recomendações básicas do processo. Ou seja, as principais “regras” a serem seguidas pelo planejador de itinerários de transporte público.

1.3.2 Padrões do TRB

Consiste na adaptação do texto *Bus Route Evaluation Standards* (Padrões de Avaliação de Rotas/Linhas de Ônibus), publicado pelo TRANSPORTATION RESEARCH BOARD – TRB (1995). O levantamento dos processos adotados na avaliação de desempenho dos itinerários representa não só uma forma de controle operacional, mas um subsídio ao planejamento das linhas. Assim, as alterações nos itinerários de linhas existentes, e o projeto de novas linhas ficam facilitados. Esse levantamento do TRB contemplou 111 órgãos de transporte público urbano dos Estados Unidos e Canadá. Faz-se uma crítica ao documento, apresentando novas análises e conclusões com base nos dados apresentados.

1.3.3 Estado da Prática no Brasil

Consiste no levantamento dos processos de roteirização no TPU, em especial no modo ônibus, adotados no país. Pretendeu-se saber como têm sido estabelecidas as rotas em 14 dos principais centros brasileiros pelos respectivos órgãos de poder concedente de transporte público urbano. O EPROLB – “Estado da Prática da Roteirização por Ônibus: Levantamento Brasileiro” obteve resposta de 11 das 12 capitais mais populosas.

1.3.4 Escolha de um método de roteirização para o caso brasileiro

Este é o objetivo principal desta pesquisa: a definição de uma técnica que possa ser implementada e utilizada no cotidiano das empresas de transporte coletivo do país. Para tal, comparou-se os principais métodos de Roteirização no TPU por ônibus, levando-se em consideração as funções objetivo que os compõem, com o que atualmente é feito na prática da roteirização. Como resultado final dessa análise, apresenta-se o método, enfatizando quais as situações em que ele pode ser aplicado, e quais modificações, implementações ou recomendações precisam ser feitas para a disseminação de seu uso.

1.3.5 Resultados

Considera-se como resultados desta pesquisa o que foi feito para se alcançar os objetivos. Foram plenamente atingidos, já que conseguiu-se definir um método adequado às grandes cidades brasileiras. O índice de respostas do EPROLB foi considerado suficiente para se definir um perfil de utilização de técnicas e procedimentos básicos no projeto de itinerários. Sua comparação com o levantamento do TRB também se mostrou factível, apesar de grandes diferenças conceituais e formais entre eles.

1.4. Considerações Iniciais

Uma dificuldade encontrada pelo autor desta Dissertação ao se realizar a revisão bibliográfica foi a questão da nomenclatura relativa ao assunto. O termo inglês *routing* pode ser aplicado tanto para a Roteirização, quanto para o roteamento³. Ainda, a definição de rotas pode ser confundida com a escolha de vias na malha apropriadas a um determinado fim, já que o termo *route* (tanto em inglês quanto em francês) também pode significar a rota de um automóvel ou caminhão, por exemplo. Há uma outra confusão que as pessoas que pretendem estudar mais a fundo o projeto de redes devem estar atentas. O termo rede (*network* em inglês e *réseau* em francês) muitas vezes se refere à rede (malha) viária, e não à rede de transporte público. Ou ainda, pode se referir a uma rede de comunicações ou ao

³ Ver observação quanto as diferenças de “roteirização” e “roteamento” no início do Capítulo 2.

estudo da teoria matemática e computacional da relação de arcos, nós, caminhos, etc. (Teoria dos Grafos).

Aquele que estiver pesquisando na área de rotas de ônibus urbanos certamente se deparará com a variedade de termos relativos à alocação (*assignment*) da demanda às rotas. Isso porque quando se fala em projeto de rotas (*route design*), muitas vezes o pesquisador refere-se à análise de produtividade das linhas de TPU já existentes, e não o projeto (traçado) de novas ligações. Ou ainda, refere-se às rotas escolhidas por motoristas de automóveis e.g., que têm como motivação principal evitar os congestionamentos. Este exemplo essencialmente diz respeito a um problema de Tráfego.

Lembrando o Modelo 4 Etapas de Planejamento dos Transportes (ver em BRUTON, 1979): 1) Geração de Viagens (produção e atração); 2) Distribuição de Viagens; 3) Alocação e 4) Escolha Modal, percebe-se que a alocação faz parte de uma etapa intrínseca ao planejamento dos transportes, e por isso já deve ser naturalmente realizada nos projetos. A confusão surge no momento em que se quer analisar o carregamento de linhas existentes, ou prever o carregamento das linhas caso haja mudanças. Para tal, são utilizados os chamados Sistemas para Planejamento de Transportes – SPT, e não rotinas para definição de itinerários ótimos numa rede. Os SPT possibilitam comparações entre alternativas de rotas quanto ao carregamento previsto, mas não possibilitam a análise da rede de TPU com todas suas características (integração multi modal, conectividade, etc.) nem fazem a geração automática de rotas alternativas às existentes.

Cabe observar-se também que *route*, em inglês, pode significar rota ou linha. No sentido estrito dessas palavras, rota significa caminho, rumo, direção; e o conceito de linha geralmente refere-se aos aspectos operacionais de um serviço de transporte público, como a frequência de atendimento, o tipo de operação, além do itinerário. Todavia, para se evitar problemas de interpretação, resolveu-se adotar como critério a equivalência de significados. Portanto, neste texto as palavras rota e linha serão entendidas como sinônimo, e se necessário serão feitas observações oportunas para diferenciação.

Também para se evitar problemas de interpretação quanto à nomenclatura de classificação dos métodos de roteirização, adotar-se-á o seguinte padrão: os métodos baseados fundamentalmente no conhecimento e na experiência técnica do planejador serão chamados métodos manuais, subjetivos ou não racionais, enquanto os métodos baseados fundamentalmente em formulação matemática, em funções objetivo (implementadas em computador ou não) e técnicas de busca informatizadas serão chamados métodos racionais, objetivos ou formais.

Resolvidas essas questões menores, explicita-se a seguir a estrutura desta Dissertação.

1.5. Estrutura da Dissertação

Existem 4 (quatro) níveis de divisão desta Dissertação: em primeiro nível, estão os Capítulos, numerados de 1 a 6; no segundo nível estão as Seções, numerados também em algarismos arábicos seguidos do número do Capítulo a que pertencem (por exemplo, a Seção 2.4 é a quarta seção do segundo capítulo); a mesma lógica serve para os dois níveis subseqüentes, sendo o terceiro nível denominado Item, e o quarto, Sub-Item. Antes de cada Capítulo há uma página de sumário detalhado (esta não interfere na numeração das páginas) contendo todos os níveis, já que no Sumário principal da Dissertação preferiu-se listar somente os Capítulos e as Seções.

A revisão bibliográfica está concentrada quase que totalmente no Capítulo 2. Inicia-se com um breve histórico da Roteirização, desenvolvendo-se com as recomendações básicas atuais, chegando-se ao ponto principal: os métodos formais de roteirização no Transporte Público Urbano por Ônibus. Faz-se então a descrição pormenorizada dos métodos mais importantes, que são comparados no Capítulo 5.

Os Capítulos 3 e 4 tratam da Prática da Roteirização: nos Estados Unidos e Canadá, e no Brasil, respectivamente. O terceiro Capítulo apresenta um estudo desenvolvido pelo *Transportation Research Board* – TRB, que trata dos padrões adotados pelos órgãos gestores de transporte norte-americanos e canadenses para a análise e projeto de linhas de ônibus. O quarto Capítulo trata do levantamento dos procedimentos adotados pelos órgãos de transporte brasileiros, realizado durante esta pesquisa de mestrado.

A análise e comparação dos procedimentos, bem como a escolha do método formal de roteirização de ônibus urbanos mais adequado às grandes cidades brasileiras são apresentados no Capítulo 5. As conclusões e recomendações vêm no último Capítulo, o de número 6.

Em seguida são listadas as Bibliografias Referenciada e Consultada. Logo em seguida, são colocados os dois apêndices. O Apêndice A contém os formulários recebidos, bem como o modelo do formulário enviado no EPROLB. No Apêndice B está o formulário enviado pelo TRB aos órgãos estadunidenses e canadenses.

2. METODOLOGIA DA ROTEIRIZAÇÃO DE TRANSPORTE PÚBLICO URBANO POR ÔNIBUS

Este é o Capítulo da revisão bibliográfica. Primeiramente, faz-se uma Introdução ao tema em estudo, o que inclui um breve histórico. Em seguida, apresenta-se os princípios básicos que norteiam a definição de redes de Transporte Público Urbano. Passa-se então ao Estado da Arte da Roteirização no Transporte Público Urbano por Ônibus, descrevendo os métodos separadamente em três categorias, de acordo com suas características de formulação. Na Seção 2.4 apresenta-se o detalhamento dos métodos mais importantes, que servirão de base para a escolha do Método mais adequado para aplicação em uma grande cidade brasileira típica. Passa-se finalmente a uma sistematização dos métodos, analisando-os e criticando-os na última Seção deste Capítulo. O método será escolhido, bem como as variáveis e as condições de contorno mais apropriados para aplicação ao caso brasileiro, levando-se em consideração as particularidades descritas no Capítulo 4 – A Prática da Roteirização no TPU por Ônibus no Brasil. A escolha do método é apresentada e justificada no Capítulo 5.

2.1. Introdução à Roteirização

Primeiramente, é aconselhável definir-se o termo “roteirização”, já que o mesmo será bastante utilizado em todo o texto desta Dissertação. Isto é interessante porque há uma certa confusão em relação ao termo “roteamento”, já que a tradução do inglês *routing* a ambos se aplicam. Foram selecionados alguns verbetes do Moderno Dicionário da Língua Portuguesa Michaelis, para que se possa dirimir dúvidas quanto ao emprego desses termos (MICHAELIS, 1998):

“rota”¹ – *sf* (*lat rupta*) **1** Combate, peleja **2** Rompimento de guerra. **3** Desbarato de um exército.

rota² – *sf* (*fr ant rote*, hoje *route*) **1** Caminho marítimo ou aéreo; direção, rumo. **2** *por ext* Direção, caminho. *R. alternada, Inform:* caminho reserva (alternativo) num sistema de comunicação, usado no caso de uma falha ou avaria.

roteamento – *sm* (*rotear*¹+*mento*²) *Inform* Determinação de uma rota apropriada para uma mensagem através de uma rede. *R. Dinâmico, Inform:* processo de seleção do caminho mais curto ou mais confiável para os dados no momento da conexão.

rotear¹ (*roto*¹+*ear*) *V* *arrotear*.

rotear² (*rota*¹+*ear*) *vtd* **1** Dirigir, governar (uma embarcação). *vint* **2** Marear. *vtd* **3** Abrir como rota: *Rotear um caminho. Rotear estradas às gerações futuras.*

roteirização – *sf* (*roteirizar*+*ção*) **1** Ato ou efeito de roteirizar. **2** Ato de dividir em roteiros (itinerários ou planos de trabalho).

roteirizar – *vtd* *bras* (*roteiro*+*izar*) Preparar o roteiro de: *Roteirizar um filme.*

roteiro – *sm* (*rota*²+*eiro*) [...] **2** Descrição pormenorizada de uma viagem importante; itinerário. [...]

roti- *elem comp* (*lat rota*) Exprime a idéia de roda: *rotífero, rotiforme.*

roto-¹ *elem comp* (*lat ruptu*) O mesmo que *roti*: *rotogravura.*”

Assim, o termo “roteamento” parece ser mais adequado para ser empregado em rotas de comunicação por rede, como os roteadores de dados da Internet, por exemplo. Já o termo “roteirização”, derivado do verbo roteirizar, exprime melhor o ato de “preparar o itinerário”, ou “preparar a descrição pormenorizada de uma viagem”.

Definido o melhor termo, passa-se a um breve histórico sobre a Roteirização e como ela foi inserida no contexto do Planejamento de Transportes. Alguns estudos preliminares à roteirização propriamente dita foram importantes para abrir o assunto e despertar o interesse dos pesquisadores pelo tema. O problema do caixeiro viajante é sem dúvida o grande “abre-alas” da roteirização, e vem sendo estudado há mais de

40 (quarenta) anos. Ainda se trata de um assunto atual, principalmente no mundo de economia globalizada, onde a Logística aparece como um dos pilares da concorrência entre as empresas ofertantes de produtos e/ou serviços.

Além do estudo do problema do caixeiro viajante, outras áreas de estudo foram importantes para que se pudesse chegar à definição de métodos objetivos de roteirização. Na Pesquisa Operacional, destacam-se os métodos matemáticos (ou exatos) de programação e as formulações de fluxo em rede. As heurísticas despontaram como uma alternativa à complexidade computacional dos métodos exatos, e hoje em dia são as mais utilizadas, como será detalhado nos próximos itens deste Capítulo.

2.1.1 O Planejamento de Sistemas de Transporte Público

Uma pequena explanação se faz necessária, para situar o assunto na área de Planejamento de Sistemas de Transporte Público, especialmente Sistemas de Ônibus Urbano. Procurando condensar a informação da maneira mais objetiva e eficiente possível, mostra-se a Tabela 1, que contém um quadro resumo do processo de planejamento de um sistema de transporte coletivo por ônibus, apresentado por CEDER & WILSON (1986).

O processo constitui-se de 5 (cinco) níveis de planejamento, denominados de “A” a “E”, cada qual correspondente a uma atividade do processo. Os autores acima ressaltam que a maioria das pesquisas na área tem como foco principal somente os dois últimos níveis (“D” e “E”), devido à necessidade de reduzir os custos referentes a esses níveis. Para isso, foram desenvolvidos inúmeros programas de computador capazes de automatizar (pelo menos parcialmente) esses passos. Um outro motivo para o desenvolvimento desses softwares é a dificuldade, em termos de quantidade de possibilidades e de tempo consumido, de se fazer estas atividades manualmente.

Conforme será mostrado adiante, o nível “A” precede e é a base para todos os outros. O objeto desta Pesquisa está inserido neste nível do processo, e é contemplado nas conclusões e análises críticas de CEDER & WILSON de forma a mostrar sua maior importância em relação aos outros níveis.

TABELA 1 Níveis de planejamento de um sistema de ônibus

<i>Entradas Independentes</i>	<i>Atividade de Planejamento</i>	<i>Saídas</i>
<u>Nível A</u>		
Dados de demanda	Projeto da rede	Mudanças de rotas
Dados de oferta		Novas rotas
Índices de performance da rota		Estratégias operacionais
<u>Nível B</u>		
Subsídio disponível	Determinando as frequências	Frequências de serviço ofertadas
Frota disponível		
Políticas de atendimento		
Operação atual		
<u>Nível C</u>		
Demanda por hora do dia	Desenvolvimento da tabela de	Horários de partida e chegada
Hora da primeira e última viagem do dia	horários das viagens	das viagens
Tempos de viagem		
<u>Nível D</u>		
Tempo Ocioso/Espera	Programação de Despacho	Programação de Despacho
Tempo de Retorno	(<i>scheduling</i>) dos ônibus	dos ônibus
Restrições ao Despacho	(alocação da frota)	
Estrutura de custo		
<u>Nível E</u>		
Regras de trabalho dos condutores e cobradores	Alocação da Mão-de-Obra	Horários de trabalho do pessoal
Estrutura de custo operacional		

FONTE: CEDER & WILSON (1986)

A abordagem sistêmica, do ponto de vista dos modos de transporte, que os sistemas de transporte devem ter é salientada por um pesquisador que estudou a fundo políticas públicas de desenvolvimento regional, especialmente no Estado do Ceará:

“A multidimensionalidade do fenômeno de transportes pressupõe uma abordagem sistêmica do seu planejamento e de sua operação. A ação governamental sobre o sistema de transportes não pode e nem deve se dar em uma só modalidade, sob pena de realizar o planejamento ou mesmo as inversões de recursos em condições subótimas e desta forma desperdiçar recursos escassos e não conseguir obter eficiência, eficácia e efetividade nos objetivos planejados.” OLIVEIRA JR. (1996)

Dessa forma, é imprescindível que se contemple de forma concomitante: o sistema de ônibus, metrô, trem suburbano, linhas especiais (como microônibus), transporte clandestino ou regulamentado por vans ou kombis. Mas além dos TPU, deve-se analisar inclusive a influência do automóvel, táxis, mototáxis, e, obviamente, o modo “a pé”. As mudanças que o setor de Transporte Urbano no país vem sofrendo são descritas no Capítulo 4, e reforçam a premissa básica de se considerar a multimodalidade no planejamento do TPU.

A tese de doutorado do sueco Dick Hasselström teve três objetivos principais (HASSELSTRÖM, 1981): (a) a formulação matemática do problema de escolha de rotas e frequências no TPU; (b) o desenvolvimento de um método para sua solução; e (c) teste do método em um caso real. Sua metodologia restringe-se ao estudo dos modos de Transporte Público Urbano, caracterizados por possuírem rotas fixas.

Uma outra questão fundamental de Planejamento de Sistemas de Transportes é a consideração do uso e ocupação do solo. Um pesquisador inglês, que há muitos anos dedica-se ao estudo de modelos, coloca:

“Os modelos de transportes, entretanto, ainda são essencialmente modelos de *interação* por si só; as variáveis de uso do solo são fixas e dadas – ou podem ser alteradas somente de forma exógena com o tempo.” (WILSON, 1998)

Um dos elementos cruciais que diferencia o problema do transporte de passageiros de outros problemas de infra-estrutura urbana, em sua maioria baseados na análise da relação custo/benefício, é consideração do valor do tempo dos usuários de transporte (WILSON, 1998). As origens da análise custo/benefício remontam às avaliações dos grandes projetos em Recursos Hídricos nos Estados Unidos, como pode ser visto em MAASS et al.⁴ apud WILSON (1998), e foram adaptadas ao problema de transportes.

Percebe-se que para se planejar um Sistema de Ônibus Urbanos, são necessários: visão sistêmica dos modos de transporte, análise do uso do solo e suas interferências nos desejos de viagem e considerar-se o valor do tempo do usuário

⁴ MAASS, A. et al. (1962) *Design of Water Resource Systems*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

despendido no sistema. Assim, um dado essencial ao Planejamento de Transporte de passageiros é a Matriz Origem/Destino, conforme será enfatizado nas próximas Seções. Mas para se levar em conta o tempo gasto, há que se considerar uma função objetivo cujas variáveis contemplem-no de alguma forma. Por isso, especial ênfase será dada aos métodos de Roteirização de Ônibus Urbanos que apresentem uma formulação matemática que contemple essas questões fundamentais (ver nas Seções 2.3 e 2.4).

Descreve-se a seguir as ferramentas computacionais disponíveis para o Planejamento de Transportes, e o Histórico da Roteirização, fechando assim esta Seção introdutória da revisão bibliográfica.

2.1.2 Ferramentas de Roteirização e o Planejamento de Redes de TPU

Na área de Planejamento de Sistemas de transporte, existem ferramentas computacionais bastante utilizadas em todo o mundo. Esses programas formam um grupo conhecido por *Transportation Modeling Packages* (Pacotes Computacionais para Modelagem em Transportes) ou *Transportation Planning Systems* (Sistemas para Planejamento de Transportes – SPT). Apesar de a primeira refletir melhor as características desses programas, adotar-se-á a segunda notação, por ser a mais utilizada entre os planejadores de transporte.

Inclui-se neste grupo (SPT), entre outros: EMME/2 (Inro Consultants Inc.), TRANPLAN e TP+ (ambos da Urban Analysis Group Inc.), MINUTP (Urban Analysis Group Inc. e Seiders Group), TRIPS (MVA Asia Ltd.), VISUM (PTV System Software and Consulting GmbH) e QRS II for Windows (AJH Associates).

Um outro grupo são os Sistemas de Informação Geográfica (SIG): Arc/View e Arc/Info (ESRI Inc.), SICAD (Siemens Nixdorf Informationssysteme GA), GWN GIS (Bentley Systems Inc.), GeoTransport (GEOPAK Transportation Inc.), MapInfo (MapInfo Co.), Maptitude e GIS+ (Caliper Co.), MGE e GeoMedia Network (Intergraph Co.), e o brasileiro GEOSOR (OESTE – Otimização e Estudos Estatísticos S/C Ltda.). Finalmente, um terceiro grupo, derivado do segundo e combinado com características do primeiro, são os Sistemas de Informação

Geográfica para Transportes (SIG-T): TransCAD (Caliper Co.) e UfosNet (RST International Inc.).

Resumidamente, por meio desses programas, pode-se visualizar diferentes alternativas de rotas, compará-las numericamente e criar parâmetros de ordenação com base no custo mínimo dos arcos (*links*), atribuindo-lhes valores de custo em relação a seu comprimento, tempo de viagem, etc., além de penalidades adicionais (para conversões à esquerda, por exemplo).

Pode-se ainda, com os programas do primeiro e terceiro grupos, alocar às rotas determinadas a demanda relativa ao modo em questão. Tem-se então o carregamento, possibilitando assim uma análise do nível de serviço. No caso do TransCAD, pode-se inclusive alocar diretamente a matriz Origem/Destino (O/D) de desejos de viagem por ônibus (ou por outro modo de transporte público) no sistema de rotas previamente estabelecido (CALIPER, 1996a).

Porém, nenhum desses pacotes computacionais traz uma rotina que produz a *melhor* rota, tendo-se como dados de entrada a matriz O/D, uma zona de origem, uma zona de destino e o sistema viário. Percebe-se assim que mesmo que os especialistas dispusessem desses recursos computacionais de forma abundante (o que ainda não é realidade, como pode ser visto no Capítulo 4), eles não seriam adequados, caso o objetivo fosse uma reestruturação completa de um grupo de linhas de ônibus, por exemplo. Ou seja, atualmente os pacotes computacionais para Transportes pertencentes a esses três grandes grupos não traçam automaticamente as linhas.

Para tal, deve-se recorrer então a programas projetados especificamente para esse fim. Ressalta-se, dentre as ferramentas computacionais desenvolvidas até hoje, um software denominado VIPS II (VTS Systems Co.), que vem sendo utilizado em mais de 40 cidades há mais de 10 anos. Trata-se de uma ferramenta específica para o projeto e avaliação de linhas a curto prazo, com objetivo de aumentar a eficiência do sistema de TPU (ver folder da VTS⁵).

⁵ VTS TRANSPORTATION SYSTEMS CO. *Can you really cut operating costs without losing riders?* Göteborg, Sweden. /folder/

A principal vantagem de se utilizar este software é justamente por ter sido desenvolvido especificamente para se projetar os itinerários de linhas de Transporte Público Urbano, revisar as frequências, analisar a interação entre diferentes modos (ônibus, VLT, metrô, etc.) e diferentes níveis e estruturas de tarifa. O pacote computacional inclui toda a aparelhagem de coleta de dados, como por exemplo uma ferramenta para se medir em campo a velocidade operacional dos veículos.

A principal desvantagem no seu uso é o alto custo de aquisição, bem superior à grande maioria dos outros softwares citados neste item da Dissertação. Alia-se a isso o fato de ser uma ferramenta que não pode ser usada para outros fins que não aquele para o qual foi desenvolvida. Ao contrário, os Sistemas para Planejamento de Transportes e dos Sistemas de Informação Geográfica para Transportes podem e são utilizados para diversos fins, dentre eles a previsão de demanda (geração), escolha modal (incluindo-se o modo automóvel). Possibilitam também a conversão e troca de dados entre esses softwares, produção de mapas temáticos, etc.

Porém, uma crítica que se faz aos SPT e aos SIG-T é que como não foram projetados para o traçado de novas linhas, nem para a otimização de redes de transporte, pouca informação é dada sobre o assunto, seja nos seus tutoriais de uso, ou na bibliografia utilizada para sua construção. Assim, não é prevista a possibilidade de implementação de novas rotinas com esse objetivo específico, apesar de alguns terem a configuração “aberta”, permitindo a programação e inserção de algoritmos extras e caixas de diálogo. Essas limitações no problema específico de definição de novas rotas de TPU implicam necessariamente na implementação de rotinas complementares para supri-las.

2.1.3 Histórico da Roteirização

Para se chegar aos SIG, algoritmos derivados do estudo da Teoria dos Grafos tiveram que ser implementados de maneira a representar de forma objetiva o problema de localização espacial e busca de menores caminhos e assim resolver o TSP. Segundo SANTOS (1999), dois problemas básicos relacionados ao fluxo em redes são a determinação do fluxo máximo que percorre os arcos de um grafo e a determinação do fluxo de custo mínimo que percorra o grafo da origem ao destino. A

autora cita os trabalhos de DANTZIG⁶, POLLACK & WEBENSON⁷ e GOLDEN⁸ apud SANTOS (1999) como referências de soluções de caminhos mínimos.

Os primeiros trabalhos na área da distribuição física foram publicados ao final da década de 1950, mas o algoritmo clássico de referência é o de CLARKE & WRIGHT (1964). Este vem sendo citado, analisado, criticado e modificado, mas sua essência praticamente manteve-se inalterada e foi fundamental para a resolução do problema do caixeiro viajante.

Paralelamente, estudos de caminho mínimo foram sendo desenvolvidos, bem como de formulação matemática do problema de transporte urbano de passageiros. Segundo HSU & SURTI (1977), “o projeto de redes de transporte público urbano foi formulado como um problema de carga fixada por HIRSCH & DANTZIG⁹ em 1954”.

Dos trabalhos em TPU que precederam e tornaram possível o estudo do desenho ótimo de rotas de linhas de ônibus, pode-se citar VUCHIC¹⁰ apud KIKUCH (1985), NEWELL & VUCHIC (1968); OSUNA & NEWELL (1972); BARNETT & KLEITMAN (1973); BILLHEIMER & GRAY (1973); HOC (1973); HURDLE (1973c); ERLANDER¹¹; SCHEELE¹² apud NEWELL (1979) e KIKUCH¹³ apud KIKUCH (1985). Trataram do espaçamento entre estações ou entre pontos de embarque e desembarque (PED) para minimizar os tempos de viagem, ou estudaram

⁶ DANTZIG, G. B. (1960) On the shortest route through a network. *Management Science*, 6[2]: 187-190. Jan.

⁷ POLLACK, M.; WEBENSON, W. (1960) Solutions of the shortest route problem. *Operations Research*, 8[2]:224-230.

⁸ GOLDEN, B. (1976) Shortest paths algorithms: a comparison. *Operations Research*, 24[6]:1164-1168. Nov-Dec.

⁹ HIRSCH, W. M.; DANTZIG, G. B. (1954) The fixed charge problem. *Paper No. P-648*. The Rand Corporation. Santa Monica, California.

¹⁰ VUCHIC, V. R. (1966) *Interstation spacing for line-haul passenger transportation*. Ph.D. Dissertation, ITTE, University of California.

¹¹ ERLANDER, S. (ed.) (1973) Optimal Bus Systems in Urban Areas. *Seminar Proceedings*, Linköping University.

¹² SCHEELE, S. (1977) *A Mathematical Programming Algorithm for Optimal Bus Frequencies*. Ph.D. thesis, Linköping University, Linköping, Sweden.

¹³ KIKUCH, S. (1974) *Transit system analysis: parametric relationship of components*. Ph.D. Dissertation, University of Pennsylvania.

o despacho de ônibus (*scheduling*), objetivando essa minimização. Também BYRNE & VUCHIC¹⁴ (apud NEWELL, 1979) analisaram o espaçamento ótimo entre as linhas de ônibus, e suas frequências, numa rede viária retangular hipotética.

“A busca por configurações de rotas ótimas pode ser vista como um caso especial do problema de transporte a custo fixo, de várias ‘mercadorias’, sendo que para cada ‘mercadoria’ (i.e., grupo de passageiros que embarcam) há um único nó de origem. Uma das primeiras afirmações sobre este problema foi formulada em 1954 por HIRSCH & DANTZIG¹⁵, que o caracterizaram como ‘um problema fundamental insolúvel na área de programação.’” (BILLHEIMER & GRAY, 1973)

Provavelmente, um dos trabalhos pioneiros que tratam especificamente do traçado original das rotas de ônibus deve-se a LAMPKIN & SAALMANS (1967). Eles inclusive foram os primeiros a apresentar de forma metodologicamente organizada o planejamento do serviço de ônibus, desde o traçado das rotas até a determinação do quadro de horários. Porém, foi ao final da década de 1970 que houve uma grande ênfase na roteirização de linhas de ônibus, quando o assunto passou a constar na maioria das publicações na área de Planejamento de Transportes Urbanos.

Um grande avanço foi promovido dez anos depois, pelo trabalho de HASSELSTRÖM (1977). Neste trabalho procurava-se maximizar as viagens diretas, ou seja, minimizando-se os transbordos, por meio de programação linear. Baseando-se em sua tese de doutorado, o mesmo HASSELSTRÖM (1981) ajudou a desenvolver para a Volvo um sistema de traçado de rotas urbanas de ônibus, o VIPS II (ver em STOCKHOLM TRANSPORT, 1987b). Outros trabalhos importantes foram sendo apresentados até meados da década de 1980, quando parece ter acontecido a consolidação das técnicas. A partir de então, observa-se que apenas referências pontuais são dadas à roteirização de ônibus urbanos. Após

14 BYRNE, B. F.; VUCHIC, V. R. (1972) Public Transportation Line Positions and Headways for Minimum Cost. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Traffic Flow and Transportation*. New York: American Elsevier, pp. 347-360

15 HIRSCH, W. M.; DANTZIG, G. B. (1954) The Fixed Charge Problem. *Rand Corporation Paper P-648*. Santa Monica, California, USA. /reprinted in *Naval Res. Log. Quart.* 15 [3], (1968)/

aproximadamente 10 anos, um número expressivo de publicações pode ser verificado novamente, estendendo-se até os dias atuais. As técnicas mais importantes serão abordadas na Seção 2.4.

2.2. Princípios Básicos na Definição de Redes de Transporte

Antes de se iniciar descrição da revisão bibliográfica, é interessante que se explicita algumas recomendações para o projeto de redes de TPU. Por se tratarem de conceitos básicos, a grande maioria dos profissionais de transportes já dominam ou pelo menos têm familiaridade com essas questões.

As rotas de ônibus devem seguir o quanto possível as vias arteriais, e evitar as vias locais, pois as vias arteriais são largas, facilitando as manobras de conversão, e têm velocidades médias maiores pois são projetadas para proporcionar maior fluxo de tráfego (BLACK, 1995). Ainda, as vias locais tendem a possuir impedimentos à parada de ônibus, tais como carros estacionados e pedestres (especialmente as crianças) na rua. Já as arteriais tendem a possuir alta geração de viagens, devido aos edifícios construídos ao longo delas.

BLACK (1995) indica que, idealmente, os itinerários devem ser retos e diretos. Tornam-se assim mais fáceis de serem assimilados pela população, e usualmente apresentam tempos de viagem menores. Por outro lado, as paradas para embarque e desembarque (PED) devem ocorrer preferencialmente próximo aos pontos que geram mais viagens. A tentativa de se localizar os pontos de parada o mais próximo possível dos usuários pode ser conflitante do ponto de vista da qualidade de operação, no sentido de que os desvios de rota devem ser cuidadosamente estudados, para não se tornar desnecessariamente sinuosos.

WHITE (1995) faz considerações sobre o espaçamento ideal entre os PED. Isto porque se o espaçamento for muito pequeno, o tempo de ciclo da linha será muito elevado devido às constantes desacelerações e acelerações. E, por outro lado, se o espaçamento for muito grande, os tempos de embarque serão maiores, excedendo os benefícios do menor tempo de viagem entre os PED. Para se determinar o espaçamento ideal, deve-se minimizar a função que define o tempo total de uma viagem (só ida) porta-à-porta, dado pela expressão (modificada):

$$\frac{T}{F} \times 2 + \frac{L}{d} \times S + \frac{L}{d} \times A_t + \frac{L}{d} \times \frac{(d - A_d)}{V}$$

onde: T = distância média de caminhada, do ponto de origem ao PED, geralmente adota-se 0,25.d [m];

d = espaçamento médio entre os PED, [m];

F = velocidade média de caminhada [m/s];

L = distância média percorrida dentro do ônibus, pelos passageiros [m];

S = tempo perdido no PED [s];

A_d = distância percorrida pelo veículo para, partindo do repouso, alcançar a velocidade de cruzeiro (velocidade operacional), e imediatamente frear até sua completa parada [m];

A_t = tempo gasto no processo descrito na variável A_d [s];

V = velocidade operacional do veículo [m/s].

Para encontrar-se o espaçamento ideal, deriva-se a expressão acima em relação a d, e iguala-se a zero. O valor de d encontrado será aquele que minimiza o tempo total gasto na viagem (WHITE, 1995).

Alguns trabalhos foram voltados para a determinação de frequência ideal de atendimento, dada uma certa demanda (ver HURDLE, 1973a,b; FURTH & WILSON, 1981; KOUTSOPOULOS et al.¹⁶ apud CEDER & WILSON, 1986; e CEDER, 1984; 1985). Porém, nenhum deles foi implementado na prática.

O professor Avishai Ceder, do *Technion-Israel Institute of Technology*, de Israel, vem desenvolvendo uma série de trabalhos na área de planejamento de itinerários e de operação de linhas de ônibus. A respeito da definição dos headways e da programação dos veículos com auxílio de microcomputadores, ver CEDER (1985). Especificamente sobre a definição dos quadros horários de despacho dos

¹⁶ KOUTSOPOULOS, H. N.; ODoni, A.; WILSON, N. H. M. (1983). Determination of the Headways as a Function of Time Varying Characteristics on a Transit Network. *Paper presented at The Workshop on Transit Vehicle and Crew Scheduling*, Montreal, June.

ônibus, ressalta-se um trabalho que discute a fundo o problema (ver CEDER, 1986). Sobre os itinerários, seus principais estudos serão citados na próxima Seção.

O manual de recomendações da Mercedes-Benz do Brasil (MERCEDES-BENZ, 1987) para planejamento e operação de sistemas de ônibus urbanos é a principal referência nacional nesta área. Outro trabalho importante é a tese de livre docência de FERRAZ (1990).

As recomendações contidas no Manual já são de uma forma ou de outra adotadas em todas as agências públicas de planejamento de transporte coletivo, visto que são critérios fundamentais, naturalmente seguidos pelo planejador que tenha um mínimo de experiência. São elas (MERCEDES-BENZ, 1987):

- “Satisfazer a política urbanística desejada;
- Atender com as linhas da área estudada toda a região urbanizada, oferecendo ao futuro passageiro de ônibus possibilidades de acesso com caminhadas máximas da ordem de 400 a 600 m;
- Evitar transbordos, sempre que possível, para se atingir a zona destino;
- Atender às demandas entre zonas (bairros), sempre que viáveis;
- Facilitar transbordos, quando estes forem inevitáveis, com terminais adequados;
- Evitar superposição de itinerários;
- Criar, para se atender às zonas de baixa demanda, alternativas de itinerários nos horários em que elas mais necessitem ser servidas, com pequenas mudanças ou ampliações de linhas já definidas;
- Escolher os itinerários, dentro do possível, segundo os caminhos naturais já existentes. Evitam-se desta forma grandes modificações que venham a penalizar os passageiros, exigindo-lhes novos hábitos;
- Levar em consideração a possibilidade de utilizar bons pisos e evitar, dentro do possível, grandes aclives ou outras barreiras ao livre movimento dos ônibus;
- Proporcionar privilégios para este modo de transporte, principalmente nas horas menos favoráveis para trechos mais críticos da disputa espacial com o transporte individual, desfavorável à movimentação dos ônibus;
- Evitar que os itinerários dêem voltas desnecessárias que aumentam o tempo de viagem e a distância percorrida”.

FERRAZ (1990) traz alguns critérios de medida de qualidade de rotas de TPU por ônibus. São eles: espaçamento das linhas, espaçamento entre os itinerários de ida e volta, direitura das rotas, extensão das linhas e alguns aspectos operacionais (cobertura da área atendida, condições viárias para meia-volta, pontos de controle e/ou parada final).

“Uma linha de transporte público deve passar pelos principais pólos de atração de viagens da região que se planeja para atender, bem como propiciar uma cobertura satisfatória das áreas habitadas. Shopping Centers, estações de transporte, distritos industriais, universidades, centros esportivos, etc..., localizados na região de atendimento da linha, são pontos de passagem quase sempre obrigatórios. O traçado da linha deve, também, permitir que todos os habitantes da região possam usar a sistema com percursos a pé dentro de limites aceitáveis.” (FERRAZ, 1990)

O autor enfatiza os objetivos conflitantes do problema:

“Por outro lado, as rotas de transporte público devem ser diretas e claras. Itinerários sinuosos e tortuosos devem ser evitados, pois os traçados diretos conduzem, via de regra, a uma operação global mais eficiente e eficaz, bem como são mais fáceis de serem compreendidas e usados pelos usuários. Desvios no itinerário de uma linha podem beneficiar algumas pessoas, mas, em geral, representam um grave inconveniente para as demais, prejudicando a eficiência e eficácia do serviço.” (FERRAZ, 1990)

2.3. Os Métodos de Roteirização de TPU por Ônibus

Feitas essas considerações iniciais, passa-se à revisão bibliográfica dos métodos de roteirização no TPU propriamente ditos, iniciando com a Classificação.

2.3.1 Classificação dos Métodos

CHUA¹⁷ apud VAN OUDHEUSDEN et al. (1987) apresentou uma análise abrangente dos métodos de roteirização de TPU, principalmente os chamados “matemáticos”. Propôs uma classificação dos métodos em cinco grupos: (a) manual;

¹⁷ CHUA, T. A. (1984) The planning of urban bus routes and frequencies: a survey. *Transportation*, 12:147-172.

(b) projeto de análise de mercado; (c) análise de sistema; (d) análise de sistema com gráficos interativos; e (e) matemáticos. O grupo b diferencia-se do a por usar o computador para quantificar os parâmetros de análise das alternativas. Os do grupo e (matemáticos) caracterizam-se por possuir funções objetivo que para a otimização geram redes de transporte alternativas, não necessariamente derivada da existente.

A classificação apresentada por AXHAUSEN & SMITH (1984) sem dúvida é a que se mostra mais organizada e sistematizada. São analisados 13 (treze) métodos heurísticos, sendo que os 10 (dez) europeus foram classificados, e os 3 (três) norte-americanos foram analisados superficialmente. BRANDÃO (1993) ampliou esta classificação, adotando o mesmo padrão de classificação, com dois métodos heurísticos brasileiros: AQUINO (1980) e SOARES (1982).

AXHAUSEN & SMITH levaram em consideração para a classificação dos métodos as características básicas dos algoritmos aplicados nos mesmos. Leva-se em consideração, basicamente, a forma como se fez: (1) a construção da rede básica; (2) o desenvolvimento da linha e seleção iniciais; e (3) desenvolvimento da rede e seu aperfeiçoamento.

A seguir reproduz-se a tabela que apresenta essa classificação, e em seguida a tabela construída por BRANDÃO para os métodos brasileiros.

A tabela de BRANDÃO:

TABELA 3 Métodos heurísticos brasileiros de roteirização

Autor(es)	AQUINO (1980)	SOARES (1982)
Critério	-	-
1o. passo - Construção da rede básica		
Concebido para:	Ônibus	Ônibus
Nós são:	zonas	zonas
Redes baseadas em:	mais longos caminhos mínimos	caminhos naturais (mínimo tempo e melhores condições de tráfego)
2o. passo - Desenvolvimento da linha e seleção iniciais		
Construção inicial das linhas candidatas:	1) inserção de nós geradores às linhas; 2) identificação dos nós terminais	1) análise de células fortes sobre a matriz horária triangular; 2) associar melhor roteiro ao desejo de viagem identificado
Restrições são:	- todos os nós servidos; - limite de circuitação; - rentabilidade mínima	- viabilidade econômica das linhas; - todas as células da matriz servidas
Objetivos são:	-	-
3o. passo - Desenvolvimento da rede / aperfeiçoamento		
Os procedimentos são:	- selecionar rotas com maiores demandas potenciais; - remover demandas servidas	- ampliar cobertura; - minimizar circuitação; - reduzir número de linhas para aumentar a frequência; - interligar e estender linhas; - gerar terminais ou superpor linhas
Os objetivos são:	tempo total de percurso	-
As restrições são:	- rede conectada; - todos os nós servidos; - número de transbordos	-
Otimização das frequências são:	não	interna
O envolvimento do usuário:	final	total

FONTE: BRANDÃO (1993)

A classificação proposta por AXHAUSEN & SMITH (1984) e seguida por BRANDÃO (1993) é interessante para se comparar os passos programados em cada algoritmo, mas mostra-se insuficiente para uma comparação mais profunda quanto aos critérios utilizados na concepção de cada modelo.

Uma outra classificação é dada por CEDER & ISRAELI (1998), que fazem um estudo de diversas técnicas de Roteirização no Transporte Público Urbano. Os métodos estudados foram divididos em três grupos:

1. métodos baseados em redes fictícias – métodos de KOCUR & HENDRIKSON (1982), TSAO & SCHONFELD (1984) e KUAH & PERL (1988). Caracterizam-se pela possibilidade de se promover diversas análise teóricas, e servem para se vislumbrar políticas de transportes, mas não para o projeto executivo em si;
2. métodos de simulação – incluem-se nesse grupo os métodos de DIAL & BUNYAN¹⁸, HEATHINGTON et al.¹⁹ e VANDEBONA & RICHARDSON (1985). Requerem um quantidade considerável de dados, e sua proximidade ao ótimo é incerta;
3. métodos baseados em programação matemática – os estudados pelos pesquisadores foram: REA²⁰ (ver REA, 1972), SHARP²¹, SILMAN et al. (1974), DUBOIS et al. (1979), MANDL (1979), HASSELSTRÖM (1981), MARWAH et al. (1984), e KEUDEL²². Apesar de heurísticos, poucos desses foram aplicados: o de MANDL foi testado por AXHAUSEN & SMITH (1984), e as aplicações de MARWAH et al. e HASSELSTRÖM são descritas pelos próprios autores.

São enumeradas 6 desvantagens de se utilizar esses métodos baseados em programação matemática listados acima:

- não podem ser aplicados em sistemas de TPU grandes²³;

¹⁸ DIAL, R. B.; BUNYAN, R. E. (1968) Public Transit Planning System. *Socio-Economic Planning Science*, 1:345-362.

¹⁹ HEATHINGTON, K. W.; MILLER, J.; KNOX, R. R.; HOFF, G. C.; BRUGGMAN, J. (1968) Computer Simulation of a Demand Scheduled Bus System Offering Door-to-Door Service. *Highway Research Record*, 91:26-40.

²⁰ REA, J. C. (1971) *Designing Urban Transit Systems: an approach to the route technology selection problem*. Urban Transportation Program, PB 204-881. University of Washington, Seattle.

²¹ SHARP, G. P. (1974) *Public Transit System Network Models: consideration of guideway construction, passenger travel, delay time and vehicle scheduling*. Ph.D. dissertation. Georgia Institute of Technology, Atlanta.

²² KEUDEL, W. (1988) Computer-Aided Line Network Design – DIANA and Minimization of Transfer Times in Networks – FABIAN. In DADUNA, J. R.; *Proceedings of International Workshop on Computer-Aided Transit Scheduling*

²³ Ao contrário dessa consideração de CEDER & WILSON, MARWAH et al. afirmam que seu método pode ser aplicado a grandes sistemas de transportes. Inclusive o primeiro autor do artigo

- não podem ser considerados objetivos e restrições alternativos aos pré estabelecidos no método;
- a determinação das frequências básicas com base em parâmetros econômicos e não nas contagens dos passageiros, como é feito na prática e descrito por CEDER (1984) e CEDER (1986);
- não podem incorporar simultaneamente três dos quatro componentes de planejamento – concepção da rede, definição do quadro de horários, e alocação da frota. Em particular, esses métodos não podem avaliar a rede sem definir o tipo de veículo usado para cada rota, o que diminui a precisão na avaliação da eficácia de custo do projeto;
- não podem produzir bons resultados de forma consistente;
- não podem incorporar restrições não quantitativas, como a imposição de certos arcos a serem incluídos nas linhas de TPU e considerados operacionalmente estratégicos.

Na última seção deste Capítulo, serão selecionados os métodos que se mostrarem mais adequados para aplicação em situações reais. No próximo item, são listados alguns métodos que não podem ser aplicados de imediato, mas que são importantes para se entender a lógica do problema do traçado de rotas.

2.3.2 Métodos Não Aplicáveis

Os métodos de HURDLE (1973c), de BYRNE (1976) e o de NEWELL (1979) podem ser classificados, como sugerido por CEDER & WILSON (1986), como pertencentes a um primeiro grupo de trabalhos na área, por: (a) supor a demanda fixa; (b) os parâmetros de projeto da rede serem restritos; e (c) ter como objetivo a minimização da soma dos custos operacionais e custos aos usuários. O método de KOCUR & HENDRICKSON (1982) apresenta como inovação, em relação a esses três, a demanda variável, uma gama maior de parâmetros para projeto, e a possibilidade de escolha de objetivos, que reflitam ou os interesses dos

citado descreve uma aplicação em uma rede contendo uma frota de mais de 5.500 ônibus (ver em MARWAH & MADHUGIRI, 1998).

operadores, ou o benefício aos usuários. Porém, esses quatro métodos não são diretamente aplicáveis a situações reais, sendo utilizados para estudar possíveis cenários de política de transportes.

NEWELL (1979) propôs uma formulação matemática para redes retangulares, que leva em consideração: os custos de espera aos usuários nos PED da linha; o custo de caminhada do usuário, de sua casa até o PED mais próximo; o custo operacional dos ônibus; o custo (penalidade) de transferências aos usuários, entre as linhas. Foram desconsiderados: a análise do espaçamento entre os PED; o zoneamento, considerando esta malha viária retangular hipotética; e a demanda, adotando-a como uniforme entre cada par origem/destino, e concentrada no centróide.

O objetivo do estudo não era determinar uma geometria ótima dos itinerários de ônibus dada uma distribuição de viagens em particular, mas sim ilustrar que a geometria ótima é sensível à natureza da distribuição de viagens. Assim, comparou-se duas redes de transporte, uma considerando apenas duas linhas, com intervalos (*headways*) entre viagens h_1 e h_2 . E outra, com rotas apenas em uma direção (Norte-Sul), sendo que no meio da malha viária estas linhas tomam a direção Leste-Oeste, para circundar um centro de cidade fictícia, seguindo novamente na direção Norte-Sul. A segunda apresentou-se com maior custo. Abaixo segue o desenho dessas duas redes.

FIGURA 1 - Redes Hipotéticas de NEWELL

FONTE: NEWELL (1979)

O custo total para cada configuração, respectivamente a I e II, é dado por:

$$\frac{1}{2}(h_1 + h_2)\gamma_w + \frac{a}{2}\left(\frac{23}{30}\right)\gamma_a + \frac{2}{a}\left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2}\right)\frac{\gamma_o}{\rho} + \frac{(A+B)}{3}\gamma_r \quad (1)$$

$$h\gamma_w + \frac{a^*}{2}\gamma_a + \frac{2}{a^*h}\left(1 + \frac{B}{2A}\right)\frac{\gamma_o}{\rho} + \left(\frac{A}{2} + \frac{B}{3}\right)\gamma_r \quad (2)$$

onde: h = *headway* nas linhas da segunda configuração;

h_1 = *headway* na linha 1, que compete com a linha 2;

h_2 = *headway* na linha 2, que compete com a linha 1;

γ_w = custo (médio) de espera por unidade de tempo por passageiro;

a = espaçamento entre as vias da malha viária tipo I;

a^* = espaçamento entre as vias da malha viária tipo II;

γ_a = custo por unidade de distância de caminhada por passageiro;

γ_o = custo operacional por unidade de distância percorrida pelo ônibus;

ρ = densidade espacial das viagens realizadas por unidade de tempo;

A = extensão da malha viária, no sentido Norte-Sul;

B = extensão da malha viária, no sentido Leste-Oeste;

γ_r = custo por unidade de distância percorrida dentro do ônibus por passageiro;

NEWELL concluiu em seu artigo que o estudo foi útil para sentir como os custos variam de acordo com a geometria escolhida para uma rede de transportes fictícia. Porém, ele afirma que dificilmente essas considerações teóricas poderiam ser aplicadas em uma rede real. Isto porque em casos reais a demanda não é uniforme, existindo pólos de geração de viagens concentrados, além da não-linearidade das vias de uma cidade verdadeira, ressaltando que a roteirização ótima é muito sensível à distribuição das viagens e aos parâmetros que caracterizam o custo total.

A abordagem proposta por VAN OUDHEUSDEN et al. (1987) também não pode ser aplicada, mas por outro motivo. O método requer a inclusão de muitas rotas de ônibus para que os algoritmos selecionem as melhores. Os pesquisadores, à época da publicação, estavam desenvolvendo no *Asian Institute of Technology*, em Bangkok (Tailândia), um sistema gráfico de apoio à decisão para ser usado na definição de linhas de ônibus. Não foi possível encontrar referências mais recentes a esse projeto.

Um trabalho foi publicado recentemente sobre teoria de configuração ótima de rede. Foram analisados: (a) a distância ótima entre rotas paralelas; (b) a frequência em cada rota; e (c) a tarifa (ver IMAM, 1998). Para a análise considerou-se uma área retangular suburbana, assumindo que todos os parâmetros são invariáveis ao longo de toda a área, e que todos os passageiros usam somente a linha de ônibus que passa mais próximo a sua casa. As elucubrações consideram ou não restrições de capacidade dos veículos, e as funções objetivo propostas podem considerar diferenças entre usuários de sistemas diferentes, permitindo que se arbitre valores máximos aceitos pelo usuário para (valores de utilidade): tempo de caminhada, tempo de espera no PED, tempo de viagem, tarifa, etc. IMAM parte de premissas grosseiramente falsas, e por isso muito provavelmente as assertivas derivadas delas não são aceitáveis devido a erro de juízo, apesar da lógica empregada no modelo estar correta. O próprio autor reconhece que suas análises são adequadas somente a sistemas radiais onde o início e o fim da viagem ocorram em pontos singulares, sem transferências. Portanto, suas conclusões não são recomendadas para subsidiar estudos analíticos que tenham por objetivo encontrar uma configuração ótima de um sistema real.

Já a abordagem de CHIEN & SCHONFELD (1997) mostra-se mais interessante, já que no modelo apresentado pode-se considerar diferenças de uso do solo, padrões de demanda, velocidades de operação, custos operacionais, etc. Obviamente, algumas simplificações foram feitas, pois trata-se de um modelo analítico que tem como objetivo gerar resultados numéricos para análise das relações das diversas variáveis do problema.

As equações encontradas podem ser usadas para se otimizar os headways e o espaçamento entre rotas em redes do tipo grelha. As relações matemáticas encontradas podem servir como base para a definição de princípios básicos (ver na Seção 2.2) para a otimização da estrutura e programação das rotas (CHIEN & SCHONFELD, 1997).

2.3.3 Métodos Aplicáveis a Sistemas Pequenos e/ou Médios

Neste item faz-se uma breve descrição dos principais métodos que podem ser aplicados a cidades pequenas. Alguns desses podem também ser aplicados a sistemas de cidades médias. Porém, devido a simplificações adotadas, não podem ser aplicados a cidades grandes. Como não fazem parte da delimitação dada pelo objetivo deste trabalho, as citações são meramente informativas, sem a pretensão de estudar cada um desses métodos. Porém, algumas análises e comparações são feitas, para se ter uma idéia de como os métodos foram evoluindo até alcançarem um nível de sofisticação que permite a aplicação em grandes sistemas de transportes.

2.3.3.1 Os primeiros métodos formais²⁴

NEBELUNG²⁵ apud AXHAUSEN & SMITH (1984) desenvolveu um algoritmo simples para ser aplicado em linhas de VLT que requer intensa participação do técnico no planejamento do traçado e da localização dos terminais. São geradas apenas as linhas básicas que interligam os terminais pré definidos.

LAMPKIN & SAALMANS (1967) aplicaram seu método em um sistema municipal inglês, baseado na construção de um esqueleto de cada rota, constituído pela ligação entre quatro nós, sendo dois deles os seus pontos terminais. Insere-se um a um outros nós à rota, alocando-se a demanda adjacente. Repete-se o processo para outras rotas, até que todas as viagens contidas na matriz O/D tenham sido atendidas.

²⁴ São considerados métodos formais aqueles que buscam a solução com base em critérios objetivos, e não só com base na subjetividade do especialista. Alguns desses métodos encontram-se na Tabela 2, e sua visualização pode ajudar a percepção das diferenças básicas entre eles.

²⁵ NEBELUNG, H. (1961) *Rationelle Umgestaltung von Strassenbahnnetzen in Grossstaedten*. Ministerium fuer Wirtschaft, Mittelstand und Verkehr des Landes Nordrhein, Westfalen, West Germany.

Uma função objetivo faz a avaliação dos quatro nós mais adequados para se constituírem o esqueleto inicial da linha, assim como dos nós restantes para formá-la.

O método de SILMAN et al.²⁶ apud AQUINO (1980), bem como o citado anteriormente, necessita que se faça uma pré seleção dos nós de início e fim das linhas. O método tem como objetivo a sugestão de possíveis alterações em um sistema de rotas existente. Um conjunto de rotas candidatas é gerado segundo um critério de tempo ganho ao se adicionar nós. Deve-se maximizar a quantidade de serviço (medido em passageiros x km ou minutos) ofertado para cada nó acrescido, mas não considera a rentabilidade das rotas. Também há, como em NEBELUNG, bastante participação do técnico. Esse método foi aplicado à cidade de Haifa (Israel).

HOIDN²⁷ apud AXHAUSEN & SMITH (1984) baseia a construção das linhas direcionando-as todas para o centro, num formato radial, parando a formação das linhas quando toda a demanda for servida. Atualmente essa concepção torna-se totalmente inadequada, pois as redes não se resumem à configuração radial. Por isso, o método só pode ser utilizado em sistemas de cidades pequenas.

HSU & SURTI (1975) desenvolveram um método baseado em uma descrição funcional das rotas. Primeiramente classificam-se os nós como residenciais ou “de atividades”, destacando-se nestes aqueles que possibilitam maior transbordo. Seleciona-se um tipo de rota a ser traçado, podendo ser “de atividades”, “de corredor”, “residenciais” ou “de transferência”. O tipo depende da classificação dos nós que a linha ligará. Determina-se o esqueleto de uma rota do tipo selecionado usando-se o caminho mínimo entre seus nós e aloca-se a demanda que ela deverá atender. Repetem-se as etapas para o número de rotas suficientes para esgotar as demandas pelo tipo selecionado. Avalia-se a rede obtida e, com base nesta avaliação, decide-se qual o próximo tipo de rota que será selecionado. Faz-se novamente o processo para esse tipo de rota. Quando as avaliações forem consideradas

²⁶ SILMAN, L. A.; BARZILY, Z.; PASSY, U. (1974) Planning the route system for urban buses. *Computers and Operations Research*, 1:201-211.

²⁷ HOIDN, H. P. (1975) *Busnetz von Aarau, Neukonzeption der Linien*. Institut fuer Operations Research der ETH Zuerich, Zuerich, Switzerland.

satisfatórias, ou quando se atingir as restrições orçamentárias, interrompe-se o processo.

ROSELLO (1977) baseia seu método em uma rede *Spider*, ou seja, a conexão do nó adjacente lógico é feita para se formar uma rede de conexões, como uma teia de aranha. A construção da rede básica é feita por meio de uma rotina de alocação de viagens do tipo tudo ou nada, e os nós vão sendo acrescentados ou retirados, segundo o custo médio total por passageiro, um a um. Uma função objetivo complexa é usada para se unir os segmentos criados, de modo a formar as linhas básicas. Um dos problemas relativos a esse método é sua completa independência em relação à malha viária, o que não condiz com a realidade de considerar os eixos principais de tráfego como corredores principais de transporte.

DUBOIS et al. (1979) desenvolveram um método baseado em uma análise multicriterial de um sistema de transportes existente. Os pesquisadores classificaram as linhas traçadas de acordo com suas demandas potenciais e que possuíam um comprimento considerado razoável. Foram usados algoritmos de menor caminho para selecionar as linhas em função dessa classificação, do número de transbordos, e da rentabilidade. Por fim, aprimoram a rede, eliminando-se os trechos menos carregados. Esse método heurístico foi a base para a construção do primeiro método brasileiro, de AQUINO (1980), que o aprofunda quanto a definição do conjunto de rotas candidatas e o implementa em computador.

SONNTAG²⁸ apud AXHAUSEN & SMITH (1984) usa uma alocação de caminhos múltiplos para criar uma rede *Spider* carregada como base para o desenvolvimento e seleção das linhas básicas. Uma função objetivo complexa com restrições definidas é aplicada para se expandir as conexões de caminho mínimo entre interseções (terminais no caso de VLT). Seu método foi aplicado à rede de VLT de Dusseldorf, Alemanha, e implicou um aumento do número de viagens diretas de 20 %, e diminuição do tempo de viagem médio de 12 %.

²⁸ SONNTAG, H. (1977) Ein heuristisches verfahren zum entwurf nachfrageorientierter linienfuehrung im oeffentlichen personennahverkehr. *Zeitschrift fuer Operations Research*, 23:B15-B23.

O método de MANDL (1979) foi aplicado por AXHAUSEN & SMITH (1984) na cidade de Madison, estado de Wisconsin, Estados Unidos, e resultou numa substancial redução no comprimento da rede, mas um inaceitável aumento no número de transferências. Essa rede restrita é obtida porque se adota o mesmo critério de LAMPKIN & SALMANS (1967), o de se considerar somente os caminhos mínimos (tempo) entre terminais. A diferença entre os dois métodos está na possibilidade de se incluir linhas independentes dos terminais, ou circulares, no caso de as restrições impostas exigirem num segundo estágio uma redução do número de transferências, por exemplo. MANDL (1980).

Como em NEBELUNG e em SILMAN et al., o especialista é bastante solicitado no método de SAHLING²⁹ apud AXHAUSEN & SMITH (1984). As linhas básicas são geradas diretamente por caminhos mínimos (tempo). O processo é interrompido quando se atinge um conjunto de linhas viáveis que atendam a toda a demanda. A seleção das linhas consideradas viáveis é feita pelo técnico. A principal vantagem desse método é a possibilidade de aplicação em grandes redes, o que é impossível em todos os outros métodos descritos na Tabela 2.

O método de VAN NES et al. (1988) trouxe como grande vantagem a possibilidade de uso em um microcomputador do tipo PC (*personal computer*). Isso representou um avanço considerável para a popularização de técnicas de otimização, pois até então os modelos propostos possuíam estrutura complexa e “rodavam” apenas em *mainframes* (computadores de maior porte). Um bom exemplo de complexidade computacional requerida é o método de HASSELSTRÖM (1981), que será descrito no item 2.4.1.

O modelo de otimização de VAN NES et al. foi implementado e faz parte de um pacote computacional. Este permite, de forma simultânea: a seleção de rotas, a determinação de frequências e previsão do número de passageiros. Além disso, é do tipo “amigável ao usuário”, o que indica a facilidade de se trabalhar com o software. Mas suas limitações quanto ao número de nós na rede (máximo igual a 250 nós) e

²⁹ Seminar Verkehrswesen, Sommer Semester 1981: *Linienplanung*. Institutsnotiz 29. Instituts fuer Verkehrswesen der Universitaet Karlsruhe, West Germany, 1983 / description and application of SAHLING's model /

zonas (máximo igual a 150) indicam que seu uso se restringe a cidades médias e pequenas. Por não fazer parte do objetivo deste trabalho, esse método não será detalhado.

2.3.3.2 Métodos brasileiros

No Brasil, ressaltam-se sete trabalhos: AQUINO (1980), SOARES (1982), SANCHES (1988), BRANDÃO (1993), FERREIRA (1993), ALENCAR & AQUINO (1994) e MAHA (1997). Os dois primeiros constam na classificação que pode ser visualizada na Tabela 3.

AQUINO (1980) desenvolveu um método computacional baseando-se no método de DUBOIS³⁰. Faz-se um aprofundamento do conjunto de rotas com tamanhos considerados razoáveis e que são gerados por um conjunto de “caminhos referidos como os mais longos caminhos mínimos, ou seja, caminhos mínimos que não estão contidos em qualquer outro”.

A iniciativa de AQUINO resultou em um método simples e eficiente. Em DUBOIS, assim como em LAMPIKN & SAALMANS (1964), SILMAN et al. e HSU & SURTI (1977), falta detalhamento na análise e implementações em computador que gerassem resultados quantitativos da melhoria do sistema de transportes afetados. AQUINO conseguiu implementar a heurística de FLOYD³¹ apud AQUINO (1980), e a aplicou como teste, em uma rede de 45 nós.

As vantagens do método de AQUINO (1980) são principalmente: (a) a eliminação da necessidade de definição antecipada de nós terminais; (b) a adoção de critérios bem definidos para a seleção de rotas candidatas; (c) definição e avaliação de parâmetros para medir a rentabilidade das rotas candidatas; e (d) ser totalmente informatizado. Esse método tem grande valor do ponto de vista histórico, mas para sua aplicação nos dias atuais seria necessário incrementos consideráveis em sofisticação dos modelos.

³⁰ Tese de doutorado de DUBOIS. A referência em AQUINO (1980) não consta o título, resumindo-se a: DUBOIS, Didier *Tese D. Ing. (outubro/1977)* Centre d'Etudes et de Recherches de Toulouse.

³¹ FLOYD, R. W. (1962) Algorithm 97 – shortest path. *Communications of the ACM*, 5[6]:345. Jun.

Um outro trabalho importante desenvolvido no país deve-se a SOARES (1982), que propõe um método de determinação dos itinerários de fácil aplicação, para ser aplicado principalmente nas cidades brasileiras de porte médio e pequeno. O autor parte do pressuposto de que a técnica deve dispensar microcomputadores, na época de ônus elevado. SOARES faz uma revisão bibliográfica sobre alguns dos métodos práticos para a definição de rotas no transporte coletivo urbano. Estes métodos foram classificados em dois tipos. O primeiro, chamado UTPS (em referência àqueles baseados no *Urban Transportation Planning System*, da agência UMTA – *Urban Mass Transportation Administration* dos EUA), no qual se incluem os softwares UNET, UPATH e ULOAD, que podem ser classificados como SPT. O segundo tipo eram os algoritmos de otimização, apontados como melhores que o primeiro tipo, pelo menor tecnicismo e maior eficiência. Neste tipo incluem-se os trabalhos (em ordem cronológica de publicação) de LAMPKIN & SAALMANS, HSU & SURTI³² e DUBOIS³³.

Com base nessa revisão bibliográfica, SOARES descreve um conjunto de passos para se planejar um novo sistema de transporte coletivo por ônibus, desde considerações sobre a provável demanda a ser atendida, desenho das possíveis rotas e ajustes visando otimização desses desenhos, até a determinação da frequência das linhas e verificação do carregamento. Seis situações foram apresentadas, representando possíveis cenários de partes de qualquer sistema de transporte coletivo. Esse método mostrou-se interessante por sua simplicidade e eficiência, e serviu como base para os outros dois estudos brasileiros na área.

SANCHES (1988) propôs um modelo de avaliação de mudanças na estrutura de redes de transporte coletivo em cidades médias. Estima-se os desejos de viagem com base nas características sócio-econômicas. Para a seleção das rotas que melhor atendem esses desejos de viagem, primeiramente faz-se o dimensionamento da frota

³² Segundo justificativa de SOARES (1982), num roubo suas fichas catalográficas se perderam. Não há então como garantir a exatidão dessas três referências somente com os nomes dos autores. Em comunicação pessoal, em outubro de 1998, SOARES afirmou que, provavelmente, são esses: LAMPKIN & SAALMANS (1967), HSU & SURTI (1975).

³³ Provavelmente esta referência trata-se da tese de doutorado de DUBOIS, defendida em 1977 no *Centre d'Etudes et de Recherches de Toulouse*, França, ou DUBOIS et al. (1979).

e em seguida procura-se identificar os caminhos “naturais”, segundo definição de SOARES (1982).

BRANDÃO (1993) faz uma revisão dos métodos de concepção de redes de transporte coletivo racionais, descrevendo aqueles adequados para aplicação em cidades de porte médio. Por fim, são detalhados os três métodos disponíveis para a aplicação em Piracicaba – SP: MANDL (1979), AQUINO (1980) e SOARES (1982). A autora escolheu o último, por este considerar a matriz de desejos de viagem como objetivo principal, enquanto “os dois outros realizam a análise inicial de geração de rotas com base nos mais longos caminhos mínimos”. Ou seja, BRANDÃO usou como critério de escolha principal a adequação das novas linhas à demanda, e não ao sistema viário.

Na pesquisa desenvolvida por FERREIRA (1993), utilizou-se técnicas de sensoriamento remoto para monitorar a expansão urbana por meio da análise visual de fotografias aéreas e imagens de satélite. Em seguida, estudou-se a demanda por transporte coletivo, e formulou-se um modelo de fluxo, para propor as rotas para esse sistema. Esse processo de determinação das rotas de ônibus leva em consideração a localização visual das tendências de crescimento de uso do solo, de interseções congestionadas e pontos obrigatórios de passagem (barreiras físicas), procurando passar pelos pólos atratores de viagem.

Nesta fase da pesquisa de FERREIRA (1993), nota-se nitidamente que a experiência do planejador é fundamental. Uma série de outras considerações foram feitas, de modo a se escolher as rotas viáveis. Foi utilizado o programa LINDO (*Linear Interactive and Discrete Optimizer*), que resolve problemas de programação linear, inteira e quadrática, para modelar o fluxo em rede. Por meio de iterações, selecionou-se as linhas que apresentariam frequência entre 4 e 10 viagens/hora. Abaixo deste intervalo, no horário pico, a viagem foi considerada inviável. Acima do intervalo, criou-se uma linha direta entre os pares O/D em questão, para proporcionar um menor tempo de viagem durante o período pico. Nota-se que na prática existem linhas com frequências bem inferiores a 4 viagens/hora, principalmente em cidades pequenas e médias, e que são consideradas viáveis. Assim, essa variável poderia ser

relaxada, se aplicação fosse em localidades cujas frequências dos ônibus fossem normalmente menores.

ALENCAR & AQUINO (1994) desenvolveram um sistema automático de geração de rotas de ônibus, utilizando o software de desenho AutoCAD como plataforma e rotinas heurísticas e algoritmos de programação linear. O sistema gera a melhor rota de acordo, principalmente, com as características das características físicas da malha viária: topografia plana, acidentada ou bastante acidentada; raio de curvatura “só passa carro” ou “passa ônibus”; largura de rua grande, média ou estreita; pavimentação asfáltica, calçamento ou terra. Também é analisado um fator de demanda: a existência ou não de importantes pontos geradores de viagens.

Os autores não analisaram o desejo de viagem dos usuários, mas sim procuraram proporcionar à população de uma determinada região um serviço de ônibus que passasse a um máximo de 400 metros de sua residência. Para teste do sistema, foram utilizados dados de um bairro do município de Campina Grande – PB. O mesmo mostrou-se eficiente, dentro dos objetivos definidos e das limitações computacionais da época.

Finalmente, cita-se o trabalho de MAHA (1997), que aplica o método de Sintaxe Espacial para definir corredores de ônibus urbanos. Primeiramente são detalhados os princípios básicos, baseando-se principalmente em SILVA & FERRAZ (1991). Faz-se uma classificação quanto aos tipos básicos de linha possíveis (radiais, diametrais, tangenciais e circulares). As características dos corredores de ônibus e eixos de transporte no Brasil são definidos principalmente por TTC³⁴ apud MAHA (1997) e, no exterior, pode-se consultar FURTH (1986).

MAHA classifica-se então os métodos de roteirização em três grupos, seguindo orientação de SOARES (1982): (a) UTPS – *Urban Transportation Planning Systems*; (b) algoritmos de otimização e (c) gráficos iterativos esboço-plano. A Sintaxe Espacial estabelece relações entre suas variáveis configuracionais na análise do espaço urbano (MAHA, 1997). As variáveis destacadas são:

³⁴ TTC – Trânsito, Transporte Coletivo e Comunicações (1988) “*Elaboração do Plano Operacional*”. Gerência do Sistema de Transporte Público de Passageiros: planejamento da operação. EBTU – Empresa Brasileira de Transportes Urbanos. Vol. 5. Brasília.

conectividade e profundidade, em nível local; e integração e inteligibilidade, em nível global. Com base nessas variáveis, constrói-se as linhas axiais, fundamentando assim a teoria dos Movimentos Naturais. “Quantifica-se as características topológicas da rede para se classificar a potencialidade de utilização dos diversos segmentos do sistema viário”.

Em seu estudo de caso, MAHA (1997) usou o software AXMAN (*University College London*) para testar o método em Anápolis – GO. Os resultados foram considerados satisfatórios, de acordo com os testes estatísticos de correlação entre as variáveis que definem os locais de corredores de ônibus. Como sugestão para pesquisas futuras, a pesquisadora afirma que “a representação da malha viária através do mapa axial precisa ser aprimorada”. Isto comprova que o método foi eficiente para se definir corredores e eixos principais de transporte coletivo, mas é incapaz de precisar os traçados em áreas pouco densas e de baixa demanda.

2.4. Métodos Aplicáveis a Grandes Sistemas

Todos os métodos descritos nos dois sub-itens anteriores (2.3.3.1 e 2.3.3.2) não apresentam uma função objetivo global que atenda de forma abrangente aos detalhes das diversas variáveis que compõem um COP. Isto é essencial, caso se deseje considerar o processo de traçado de novas linhas da forma pouco subjetiva, e aproximar o modelo de forma mais fiel possível à realidade.

Em cidades médias e pequenas, pode-se até aceitar um planejamento de rede de TPU sem levar em conta a demanda (em termos de desejos de viagem), pois os eventuais problemas de não atendimento ou deficiências de conectividade podem ser facilmente corrigidos com um redimensionamento pós implantação. Porém, em grandes cidades e metrópoles, somente devem ser considerados para o planejamento da rede de Transporte Público os métodos que tenham como dados básicos os desejos de viagem. Assim, apresenta-se a seguir a revisão bibliográfica detalhada dos métodos racionais que atendem a essa característica fundamental, bem como a outras incorporadas com o passar do tempo, tornando cada vez mais detalhadas (mas aumentando paradoxalmente a simplicidade delas) as formulações matemáticas.

2.4.1 Método de HASSELSTRÖM (1981)

HASSELSTRÖM (1981) fez uma revisão de abordagens sobre o detalhamento do projeto de redes de ônibus, identificando em cada uma: (a) demanda; (b) a função objetivo; (c) as condições de contorno; (d) comportamento do usuário; (e) técnicas de solução e (f) tempo de processamento. Desenvolveu então uma nova abordagem, que foi incorporada ao software desenvolvido pela VTS Systems, empresa pertencente ao Grupo Volvo, o VIPS II. É sem dúvida a abordagem mais sofisticada de todas as anteriores, e por isso constitui-se um marco na área. Seu método já estava definido dois anos antes da publicação de sua tese, em um manual da Volvo (ver em HASSELSTRÖM³⁵ apud AXHAUSEN & SMITH, 1985)

Como função objetivo, foi utilizada a maximização do excedente do consumidor, ao contrário de todas as outras funções dos métodos (que possuem uma função matemática) já relatados, que usaram a minimização do custo total (expresso em função do tempo) e tiveram como restrição ou o custo operacional total, ou a frota máxima que poderia ser alocada.

Na compra de mercadorias, os benefícios devem ser medidos pela vontade total de se pagar um máximo valor por eles. O excedente do consumidor representa a diferença entre o que o comprador está disposto a pagar pelo serviço ou produto e seu valor real. Ou seja, o consumidor está ganhando enquanto essa diferença for positiva. Se fosse negativa (suposição hipotética), isso indicaria que ele não está disposto a comprar por aquele preço.

Essa lógica pode ser aplicada ao transporte de passageiros, sendo que o custo total ao usuário deve incluir, além da tarifa, o consumo de seu tempo a bordo, na caminhada até a linha, no tempo de espera e nas inconveniências (transferências, veículos lotados). Segundo HASSELSTRÖM, a esse custo total poderia ser acrescido um chamado “custo generalizado”, que seria uma forma de promover maior conforto ao usuário.

³⁵ HASSELSTRÖM, D. (1979) A Method for Optimization of Urban Bus Route Systems. *Report 88-DH-03*. VOLVO BUS CORPORATION, Gothenburg, Sweden.

A formulação não leva em consideração a flutuação da demanda ao longo do dia, porque a dependência do tempo iria complicar muito o algoritmo, e também porque uma estrutura de oferta dependente diretamente do tempo é difícil de ser implementada. Isso foi testado em Maastricht, Holanda, mas foi abandonada porque os usuários ficaram muito confusos. A forma usada para se ajustar a oferta à flutuação da demanda condiz com a prática normal: deve-se definir períodos homogêneos de demanda, de modo que a frequência seja constante para cada período definido.

Maximizar o excedente do consumidor é equivalente a maximizar o número de viagens para uma dada função de demanda. E se a tarifa for igual para todos os pares O/D da matriz de desejos de viagem, maximizar o número de viagens atendidas significa maximizar a arrecadação. HASSELSTRÖM conclui que nessas circunstâncias “a maximização do lucro do operador irá prover um sistema de transporte público com maximização da operação e da utilidade social”. Esta é uma afirmação perigosa, no sentido de que o nível de serviço deve ser observado no cumprimento dessas viagens.

É desenvolvida uma abordagem em dois níveis de otimização: no primeiro nível gera-se um desenho inicial da rede, e no segundo o sistema é descrito em detalhes.

2.4.1.1 Primeiro nível de otimização

O objetivo do primeiro nível de otimização do método de HASSELSTRÖM é “encontrar uma área de vizinhança promissora para o início da busca por um ótimo local”.

Primeiramente, estimam-se os caminhos que serão seguidos pelo passageiros numa rede “ótima” sem explicitar nenhuma consideração sobre o serviço. Para se reduzir os custos de distribuição das viagens por TPU, as rotas básicas são encaixadas nesses caminhos (abordagem indireta). Uma outra abordagem possível seria a simples eliminação de todas as rotas que necessitariam de transferências (essa é a chamada abordagem direta, e é adequada a sistemas pequenos e médios).

A abordagem indireta é subdividida em três partes. Estima-se primeiramente o número de passageiros que irão viajar na rede “ótima”. Depois gera-se um conjunto grande de rotas possíveis e finalmente escolhe-se a combinação ótima de rotas e frequências (que podem ser estimadas tanto de maneira simplificada, que pode ser usada em cidades pequenas, quanto de maneira complexa, adequada a grandes cidades).

Como resultado, tem-se uma rede “crua”, que necessita de refinamento tanto no desenho dos itinerários quanto nas frequências encontradas. Isso porque tem-se apenas rotas diretas de ida e volta.

2.4.1.2 Segundo nível da otimização

Neste nível, é desejável que se alcance o ótimo, ou pelo menos um ótimo local. Para aplicá-lo, não é necessário que o primeiro nível tenha sido realizado, podendo-se fazer a otimização refinada diretamente. Este segundo nível foi desenvolvido em conjunto com Ingmar Andréasson (ver trabalho deste em ANDRÉASSON, 1977).

Para avaliação das rotas são geradas três listas contendo informações sobre elas:

- a) para cada rota, uma lista de pontos de parada atendidos;
- b) para cada ponto de parada, uma lista de rotas que passam por ele;
- c) para cada par de rotas, uma lista de pontos de parada comuns, onde poderiam acontecer as transferências.

O método de HASSELSTRÖM (1981) aplica a programação linear com o objetivo de se minimizar as transferências, limitadas no máximo a duas. Escolhe-se um número máximo de rotas na rede. Para cada linha básica definida anteriormente, calculam-se os tempos de viagem, de caminhada, e de espera (este pode ser limitado para cada rota³⁶).

³⁶ Além da limitação do tempo de espera, a sofisticação deste algoritmo é tanta que pode-se limitar também o tempo de espera na transferência de uma rota para outra num dado ponto de parada qualquer servido pelas duas.

A variável demanda é incorporada diretamente à avaliação das rotas que formarão a rede ótima, o que significa que uma melhoria no padrão das viagens está diretamente acompanhada por um acréscimo no número de passageiros. São otimizadas tanto as rotas individualmente, quanto a interação entre elas. Isso quer dizer que várias linhas se cruzando em um determinado ponto indicarão a necessidade de um terminal nesse local. As rotas então devem ser quebradas ou reconectadas no ponto de interseção, de modo a se minimizar o número de transferências ou o número de veículos ou ambos. Também são otimizadas as frequências e tipo de veículos que irão operar nas rotas da rede otimizada. Todas as ferramentas podem ser combinadas de um modo flexível.

Para se gerar a rede otimizada, foi utilizado um método heurístico, que foi aplicado à cidade de Göteborg, Suécia, com cerca de 500 mil habitantes, 50 linhas de ônibus (frota de 200 veículos) e 10 linhas de transporte sobre trilhos (frota de 200 veículos leves).

O método de HASSELSTRÖM é composto por várias funções objetivo, contendo vários algoritmos, cada um atendendo a um objetivo específico. Os detalhes desses algoritmos podem ser vistos em HASSELSTRÖM (1981), e constituem uma referência imprescindível àqueles que pretendem aprofundar seus estudos sobre os diversos aspectos concernentes à roteirização de TPU. Porém, existem alguns impeditivos para seu uso massificado, que serão discutidos no Capítulo 5 – Escolha do Método Mais Adequado às Grandes Cidades Brasileiras.

2.4.2 Método de MARWAH et al. (1984)

O método de MARWAH et al. (1984) tem como objetivo: (a) concentrar o fluxo de passageiros no sistema viário de modo que a soma dos custos seja minimizada; (b) gerar uma grande gama de possibilidades que satisfaça as restrições e (c) simultaneamente selecionar as rotas e suas frequências de modo que o número de transferências evitadas seja maximizado. Foram utilizadas heurísticas para a concentração do fluxo e geração das rotas, e programação linear para selecionar as rotas e suas frequências.

Nos métodos anteriores a esse (LAMPKIN & SAALMANS, 1967; REA³⁷; HSU & SURTI³⁸; DHINGRA³⁹ apud MARWAH et al., 1984, dentre outros), a geração de rotas era feita sequencialmente. Cada linha era gerada, uma por vez, de acordo com a matriz O/D e sem considerar a interação das outras rotas que já haviam sido geradas. A programação dos veículos era feita depois que todas as rotas do sistema terem sido determinadas. Esse método inovou no sentido de selecionar as rotas e determinar as frequências de atendimento de forma simultânea.

Algumas restrições adotadas no modelo de geração de rotas: comprimento mínimo de 2 km; comprimento máximo igual a duas vezes o caminho mínimo entre os pontos de parada finais / estações de ponta e não pode haver retorno de caminho na rota. São quatro os passos para a geração das rotas:

- Passo 1) Todos os pares O/D que têm arcos diretos de ligação entre eles são selecionados primeiro.
- Passo 2) Os pares O/D que não são conectados diretamente são divididos em grupos de acordo com a distância mínima entre eles (variando de 1,5 a 20 km). a geração das rotas é feita primeiramente para os pares mais próximos e é expandida usando informações das rotas já geradas.
- Passo 3) Para um dado grupo de pares O/D os caminhos alternativos de rotas é gerado da seguinte forma: seja i-j um para O/D tendo como paradas $i_1, i_2, i_3, \dots$ no caminho mínimo entre eles. Seja k_1 o nó a ser inserido de modo que o caminho mínimo entre i e j via k_1 seja menor que 1,5 vezes a distância mínima entre i e j. Todas as rotas já estabelecidas entre i e k_1 e entre k_1 e j são consideradas. Todas as combinações de rotas entre i e k_1 e entre k_1 e j são analisadas de modo que o comprimento total do caminho selecionado entre i e j não exceda duas vezes o caminho mínimo entre eles.

³⁷ REA, J. C. (1971) *Designing urban transit systems: an approach to the route-technology selection problem*. NTIS-PB-204881. Washington University, Seattle.

³⁸ HSU, J.; SURTI, V. H. (1975) *A system approach of optimal bus network design*. Research Report 19. Center for Urban Transportation Studies, University of Colorado at Denver. Sep.

³⁹ DHINGRA, S. L. (1980) *Simulation of routing and scheduling of city bus transit network*. Ph.D. thesis. IIT Kanpur, India. May.

O procedimento é repetido para todos os possíveis nós intermediários ($k_1, k_2, k_3, \dots$) a serem inseridos, e todas as rotas possíveis são armazenadas.

Passo 4) o Passo 3 é repetido para todos os pares O/D de um grupo.

Essa heurística gerou 457 rotas possíveis para o caso em estudo. A heurística seguinte foi construída para o cálculo do número de transferências salvas por viagem numa rota. Para seu cálculo, consideram-se os fluxos “desviadores” (*turning flows*), ou seja, os fluxos de passageiros que necessariamente têm que pegar mais de uma linha de ônibus para chegar a seu destino:

Passo 1) Todos os fluxos desviadores na rota são encontrados, usando-se a matriz O/D.

Passo 2) O número de viagens por ônibus em cada arco é estimado usando a relação $NB_i = 0,137 FL_i^{0,795}$ ($R^2 = 0,88$), onde NB_i é o número de viagens por ônibus a serem realizadas numa unidade de tempo, no arco i ; e FL_i é o fluxo de passageiros na unidade de tempo, no arco i . O fluxo no arco é dado também pela matriz O/D.

Passo 3) O número de transferências salvas para cada fluxo desviador por viagem é encontrado por uma equação que minimiza NB_i .

Passo 4) O número total de transferências evitadas é encontrado somando-se as transferências evitadas de cada movimento desviador na rota.

Foram identificados 421 movimentos desviadores, e o valor máximo de cada fluxo desviador foi determinado. Finalmente, passa-se à escolha simultânea das rotas e frequências, usando-se a programação linear cuja função objetivo visa a maximização do número de transferências salvas por uma rota e das frequências associadas à ela.

As rotas ótimas e suas frequências foram obtidas para 7 regiões diferentes e para cada rede foram usadas 3 opções de frota máxima: 670, 750, e 790 veículos. Antes do estudo, haviam 191 linhas servindo a cidade, com uma frota de 670 ônibus e quilometragem média das rotas de 8 km. Talvez a escolha por simular uma frota maior que a existente se deu devido ao alto número de habitantes por ônibus, que é aproximadamente a 3,7 vezes a média encontrada no Brasil (ver mais detalhes no sub-item 4.1.3.3).

A disponibilidade maior ou menor de ônibus na operação afetou os resultados. À medida que a frota disponível cresce, o número de rotas na solução ótima também cresce. Isso acontece porque o crescimento no número de ônibus ajuda a aumentar o número rotas possíveis e, conseqüentemente, maximiza o número de transferências que podem ser evitadas. Como o número de rotas na solução ótima cresce, a tendência é se ter linhas mais curtas. Os resultados obtidos foram resumidos na Tabela 4.

TABELA 4 Influência da variação da frota no resultado

FROTA TOTAL	670	750	790
Nº. ótimo de rotas	160	191	207
Comprimento médio da rota (km)	6,6	6,1	5,8
Nº. de transferências salvas (10^3)	2.052	2.138	2.173

FONTE: MARWAH et al. (1984)

A comparação entre os resultados obtidos para as 7 regiões indica o que parece ser óbvio: o efeito que o tamanho da frota máxima tem sobre o sistema de TPU da região depende no tamanho da região, na demanda de tráfego e no uso do solo. A área central, por exemplo, que em Ahmedabad é bem menor em relação às outras, mostrou-se mais sensível a mudanças no tamanho da frota que as outras.

Como conclusão do trabalho, os pesquisadores indicam a necessidade de se considerar a variação estocástica na demanda por viagens. E, por terem considerado a média de demanda num dia útil típico, MARWAH et al. chama a atenção de se considerar a variação dos headways ao longo do dia, o que será visto nos próximos métodos.

2.4.3 Método de CEDER & WILSON (1986)

CEDER & WILSON (1986) descrevem de forma sistemática e completa diferentes técnicas de roteirização no TPU (exclusivamente do modo ônibus). Propõem uma nova abordagem para o problema da roteirização de ônibus, baseando-se nas abordagens anteriores. A técnica proposta por eles incorpora alguns dos aspectos positivos de trabalhos anteriores levantados principalmente por HASSELTRÖM (1981).

Eles argumentam que:

"...embora a completa reestruturação de um sistema de transporte coletivo não seja uma atividade que deva ser considerada como uma propriedade da operação cotidiana dos ônibus, como iniciativa infrequente ela pode ter impactos significativos na performance do sistema. Entretanto, existem riscos reais que uma reestruturação possa resultar em performance mais baixa, porém mensurável, se não for cuidadosamente pensada. Assim, é necessário o uso de um procedimento de projeto que reconheça toda a gama de impactos potenciais". CEDER & WILSON (1986)

O método considera dois níveis metodológicos, e procura-se alcançar 5 objetivos principais:

- i) desenvolver um algoritmo para o projeto (desenho) ótimo da rede tal que as rotas promovam a ligação entre todos os pares O/D e se encaixem nas condições de contorno de serviço e operacionais da viagem, das transferências e dos tempos máximos de espera;
- ii) desenvolver medidas de performance do ponto de vista do passageiro, da empresa operadora e da comunidade;
- iii) combinar outros componentes do planejamento operacional (desenvolvimento da tabela de horários e da alocação da frota) com os procedimentos do projeto da rede;
- iv) desenvolver análises de sensibilidade para se determinar as soluções toleráveis devido a possíveis mudanças na demanda e nas condições de contorno;
- v) desenvolver um sistema interativo homem-máquina no qual o especialista possa mudar as condições de contorno e as rotas durante o processo de projeto.

Este quinto objetivo é salientado por MOSCATO⁴⁰ como sendo desejável para a construção de um sistema informatizado para a roteirização no TPU. Isto porque como as variáveis e suas restrições são muitas, o fator de interação humana pode simplificar e tornar bem mais eficiente esse sistema. Por exemplo, o

⁴⁰ MOSCATO, P. (1998). (USP. Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação). *Comunicação pessoal*, em julho.

especialista pode identificar visualmente alguma alternativa de rota dada como viável pelo sistema, mas que na verdade é inviável devido às condições do local por onde passa. Assim, bastaria o planejador “clique” sobre a referida rota, e apagá-la, fazendo com que o sistema reinicializasse o processo já sem aquela alternativa, viabilizando assim outras rotas adjacentes que incorporariam a demanda daquela que foi excluída.

Assumindo como suposição simplificadora a roteirização para somente um período de tempo (por exemplo, o horário de pico da manhã), relata-se abaixo a formulação matemática para os dois níveis metodológicos propostos por CEDER & WILSON.

2.4.3.1 Formulação inicial do nível 1

Para diferentes possíveis rotas, selecionam-se aquelas que acomodem uma matriz de demanda $D = \{D(i,j)\}$, em termos de número esperado de passageiros do nó i para o nó j , $\forall i,j \in N$. Deve-se minimizar a seguinte função objetivo, obedecendo as seguintes condições de contorno (CC):

$$\sum_{(i,j) \in N} \Delta p H(i,j) + \sum_{(i,j) \in N} r(i,j)$$

$$\text{CC: (a) } \frac{t(i,j)}{t_m(i,j)} \leq 1 + \alpha(i,j)$$

$$\text{(b) } L_1 \leq L_k \leq L_2$$

$$\text{(c) } n \leq m$$

onde: $\Delta p H(i,j)$ = matriz da diferença entre o tempo de viagem da rota e o menor tempo de viagem entre i e j , $\forall i,j \in N$ [passageiro-hora];

$r(i,j)$ = tempo total de transferência gasto pelo usuário entre i e j , $\forall i,j \in N$ [passageiro-hora];

$t(i,j)$ = matriz dos tempos de viagem de i para j , $\forall i,j \in N$;

$t_m(i,j)$ = matriz dos menores tempos de viagem de i para j , $\forall i,j \in N$;

$\alpha(i,j)$ = matriz de excesso aceitável no tempo de viagem (diferença entre o tempo de viagem da rota e o menor tempo de viagem), expresso como

uma percentagem do tempo de viagem gasto pela rota mais rápida que liga i a j , $\forall i,j \in N \Rightarrow \alpha(i,j)$ é maior ou igual a zero [%];

L_1 = menor extensão possível para uma rota;

L_k = extensão da rota;

L_2 = maior extensão possível para uma rota;

n = número de rotas;

m = número máximo de rotas.

2.4.3.2 Formulação inicial do nível 2

Para diferentes rotas possíveis, cada uma satisfazendo D, deve-se minimizar a seguinte função objetivo:

$$C_1 \left[\sum_{(i,j) \in N} \Delta p H(i,j) + \sum_{(i,j) \in N} r(i,j) + \sum_{(i,j) \in N} t'(i,j) \right] + C_2 Z$$

obedecendo as CC (a), (b) e (c) mais:

$$F_k \geq F_m \text{ (frequência mínima para todas as rotas) e}$$

$$\sum_k (L_k F_k) \leq W, \text{ W = frota máxima disponível}$$

onde: C_1 = valor de um passageiro-hora do tempo de viagem;

C_2 = custo de um veículo (incluindo o custo de capital e custo operacional relativo ao período de tempo);

$t'(i,j)$ = matriz do tempo de espera estimado para a demanda de i para j ,

$\forall i,j \in N$ [passageiro-hora];

Z = número de veículos requeridos para operar o sistema;

F_k = frequência de serviço da rota k ;

F_m = mínima frequência para uma rota (o recíproco de *headway* máximo).

A medida de performance, nas duas formulações, é dada pela CC (a). Outras medidas poderiam ser incorporadas à função objetivo ou às CC. Nota-se também que este método possibilita a análise de mudanças tanto na demanda quanto no nível de serviço a ser ofertado. CEDER & WILSON ressaltam que novas rotas tenderão a induzir mudanças na demanda que irão servir (no próximo ciclo) como um novo *input* para o processo. É desejável então que se tenha dois estágios de análise de sensibilidade: 1) antes da roteirização (incluindo exame das frequências e alocação da frota) e 2) depois da implementação de novas e revisão das rotas. Por serem infrequentes as mudanças, a análise de sensibilidade irá incluir valores de referência anteriores, isto é, se o valor da função objetivo não aumentar acima desses valores, então as rotas deverão ser mantidas, sendo feitos pequenos ajustes apenas na frequência e na alocação da frota.

2.4.3.3 Algoritmo de construção de rotas

O algoritmo de construção das rotas do método de CEDER & WILSON é baseado na minimização da diferença entre o tempo em passageiro-hora da viagem direta e da viagem indireta. Foi o mesmo algoritmo utilizado por HASSELSTRÖM, e mostrou-se adequado por reduzir o tempo de processamento requerido para o programa de otimização quando se analisa em conjunto todas as alternativas possíveis.

Uma rota será considerada aceitável, se seu tempo de viagem entre i e j não for maior que uma percentagem $\alpha(i,j)$ dada em relação a $t_m(i,j)$. Matematicamente,

$$t(i, j) \leq \left[1 + \frac{\alpha(i, j)}{100} \right] t_m(i, j) \quad \forall i, j \in N$$

O algoritmo consiste em oito passos, iniciando pela construção das rotas a partir do nó que mais gera viagens, para todos os outros nós adjacentes. Eliminam-se os caminhos contidos dentro de outros. Eliminam-se os caminhos que estejam fora das condições de contorno impostas. Calcula-se a diferença em passageiro-hora entre cada caminho e o caminho mais rápido (ΔpH). Seleciona-se o nó mais próximo para ser uma possível continuação da rota. Verifica-se novamente as condições de contorno, continuando até que não sejam mais satisfeitas. Passa-se para outro ponto

de origem, eliminando-se o anterior. Pára-se quando todos os pontos de origem (que podem ser estações de transferência, por exemplo) estiverem analisados.

2.4.4 Método de BAAJ & MAHMASSANI (1991)

BAAJ & MAHMASSANI (1991) desenvolveram um algoritmo heurístico denominado *Route Generation Design Algorithm* – RGA, ou Algoritmo de Projeto de Geração de Rotas. Suas características principais são: (a) tem como dado básico a matriz de demanda, que influencia pesadamente o processamento; (b) permite uma interação do técnico especialista, para reduzir o espaço de busca; (c) gera diferentes conjuntos de rotas, correspondentes a compensações entre objetivos conflitantes. Para implementá-lo, usou-se a linguagem de programação Lisp, que permitiu uma reprodução fiel dos procedimentos computacionais, devido a capacidades particulares de busca dos caminhos e de processamento. O RGA foi aplicado ao sistema de transporte público da cidade de Austin, localizada no Estado do Texas, EUA.

2.4.4.1 O Algoritmo RGA

Dados: (a) uma matriz de demanda por TPU ($D_i, i \in I$, onde I é um conjunto de pares nodais) correspondente a um período selecionado de operação, (b) a descrição da rede de nós especificando para cada nó seus nós vizinhos e os tempos médios de viagem por ônibus em todos os arcos, (c) o número de assentos em cada ônibus e (d) o máximo fator de carga permitido para cada linha de ônibus, o RGA determina um conjunto de rotas que correspondem a diferentes trocas entre custo ao usuário e custo ao operador.

Os dados de entrada (16 ao todo) foram agrupados em 5 categorias, listadas na Tabela 5.

TABELA 5 As cinco categorias dos dados de entrada do algoritmo RGA

Categoria do Input	Itens de Input
Rede	número de nós da rede de rotas de ônibus lista de conectividade dois caminhos mínimos diferentes para cada par de nós número inicial de "esqueletos" M (decisão técnica) conjunto de nós terminais
Frequências	frequência máxima permitida em cada rota
Demanda	matriz O/D porcentagem mínima da demanda total a ser satisfeita pela expansão inicial dos "esqueletos" porcentagem mínima da demanda total a ser satisfeita pelo conjunto de rotas
Parâmetros	penalidade (em tempo) por transferência número de assentos nos ônibus fator de carregamento máximo dos ônibus fator de compartilhamento do nó fator de capacidade direta
Regras de Inserção e Medidas de Custo	seleção dos nós e estratégia de inserção (decisão técnica) incremento mínimo na demanda satisfeita pelo custo de inserção de um nó

FONTE: BAAJ & MAHMASSANI (1995)

A estrutura do algoritmo consiste em 6 passos básicos.

- Passo 1) Identifique os M pares nodais que tiverem maior demanda. Faça $k = 1$.
- Passo 2) Selecione (i.e. especifique os nós de) a k-ésima rota correspondente ao k-ésimo par nodal.
- Passo 3) Verifique se todas as M rotas foram especificadas. Se $k = M$, vá para o Passo 4, caso contrário faça $k = k + 1$ e retorne ao Passo 2.
- Passo 4) Verifique se no conjunto de M rotas a presença de N subconjuntos de rotas. Identifique-os e os remova das M rotas geradas até então. Se $N = 0$, então vá para o Passo 5, caso contrário faça $k = M - N$, selecione o par nodal de maior demanda e retorne ao Passo 2.
- Passo 5) Compute o total de demanda satisfeita diretamente usando as M rotas independentes geradas até então. Se a demanda exceder $D_{\min}^0$ (porcentagem mínima de demanda satisfeita diretamente), vá para o Passo 6, caso contrário remova da matriz de demanda selecionada todos os pares

cuja demanda é satisfeita diretamente, selecione o par nodal remanescente de maior demanda, faça $k = M = M + 1$ e retorne ao Passo 2.

Passo 6) Compute o total de demanda satisfeita pelo conjunto das M rotas (via nenhuma ou 1 transferência). Se essa demanda exceder $D_{\min}^1$ (porcentagem mínima de demanda satisfeita) termine o processo do RGA e dê como saída o conjunto das M linhas, caso contrário remova da matriz de demanda selecionada todos os pares cuja demanda é satisfeita com no máximo uma transferência, selecione o maior (demanda) par nodal remanescente, faça $k = M = M + 1$, e retorne ao Passo 2.

No Passo 1 o RGA classifica a matriz em ordem decrescente de número de viagens e remove os M primeiros da matriz. Nos passos 2 e 3 o RGA conecta um dado par nodal de alta demanda a tanto seu caminho mínimo⁴¹ quanto ao próximo caminho mínimo cuja composição nodal for substancialmente diferente. A composição nodal será explicada mais adiante. Um “esqueleto” inicial é definido, e o processo se repete para os pares nodais remanescentes até que todos os M “esqueletos” sejam definidos.

No Passo 4 são eliminadas as sub-rotas, ou seja, as rotas cuja demanda pode ser satisfeita por outras rotas. Os pares correspondentes a essas rotas maiores são tirados da matriz de demanda selecionada, e o RGA seleciona o par de nós que conecta as rotas, pela seqüência de classificação. As sub-rotas são ligadas às rotas que permanecerão se elas estiverem completamente contidas a essas⁴².

No Passo 5 soma a quantidade de demanda servida sem necessidade de transferência (viagem direta) dado um conjunto de rotas R . Se a quantidade, em relação ao total de demanda, for maior que $D_{\min}^0$, OK! Caso contrário o processo recomeça até que essa relação seja satisfeita.

⁴¹ O caminho mínimo é definido em termos de tempo de viagem por ônibus no arco correspondente na malha viária. Assume-se que o tempo de viagem não é afetado pela quantidade de rotas que utilizam esse arco.

⁴² Em uma versão posterior a essa, os autores pretendem considerar a razão de cardinalidade de cada interseção de nós da sub-rota com um dado número total de nós da rota.

No Passo 6 a demanda servida com uma única transferência⁴³ é somada à demanda servida sem baldeações. Se essa quantidade for maior que $D_{\min}^1$, o processo é interrompido e o conjunto de rotas do “esqueleto” inicial é dado.

A experiência do especialista pode ser usada tanto para produzir melhores soluções quanto para reduzir o espaço de busca, e ainda prover uma busca mais eficiente. O profissional pode definir o espaço de busca, que é afetado por três fatores básicos: (a) o número M, a especificação dos nós e a ordem de expansão dos “esqueletos” iniciais; (b) a estratégia de seleção e inserção dos nós; e (c) a identificação dos nós terminais. Esses fatores serão discutidos no próximo sub-item.

2.4.4.2 Determinação dos “esqueletos” iniciais

Número M

Os “esqueletos” iniciais correspondem às rotas que ligam os pares de nós que restaram no processo de seleção. Eles podem ser definidos de duas maneiras, ou pelo caminho mínimo, ou por um caminho alternativo que liga esses pares. O caminho alternativo deve atender a dois requisitos, simultaneamente: (a) não deve ser muito longo (por exemplo, no máximo 50 % mais demorado que o tempo correspondente à rota de caminho mínimo) e (b) sua composição nodal deve ser substancialmente diferente da composição nodal do caminho mínimo.

Na seleção dos pares de maior demanda (que definem os “esqueletos” iniciais), várias alternativas são possíveis. O técnico em transportes que tiver familiaridade com o sistema de TPU em questão pode determinar o número M e/ou a identidade desses M pares, considerando os maiores pontos de geração de viagem. O especialista pode ainda especificar alguns dos “esqueletos” iniciais ou rotas, e identificar os principais corredores na rede. É desejável que M seja menor que o número de rotas necessárias.

⁴³ A demanda satisfeita com duas transferências não é computada porque o RGA é um algoritmo em nível de projeto, e não uma ferramenta de análise detalhada. A incorporação das viagens com duas baldeações, segundo seus idealizadores, implicaria numa carga computacional considerável sem retorno correspondente.

Se o profissional não tiver conhecimento suficiente sobre o sistema de TPU da cidade a ser afetada, ele pode comparar os dados de população, demanda atendida, número de linhas, frota, etc. de uma outra cidade similar, de modo a estimar um n° . M. BAAJ & MAHMASSANI (1995) sugerem ainda que se faça um banco de dados contendo essas informações, para ser consultado ao se definir M.

Porém, se nenhuma das alternativas descritas for possível, determina-se $M = 1$ e o RGA vai adicionando rotas até que um conjunto satisfatório de rotas seja encontrado.

Composição nodal dos “esqueletos” iniciais

Um caminho p1 tem uma composição nodal significativamente diferente da de um caminho p2 se o número de arcos comuns não exceder a 50 %, por exemplo, do número total de arcos do caminho p1. Foi utilizado o algoritmo de busca por menores caminhos de SHIER⁴⁴ para gerar os 10 menores caminhos entre todos os pares nodais da rede de TPU. O caminho mínimo de cada par é definido e o caminho alternativo é procurado dentre os outros 9.

Os 9 caminhos alternativos são examinados seqüencialmente na ordem crescente do tempo de viagem por ônibus para detectar o primeiro caminho que siga simultaneamente os seguintes critérios: (a) que não tenha retornos; (b) que a diferença entre o seu tempo de viagem para o mínimo esteja dentro de uma margem definida; e (c) que o número de arcos em comum com o caminho mínimo não exceda em 50 % do número total de arcos usado pelo caminho mínimo. Se houver um caminho que atenda os três critérios, ele é identificado como o caminho alternativo daquele par nodal. Caso contrário, o par ficará sem um caminho alternativo ao mínimo.

2.4.4.3 Estratégias de Expansão das Rotas

Podem ser usadas 4 estratégias para se expandir as rotas. Apesar desse nível de detalhamento ser exagerado para os objetivos do presente trabalho, lista-se essas estratégias: (a) MD – inserção de máxima demanda; (b) MDMT – inserção de

⁴⁴ SHIER, D. R. (1979) On algorithms for finding the k shortest paths in a network. *Networks* 9:195-214.

máxima demanda por tempo mínimo; (c) MDML – inserção de máxima demanda por aumento mínimo no comprimento da rota; e (d) MDMC – inserção de máxima demanda por mínimo custo.

2.4.4.4 Aplicação do RGA em Austin

A aplicação teve um caráter mais ilustrativo do que propriamente a otimização do sistema da cidade. Para essa aplicação, foi utilizado o modelo de TSYGALNITZKY⁴⁵ (apud BAAJ & MAHMASSANI, 1995) de analogia com os fluidos para prever os pares O/D, com base em uma pesquisa Sobe/Desce simples de 1990. Assumiu-se que todos os passageiros têm a mesma probabilidade de embarcar nos veículos que passam, e para tal basta que os mesmos se encontrem a uma certa distância do nó que representa a parada de ônibus. Assumiu-se também que os pares nodais formados significavam viagens completas, apesar de na realidade alguns estarem incluídos em viagens com transferências.

O pico da manhã de quarta-feira típica foi utilizado para gerar a matriz de desejos de viagem, com um total de 5.682 viagens contadas, para todas as 36 linhas de ônibus de Austin. Cerca de 4,9 % das ligações possíveis, o que corresponde a 952 pares O/D de 19.460 combinações possíveis, apresentaram alguma demanda. Todas as outras ligações não apresentaram nenhuma viagem, o que forma uma matriz bastante esparsa. O par O/D com maior demanda apresentou 80 viagens/hora.

No exemplo descrito nesse artigo, foram feitas as seguintes considerações: os nós terminais não foram pré selecionados; o número máximo de “esqueletos” iniciais foi igual a 20; para o desenho desses “esqueletos” deviam ser usados somente os arcos de caminho mínimo; 50 % da demanda devia ser satisfeita diretamente ($D_{\min}^0$), e 90% com menos de duas transferências ($D_{\min}^1$); a frequência máxima foi de 30 ônibus/h; foi escolhida uma penalidade para transferências de 5 min no tempo de viagem; o fator de lotação máxima de carga foi de 1,25, sendo o número de assentos nos veículos de 40 lugares (todos iguais).

⁴⁵ TSYGALNITZKY, S. (1979) *Simplified methods of transportation planning*. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

Os “esqueletos” foram expandidos de acordo com as duas estratégias apresentadas: (i) ordem decrescente de demanda dos nós semente (a 1^a. estratégia atendeu 52,7 % da demanda de forma direta) e (ii) ordem inversa desta (a 2^a. atendeu 54,9 % da demanda de forma direta). As rotas foram expandidas de acordo com a estratégia MDMT. Ambas as estratégias consumiram pouco mais de um minuto e meio de processamento, e satisfizeram a condição de $D_{\min}^0 = 50\%$. Assim, não houve necessidade de “rodar” o algoritmo novamente.

2.4.5 Método de SHIH & MAHMASSANI (1994)

Trata-se da continuação do trabalho de doutorado do professor M. Hadi Baaj⁴⁶, da *American University of Beirut*, Líbano. Tanto o professor Baaj quanto o professor Mao-Chang Shih, do *Kaohsiung Polytechnic Institute*, Taiwan, foram orientados em nível de doutoramento pelo professor Hani S. Mahmassani, da *University of Texas at Austin*, Estados Unidos. Uma publicação que resume bem o trabalho conjunto dos três autores é SHIH et al. (1998).

A grande contribuição da pesquisa de SHIH foi a introdução do conceito de transferências programadas no problema da definição de redes ótimas de TPU. Trata-se de uma solução interessante e eficiente para a minimização dos tempos de transferência, e otimização da integração entre linhas de um mesmo modo e integração entre modos diferentes (por exemplo, ônibus – metrô), além da própria melhoria na operação dos terminais.

Transferências programadas significam a coordenação da operação das diversas linhas que atendem a uma mesma região ou eixo de transporte. No caso de um sistema tronco-alimentador, por exemplo, isso corresponde a coordenar as linhas alimentadoras de modo que cheguem simultaneamente ao terminal de integração, em frequências sincronizadas, de modo que os passageiros embarquem ao mesmo tempo na linha troncal. Um outro exemplo seria o caso de um terminal central de ônibus, que serve a linhas diametrais. Com a chegada simultânea dos veículos, há uma troca rápida, dando maior conforto ao usuário no transbordo que o levará a seu destino

⁴⁶ BAAJ, M. H. (1990) *The transit network design problem: an AI-based approach*. Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, University of Texas, Austin, Texas, EUA.

final. Além da rapidez, há a comodidade do usuário poder contar com diversas linhas coordenadas, que não só possibilitam a integração física e tarifária, mas também a integração temporal. Em ambos os exemplos, há nítida melhoria da operação, com diminuição de gastos.

O método desenvolvido tem como características básicas:

- a) a possibilidade de identificação de centros de transferências;
- b) a possibilidade de configuração da rede no entorno desses centros;
- c) a possibilidade de projetar sistemas com transferências programadas;
- d) a modelagem da alocação de viagens considerando as transferências programadas ou não;
- e) a possibilidade de seleção do tamanho dos veículos, o que dá ao operador uma maior gama de escolha na configuração da oferta dado um nível de serviço determinado; e
- f) a possibilidade de se integrar sistemas de ônibus de alta demanda e rota/frequência fixas com serviços de ônibus em locais de baixa densidade populacional atuados pela demanda (trata-se de um tipo de transporte semi-público raro no Brasil).

Além dessas características básicas, o método prevê a ligação entre os centros de transferências (terminais de integração) por meio de serviços diretos e expressos, utilizando modos de maior capacidade (e.g. ônibus articulados, VLT, metrô, etc.).

O RGA de BAAJ & MAHMASSANI (1991) é utilizado como base para a construção do *Route Generation Procedure* – RGP, que incorpora o conceito das transferências programadas em centros (terminais ou estações) de transferências. Caso os terminais de integração sejam pré-selecionados pelo especialista, o RGP constrói a rede de entorno a eles. Caso contrário, o RGP aplica o mesmo procedimento do RGA, fazendo a formação inicial dos esqueletos, depois a expansão dos esqueletos para rotas completas e seleção do lay-out final das rotas.

Para garantir que as viagens entre os terminais sejam diretas, o RGP considera primeiro os pares de terminais cujo tempo de viagem mínimo entre eles esteja abaixo do máximo determinado. Se o número N de pares de terminais de transferências for menor que um número mínimo de M rotas, então o RGP retira da lista que contém os pares nodais os N pares factíveis e seleciona os $M - N$ pares de maior demanda dentre os restantes, retirando-os da lista. A lógica que se segue a partir de então é a mesma apresentada três anos antes (expansão dos esqueletos para rotas usando a seleção de nós e a estratégia de inserção). A diferença está no fato da priorização dos centros de transferência em relação a outros nós candidatos a serem inseridos.

Existem algumas diferenças no uso do RGA nesse método. No RGA usado por BAAJ & MAHMASSANI (1991), o conjunto M de pares de maior demanda foram selecionados como sementes nodais para a construção das rotas. Consequentemente, a rede de TPU resultante aproxima-se muito das linhas de desejo de viagem, formando assim viagens diretas entre os pares de maior demanda de modo a diminuir o custo global ao usuário. O RGP também considera a importância das viagens diretas, caso seja selecionada a opção de não considerar o conceito de transferências programadas. Se esse conceito não for considerado, então o RGP aplica o mesmo procedimento do RGA. Se esse conceito for considerado, então o RGP considerará primeiramente os terminais de integração (centros de transferência) para a inserção de nós na rota, e depois considerará os outros nós.

Além das funções descritas no método de BAAJ & MAHMASSANI (ver no item anterior), incorpora-se um procedimento chamado *Network Analysis Procedure* – NETAP, que é usado para: (a) alocar a demanda e computar parâmetros de rede, rotas e nós; (b) determinar as frequências dos ônibus e capacidade (tipo) dos veículos para todas cada rota; e (c) computar uma variedade de medidas de performance. Esse algoritmo serve basicamente para avaliar o sistema. Ele determina 8 tipos de informações pertinentes ao sistema:

1. Informações descritivas do sistema, divididas em três tipos de dados: nos nós (consiste no fluxo que chega, o fluxo que termina naquele nó e o fluxo que o usa para transferências), nos arcos (consiste nos fluxos dos arcos percorridos por

- cada rota) e nas rotas (consiste no tempo de ciclo e o número total de passageiros em cada rota);
2. Demanda: o número total de viagens no sistema, bem como as percentagens da demanda total não atendida, e demanda atendida com nenhuma, uma e duas transferências;
 3. Custo ao usuário: tempo total de viagem e respectivas percentagens no tempo de viagem no veículo, tempo de espera, tempo gasto com transferências (soma-se uma penalidade pré-definida) gastos pelo usuário. Faz-se a equivalência atribuindo um valor monetário aos tempos de espera e aos tempos de viagem a bordo;
 4. Nível de serviço: frequência, capacidade do veículo e fator de carregamento associado para cada rota;
 5. Custo ao operador: custo operacional e tamanho de frota requerido;
 6. Consumo de combustível: consumo total de combustível;
 7. Utilização do sistema: a razão da quilometragem realmente utilizada pela quilometragem total utilizada pelo sistema;
 8. Forma da rede: classificação da rede quanto a sua forma (radial, longitudinal, grelha ou delta) A rede também é classificada quanto ao número de núcleos (um, dois, três ou múltiplos).

O NETAP foi testado e os resultados dos testes atestam a consistência das saídas geradas (frequências e tamanho dos veículos). O algoritmo também foi implementado em linguagem Lisp.

Uma aplicação ilustrativa foi feita na cidade de Austin, selecionando-se 177 nós que correspondem aos pontos de parada mais importantes do sistema de TPU da cidade. Usou-se o mesmo modelo de TZYGALNITZKY para estimativa de origem/destino do carregamento nas linhas, como em BAAJ & MAHMASSANI (1991).

Determinou-se que 60 % das viagens atendidas deveriam ser diretas. O número máximo de demanda sem atendimento foi escolhido em 20 %. Foram

utilizados os caminhos mínimos para gerar os esqueletos básicos. Usou-se a estratégia MDML para expandir-se as rotas. Foi determinado um valor monetário (por hora) igual a US\$ 9 e US\$ 3, respectivamente, para os tempos de espera e tempo de viagem a bordo.

Como resultado, foram geradas 27 rotas, 9 centros de transferências programadas, o que satisfaz 87 % da demanda total. 60 %, como definido, é atendida por viagens diretas, 24 % com uma transferência e 3 % com duas transferências. 13 % da demanda não será atendida. Dado o tempo total gasto pelo usuário no sistema de transporte, 74 % corresponde a tempo dentro dos veículos, 21 % corresponde a tempo de espera, e apenas 4 % refere-se a transferências (já considerando as penalidades).

A frota requerida divide-se em três tipos de veículos: 15 assentos (91 ônibus), 27 assentos (52 ônibus) e 37 assentos (16 ônibus). A utilização total do sistema ficou em 56 %, e a rede foi classificada como longitudinal com três núcleos.

De todos os métodos apresentados nesta revisão bibliográfica, este é o método que apresentou maior detalhamento. Porém, apesar disso não houve incremento significativo na complexidade dos modelos, sendo todos eles acessíveis a todos que se interessarem em estudá-los. Ao contrário dos modelos de HASSELSTRÖM (1981), por exemplo, que são fechados e de difícil compreensão.

2.4.6 Método de CEDER & ISRAELI (1998)

O método de CEDER & ISRAELI divide-se em 7 partes bem definidas:

- 1ª. parte) o sistema gera todas as possíveis rotas, de todos os terminais, dentro de limites inferior e superior de comprimento. Há também um limite quanto ao tempo de viagem entre cada par O/D (% a mais do menor caminho em tempo);
- 2ª. parte) baseia-se no algoritmo de mapeamento que produz as principais transferências por toda a rede. O primeiro passo do algoritmo é estabelecer linhas diretas adicionais entre pares O/D com alta demanda. Na verdade, essas linhas geralmente se localizam em pontos centrais, sendo necessárias viagens ligando-as aos terminais. O algoritmo é

responsável pela criação das transferências aplicadas aos pares desconectados da rede, bem como a todos os outros pares O/D;

3ª. parte) o sistema cria um ou mais conjuntos mínimos de rotas e suas respectivas transferências, tal que a conectividade entre nós seja mantida e o desvio total do menor caminho seja minimizado. Este problema é definido como um *Set Covering Problem* (SCP), ou Problema do Estabelecimento da Cobertura), que é difícil de ser resolvido (ver em MINIEKA⁴⁷ apud CEDER & ISRAELI, 1998). Usando SCP consegue-se determinar o conjunto mínimo de rotas da matriz cujas linhas horizontais representam ou uma rota viável ou uma transferência;

2.4.6.1 Formulação do problema

Considere uma rede conectada composta de um grafo vetorial $G = \{N, A\}$ com um número finito de nós conectados por arcos. É adotada a seguinte notação:

Rota = caminho progressivo iniciado em um determinado terminal e terminado num certo nó, atravessando determinados arcos em seqüência;

Caminho de transferência = caminho contínuo que usa mais de uma rota;

$R = \{r\}$ = conjunto de rotas;

$TR = \{tr\}$ = conjunto de todos os caminhos de transferência;

N_r = conjunto de nós localizados na rota r ;

N_{tr} = conjunto de nós localizados no caminho de transferência tr ;

d_{ij}^r = demanda entre i e j , sendo $i, j \in N$, carregando a rota r ;

d_{ij}^{tr} = demanda entre i e j ao longo do caminho de transferência tr ;

⁴⁷ MINIEKA, E. (1978) *Optimization Algorithms for Networks and Graphs*. Marcel Dekker, New York. pp. 181-234.

λ_r = frequência de atendimento associada à rota r ;

$\lambda_{\min}$ = frequência mínima de projeto (o equivalente a headway máximo);

t_{ij}^r = tempo de viagem entre i e j na rota r ;

t_{ij}^{tr} = tempo de viagem entre i e j no caminho de transferência tr ;

t_r = tempo total de viagem da rota r ;

L_r = carregamento máximo de passageiros na rota r ;

w_r = tempo de espera do usuário da rota r ;

d_o = carregamento desejável para cada veículo (carregamento padrão);

$a_{tr}^r = \begin{cases} 1, & \text{se o caminho com transferência } tr \text{ conter a rota } r \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

O problema do projeto de rede está baseado em duas funções objetivas Z_1 e Z_2 :

$$\min Z_1 = a_1 \sum_{i,j \in N} PH(i,j) + a_2 \sum_{i,j \in N} WH(i,j) + a_3 \sum_r EH_r \quad (1)$$

$$\min Z_2 = F \quad (2)$$

onde

$PH(i,j)$ = ‘passageiro . hora’ entre nós i e j , sendo $i, j \in N$ (definido como o tempo do passageiro no veículo em uma base horária; entre os dois nós);

$WH(i,j)$ = tempo de espera entre nós i e j , sendo $i, j \in N$ (definido como a quantidade de tempo gasto nos pontos de parada entre os dois nós);

EH_r = horas vazias em rota r (definido como os lugares vazios no veículo em uma base horária, medidas em relação à capacidade de projeto do veículo);

FS = frota (número de veículos necessários para prover todas as viagens nos conjuntos de rotas escolhidos);

a_1, a_2, a_3 = coeficientes de peso.

2.4.6.2 Função objetivo Z1

A função objetivo Z1 trata do perfil de carregamento. É um histograma que descreve o número de passageiros a bordo do veículo vs. o comprimento da rota (em unidades de distância ou de tempo). É o carregamento nos arcos que definem a rota.

O primeiro elemento de Z1 é o total de ‘passageiro . hora’ no sistema de rotas, dado por:

$$\sum_{i,j \in N} PH(i,j) = \sum_{r \in R} \sum_{i,j \in N_r} d_{ij}^r t_{ij}^r + \sum_{tr \in TR} \sum_{ij \in N_{tr}} d_{ij}^{tr} t_{ij}^{tr} \quad (3)$$

O segundo elemento de Z1 é o tempo total de espera (considera-se somente a espera no ponto de parada e nas transferências). Este elemento representa a perspectiva do uso, e seu cálculo tem por base a seção de carregamento máximo para derivar a frequência dos veículos (como é feito na prática da programação operacional). Mais detalhes podem ser vistos em CEDER (1984).

$$\lambda_r = \max \left[\frac{L_r}{d_o}, \lambda_{\min} \right] \quad (4)$$

Se a frequência mínima requerida for o resultado de λ_r , quer dizer que o perfil de carregamento não influenciará na determinação da frequência. Adotando a distribuição determinística para o headway, e dada uma chegada aleatória de passageiros no ponto de parada, tem-se o tempo de espera no PED:

$$w_r = \frac{1}{2\lambda_r} \quad (5)$$

conseqüentemente,

$$\sum_{i,j \in N} WH(i,j) = \sum_{r \in R} \frac{1}{2\lambda_r} \left(\sum_{i,j \in N_r} d_{ij}^r + \sum_{ij \in N_{tr}} d_{ij}^{tr} a_{tr}^r \right) \quad (6)$$

O terceiro elemento de Z1 descreve o total de ‘horas vazias’, medidas com base no número de assentos ou na capacidade do veículo d_o

$$\sum_r EH_r = \sum_{r \in R} [\max(L_r, \lambda_{\min} \cdot d_o)]t_r - \sum_{i,j \in N} PH(i,j) \quad (7)$$

2.4.6.3 Função objetivo Z2

Trata-se de uma estimativa da frota necessária para atender a toda demanda. O modelo baseia-se na teoria da função de déficit (ver em CEDER & STERN, 1981). Essa teoria provê técnicas para alocar o número mínimo de veículos para atender a um quadro de horários dado. Ela possui diversos níveis de complexidade, mas para o método de roteirização só se utiliza da função mais simples, que é justamente a de quadros horários pré-determinados. Caso fosse necessária uma otimização mais detalhada, há como aumentar a complexidade.

2.4.7 Método de PATTNAIK et al. (1998)

Seguindo a tendência atual de se utilizar cada vez mais a Inteligência Artificial – IA para resolução dos COP, PATTNAIK et al. (1998) apresentam um método de otimização do conjunto de linhas de um sistema de TPU que usa como ferramenta de busca um Algoritmo Genético – AG. Essa técnica metaheurística foi concebida com base na genética e na seleção natural e tem-se mostrado bastante eficiente em diversas áreas do conhecimento.

Baseando-se nos modelos de CEDER & WILSON (1986) e de BAAJ & MAHMASSANI (1990), os pesquisadores indianos desenvolveram uma formulação matemática para o problema, levando em consideração para medida do custo global as perspectivas do usuário e do operador.

2.4.7.1 Forma do Algoritmo Genético

Mais importante que descrever a formulação é o entendimento da lógica do algoritmo genético, cujo procedimento estruturado apresenta-se da seguinte forma:

inicializar a população aleatoriamente
repita
 ache o valor da função objetivo;
 ache o valor da função de *fitness* (aptidão);
 gere a próxima população usando os operadores;
 reprodução;
 cruzamento;
 mutação.
até convergência.

Uma explicação sucinta e clara é dada por um professor de IA:

“Inicialmente, é gerada uma população formada por um conjunto aleatório de indivíduos que podem ser vistos como possíveis soluções do problema. Durante o processo evolutivo, esta população é avaliada: para cada indivíduo é dada uma nota, ou índice, refletindo sua habilidade de adaptação a determinado ambiente. Uma porcentagem dos mais adaptados são mantidos, enquanto os outros são descartados (darwinismo). Os membros mantidos pela seleção podem sofrer modificações em suas características fundamentais através de mutações e cruzamento (*crossover*) ou recombinação genética gerando descendentes para a próxima geração. Este processo, chamado de reprodução, é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada.”
(CARVALHO, 1997)

No caso de problemas do problema da otimização de redes, serão mantidas as linhas que se apresentarem mais eficientes no atendimento da função objetivo. As características que as definem como eficientes são incorporadas às outras rotas possíveis, pelo cruzamento (*crossover*). Somente “sobreviverão” as linhas mais aptas (*fitness*), sendo descartadas as outras.

2.4.7.2 Fases do Método

O processo consiste em duas fases: primeiramente um conjunto de rotas candidatas é gerado, e depois é aplicado o AG para a seleção do conjunto ótimo de rotas. A primeira fase é composta por seis passos:

Passo 1) Gere rotas para todos os pares nodais terminais.

- Passo 2) Gere uma rota de caminho mínimo entre os nós de origem e destino dos pares identificados no Passo 1.
- Passo 3) Se a rota satisfizer as restrições de comprimento máximo e mínimo, então aceite a rota.
- Passo 4) Gere rotas alternativas separando todos os arcos das rotas de caminhos mínimos geradas no Passo 2 e achando caminhos mínimos entre as mesmas origens e destinos, liberando os arcos em seguida.
- Passo 5) Verificar para cada rota alternativa se ela satisfaz as restrições quanto a (1) existência da rota; (2) duplicação de rotas; (3) importância do tamanho da volta dada em relação ao caminho mínimo original; (4) comprimento máximo da rota; (5) tamanho máximo da volta igual a 1,5 vezes o comprimento da rota de caminho mínimo. Se a rota alternativa satisfizer essas restrições, então aceite-a como rota candidata.
- Passo 6) Faça um ranking de todas as rotas baseando-se nos índices de performance e armazene-as como conjunto de rotas candidatas.

Na fase seguinte há duas possibilidades de aplicação do AG: pelo método de tamanho da sequência (*string*) fixo ou variável. O primeiro é mais simples e resulta em soluções melhores, mas requer um tempo computacional maior. O segundo possibilita a seleção do tamanho do conjunto de rotas simultaneamente à própria seleção do conjunto, mas requer uma codificação computacional mais complexa.

O método de PATTNAIK et al. (1998) mostrou-se eficiente em aplicação de parte de um sistema de transportes real, da cidade de Madras, Índia. No início de 1997 foi iniciada sua aplicação a um sistema muito grande, mas infelizmente não se tem notícias da atual situação, nem dos resultados alcançados. Uma observação sobre esse grupo de pesquisadores indianos: o professor Pattnaik participou da elaboração do método descrito no item 2.4.2 (MARWAH et al., 1984).

3. PROCEDIMENTOS ADOTADOS NOS ESTADOS UNIDOS E CANADÁ

Em 1994 um grande levantamento dos padrões de avaliação de linhas de ônibus foi feito nos Estados Unidos. A síntese desse levantamento, que faz parte do *Transit Cooperative Research Program – TCRP Synthesis Project*, foi publicado pelo *Transportation Research Board – TRB* (1995), órgão do Departamento de Transportes (equivalente ao Ministério dos Transportes) dos Estados Unidos, e se dirige a técnicos de órgãos gestores de transportes urbanos.

As sínteses publicadas pelo TCRP/TRB são informações relevantes na área de TPU, reunidas em documentos concisos que relatam um problema específico. Por isso, freqüentemente as discussões sobre os temas abordados deixam de ter a abrangência que se poderia esperar de um órgão federal de transportes de país desenvolvido. Porém, o objetivo de se publicar essas sínteses parece ser mais uma divulgação de procedimentos práticos adotados por diversos órgãos municipais e estaduais, em vez de estudo criterioso da situação encontrada.

3.1. O Levantamento Norte-Americano

Nesse estudo específico, o objetivo foi identificar os padrões adotados atualmente, fazendo uma compilação da prática cotidiana do maior número possível de órgãos gestores de transporte da América do Norte (à exceção do México). Foram enviados questionários com respostas de múltipla escolha para 297 agências de transporte público urbano dos EUA e do Canadá, sendo que 111 (cerca de 37%) foram respondidos e aceitos como válidos para o processamento das informações coletadas. Foram questionados quais desses critérios eram considerados no processo

de avaliação e planejamento de linhas de ônibus urbanos, qual o conjunto de dados normalmente coletado para a avaliação e a frequência de coleta, entre outras.

O apêndice D do levantamento do TRB traz a lista das agências que responderam ao questionário, indicando quais delas adotam formalmente padrões para avaliação de rotas. Dadas as 5 classes de frota do sistema (até 50, 51 a 200, 201 a 500, 501 a 1.000 e mais de 1.000 ônibus), tem-se a distribuição de respostas apresentada na Figura 2.

FIGURA 2 - Porcentagem de adoção de padrões pelas empresas norte-americanas e canadenses

(onde **Classe 1** = mais de 1.000 veículos e **Classe 5** = até 50 veículos)

Foram considerados 44 parâmetros de planejamento e/ou operacionais, sendo que destes 15 tratavam dos padrões de planejamento de itinerários. Dos 15, cinco foram considerados “básicos” ou primários, e os outros dez, secundários. Os índices de uso formal de padrões, segundo a classe das agências, são os constantes na tabela 6, que é um resumo do Apêndice “D” do documento do TRB (1995).

Resolveu-se analisar somente os critérios relacionados com o planejamento do traçado das linhas, ao todo em 15, pois pretende-se compará-los com os critérios adotados no Brasil. Parte do formulário enviado pelo TRB foi transcrita no Apêndice II. Das 90 questões contidas nos formulário, selecionou-se as de número 32 a 43,

contidas nas seções “Processo de Adoção de Padrões (linhas básicas)” e “Padrões de Projeto de Rotas”, que são as mais interessantes para o tema de estudo.

Os itens 3.1.1 e 3.1.2 consistem simplesmente nas traduções resumidas do texto original *Synthesis of Transit Practice 10* (TRB, 1995). Os comentários sobre as conclusões desse estudo e os critérios considerados estão localizados na Seção seguinte (3.2). Nessa Seção, há inclusive uma análise das respostas que não consta em nenhuma parte do texto supra citado, já que o mesmo tem caráter mais informativo do que científico.

Resolveu-se fazer essa adaptação do texto do TRB e em separado da análise por três motivos principais: a) mantém-se inalterada a interpretação original do *Transportation Research Board* a respeito dos critérios considerados e das respostas obtidas; b) a própria adaptação em si é um estímulo aos técnicos brasileiros para se familiarizarem com textos normativos estrangeiros, pois ainda nota-se uma certa resistência e/ou dificuldade em parte do quadro de especialistas em transporte atuantes no Brasil de se ler em inglês e c) fazendo a nova análise em um item distinto facilita-se a separação do que foi concluído pelo estudo original do TRB das observações feitas sobre o mesmo no presente trabalho de mestrado.

3.1.1 Critérios Primários

3.1.1.1 Densidade populacional

Quase 74% das agências usam esse critério. Segundo o TRB, o fator que melhor representa o potencial de geração de viagens, na produção de viagens (ponto de origem) é a densidade populacional. Os dados foram obtidos do Censo, e foram enriquecidos com dados locais. Densidade populacional é o mais elementar dos fatores, pois revela quantas são e onde vivem as pessoas. Dado que o propósito fundamental de transporte de massa é levar os passageiros, em volume, deve-se “levar o ônibus onde as pessoas estão”.

3.1.1.2 Densidade de empregos

Número de empregos por milha quadrada. Cerca de 66% usam esse critério, que é considerado importante porque cerca de metade do carregamento nos ônibus urbanos dos EUA se dá por motivo trabalho. A fonte principal de informação para

este critério é a versão “zona de análise de tráfego” (TAZ) do banco de dados *Census Transportation Planning Package* (CTPP). Entretanto, como reduz-se o nível de segregação a somente em termos de TAZs, e não a um nível mais desagregado, que normalmente não é o bastante para o planejamento detalhado de rotas, os planejadores normalmente recorrem às organizações de planejamento metropolitano (MPO) ou a bancos de dados regionais.

3.1.1.3 *Espaçamento entre linhas (cobertura espacial)*

É o espaçamento entre corredores ou linhas de ônibus, geograficamente distribuídos dentro da área de cobertura. O critério de cobertura das rotas guia o espaçamento entre linhas de ônibus, distribuindo-as geograficamente dentro da área de serviço. Isso é feito para maximizar a acessibilidade dos usuários ao serviço de transporte público, dentro das limitações econômicas. Uso deste critério foi informado por 66 % (73 agências). Desses 73 sistemas, 81 % (59) têm padrões formais de serviço. Comparando-se com o estudo de 1984, quando 65 % (60 de 109 sistemas) usavam esse critério, e 43 % (28) tinham padrões formais de serviço, nota-se que mais agências passaram a adotar este critério no planejamento de rotas.

Este é um dos poucos critérios que podem ser comparados diretamente entre os dois estudos. O fato de a porcentagem de sistemas que utilizam padrões formais ter dobrado indica a importância do critério. Em 1984, algumas agências requeriam às operadoras que o espaçamento entre as linhas de ônibus fossem mantidas entre 805 m e 3,22 km. O espaçamento depende de fatores como a densidade de população na área, a proximidade do CBD (área central, ou Zona Central de Negócios – ZCN), e os tipos de serviços de ônibus em operação (por exemplo, malha do tipo grade contra linhas alimentadoras). O menor espaçamento (805 m) normalmente são requeridos em áreas com densidade alta e próximas à área central, enquanto os espaçamentos maiores (acima de 1,61 km) são geralmente reservados para serviços de viagens pendulares ou serviços expressos que servem áreas rurais ou suburbanas densamente povoadas. Estabelecendo distâncias ideais entre rotas de ônibus, as agências de transportes tentam assegurar que as rotas não se sobreponham e sejam bem distribuídos na área de jurisdição.

3.1.1.4 Limitação quanto ao número de desvios e “braços” (ramais)

Refere-se à existência de ramais derivados do ramal principal de uma determinada linha de ônibus, e não às ruas por onde a rota de ônibus principal passa. Este critério independe da “direitura” (em relação às vias) da rota principal, pois trata-se de ramais que se desligam do ramal principal para atendimento em áreas específicas. 31% das agências usam esse critério, mas há uma certa confusão no que concerne ao significado exato dessa medida na pesquisa, podendo ser confundido com “direitura” de rota. Comparando-se com o percentagem encontrada em 1984 (43%), há uma redução significativa no seu uso. Porém, devido a essa confusão, a ser discutida no critério de “direitura” de rota (ver no sub-item 3.1.2.5), as porcentagens não são diretamente comparáveis.

3.1.1.5 Distribuição (geográfica) espacial homogênea pela área atendida

Rotas de ônibus operam em jurisdições ou outras subdivisões políticas, porém alguns sistemas de transporte público são operados com base na geografia das contribuições fiscais.

É o menos usado dos cinco critérios básicos e reflete mais a política local de transportes do que a prática do planejamento. Apenas 14% (16 agências) usam esse critério, e são aqueles que possuem níveis tarifários diferenciados por região da cidade, não refletindo assim no nível de serviço oferecido. É comum requerer-se ao operador privado que mantenha uma linha sem viabilidade financeira, em áreas de baixa demanda, para preservar sua participação em rotas lucrativas. Nenhuma operadora pública informou o uso de tais operações em seus comentários.

3.1.2 Critérios Secundários

Embora importantes, os 10 critérios secundários foram considerados como pertencentes ao nível de refinamento dentre os padrões de roteirização. Os primeiros quatro foram tratados no questionário como elementos de projeto, juntamente com a opção “servir áreas não cobertas” (que é um objetivo, mas não constitui um critério em si). O “critério” mais frequentemente observado foi justamente “servir áreas não cobertas” (49 %). Depois desse, foram selecionados, nesta ordem: considerações sobre projeto de rede, não sobreposição de rotas, conectividade da rede, equidade do

serviço ofertado e “direitura” de rota. A maioria dos sistemas adota dois ou mais desses critérios.

3.1.2.1 Considerações sobre projeto de rede

Este critério se refere à relação entre uma linha nova e as linhas existentes no sistema. A preferência por esse critério foi informada por 18% (20 agências). Este critério é semelhante à conectividade da rede, mas enfoca o projeto da nova rota em relação às outras rotas da rede e como o passageiro usará a rota em si em relação às outras. A conectividade da rede, que é discutida no sub-item 3.1.2.3, enfoca a rede como um todo. Tipicamente, as considerações de projeto de rede incluem aspectos como a melhoria no tempo gasto em transferências programadas, ou o uso de baias adjacentes em terminais para rotas que tenha o mesmo destino, de modo que os usuários possam embarcar no primeiro ônibus que parte.

3.1.2.2 Não sobreposição de rotas

Este critério se refere a uma situação onde duas ou mais linhas distintas, que servem ao(s) mesmo(s) mercado(s) de passageiros, fiquem próximas ou sobrepostas. Serve para assegurar que a oferta seja geograficamente bem distribuída pela área servida. Assegurando a não sobreposição, pode-se distribuir as linhas de forma mais dispersa pela jurisdição da agência. Este critério foi considerado o primário por apenas 14 % dos que responderam. Porém, para o sistemas maiores, esta foi uma preocupação ainda mais significativa, com mais que 30 % afirmando ser esse o elemento de projeto mais importante. No levantamento de 1984, também 30 % das agências informaram o uso desse critério para controlar a duplicação de linhas em suas redes (sem nenhuma outra medida de roteirização).

Os dados coletados para avaliar esse critério são obtidos por meio de análises dos mapas das rotas ou do sistema, e vários cálculos de quilometragem e comparações. Uma rota não pode fazer o trabalho de duas: uma deve ter seu mercado limitado ao entorno do eixo principal da área atendida, operando na via arterial a uma taxa relativamente alta de velocidade; enquanto outras podem estar servindo a uma função de bairro, mais localizada. Talvez não se reduza custos fazendo a combinação dos dois tipos de rotas, por causa da redução das velocidades operacionais e interferência entre demandas nos pontos de máximo carregamento. Isso pode incorrer

em descontentamento dos usuários regulares que vêm a sua viagem mais lenta ou o ponto de ônibus deslocado.

3.1.2.3 *Conectividade da rede*

Este critério se refere à relação física entre uma linha nova e o sistema de rotas existente. Quando uma rota nova está sendo introduzida em um sistema, sua relação com a rede deve ser considerada como um todo. Este critério foi selecionado como um elemento primário de projeto por 9 % (10) das agências (uniformemente distribuídos de acordo com o tamanho do sistema).

A conectividade, embora seja semelhante às “considerações sobre projeto de rede”, enfoca a relação da rota para com o sistema como um todo e não especificamente para qualquer outra rota individual ou grupo de rotas. “A soma do todo por ser maior que as partes”, o que significa, por exemplo, uma rota que está sendo projetada para conectar outras duas, formando assim uma única linha, provê ao usuário uma viagem única, ao contrário de três distintas. Um outro exemplo seria a fusão de duas linhas que têm performance baixa em uma rota mais forte, melhorando-se a eficiência, e fortalecendo o sistema como um todo.

3.1.2.4 *Eqüidade do serviço ofertado*

Eqüidade de serviço pode significar muitas coisas. Para alguns, é estar em conformidade com o Título VI do Código de Direito Civil norte-americano, que provê distribuição eqüitativa de recursos de transporte público. Para outros é simplesmente a distribuição da oferta ou o uso do critério que se baseia na localização da população. A eqüidade de serviço não foi definida no questionário do levantamento do TRB, pois permanecendo deliberadamente indefinida as agências poderiam fazer um comentário sobre o assunto se assim desejassem. Menos que cinco agências informaram que esse critério era um elemento primário de projeto, e nenhuma delas comentou sobre sua própria definição de “eqüidade”.

Os próximos quatro critérios secundários são considerados como elementos táticos de projeto. Solicitou-se às agências que selecionassem um dentre os quatro, embora muitos usem mais de um critério.

3.1.2.5 “Direitura”⁴⁸ de Rota

Para sistemas de TPU que usam esse critério, uma quantificação matemática é usada para medir o desvio de uma rota de um caminho linear de uma ou mais das seguintes maneiras:

- tempo de viagem adicional para uma viagem de ônibus num sentido;
- tempo de viagem adicional requerido em relação ao tempo de viagem gasto pelo modo automóvel na mesma viagem;
- limitações de quilometragem que permitem um número máximo de desvios por rota;
- limite do aumento médio dos tempos de viagem por passageiro;
- limite absoluto para o número total de desvios;
- o(s) desvio(s) não deve(m) abaixar a produtividade média da rota ou o desvio deve ter uma taxa de produtividade mais alta do que a da linha como um todo.

Este critério foi selecionado por 41 % (45) das agências como tática primária de projeto. No estudo de 1984, foram 43 %.

Esse critério foi discutido no decurso do estudo de 1984. Os padrões adotados pelas agências foram informados dando-se vários limites ou condições de roteirização de ônibus para controlar até que ponto os ônibus operando em serviços regulares sobre ruas arteriais principais possam servir a bolsões residenciais ou centros de atividade. São empregados vários tipos de controles ou limitações em padrões de projeto para avaliar esse critério. São eles:

- alguns padrões limitam os desvios de rota a um máximo (5 ou 8 min) de tempo de viagem adicional por sentido de viagem;
- outros padrões limitam os desvios requerendo que as distâncias de viagem por TPU não excedam as distâncias de viagem por automóvel em mais de 20 ou 40 % para a mesma viagem;
- limites de quilometragem são usados por outras agências, que permitem um máximo de 1,61 km de desvio por rota;

⁴⁸ Do inglês *directness*, alguns autores traduzem como “direitividade”. Ambas traduções não foram encontradas em dicionários da língua portuguesa.

- outros padrões limitam os aumentos nos tempos médios de viagem por passageiro a um máximo de 10 a 25 % como resultado de quaisquer desvios ao longo da linha;
- o desvio de rota também é controlado limitando-se os tempos de viagem por TPU a um máximo de duas vezes o tempo de viagem por automóvel para a mesma viagem, independentemente do número de divergências existentes;
- alguns padrões limitam a dois o número de divergências permitidas por linha;
- alguns padrões requerem que os desvios de rota não abaijem a produtividade média da linha ou que o(s) desvio(s) tenha(m) uma taxa de produtividade mais alta que a da linha como um todo.

É importante notar que vários sistemas menores têm padrões que até encorajam desvios de rota consideráveis ou permitem a elas servirem a centros de atividade ou corrigirem deficiências de cobertura existentes na rede de TPU.

3.1.2.6 *Proximidade das residências*

Não há nenhuma definição matemática para esse critério. A “proximidade” é definida pelas próprias agências. O objetivo é chegar tão próximo quanto possível à residência de um usuário sem atrasos desnecessários ou obrigando outros usuários a voltas grandes. (Em alguns casos, esse critério pode ser visto como um cruzamento entre “direitura” de rota e espaçamento dos pontos de parada). Ao se projetar um segmento da rota numa área residencial, o uso desse critério representa um desafio de mercado que inclui fatores como densidade populacional, identificação de mercado (por exemplo, renda e disponibilidade de automóvel aos usuários potenciais, seus destinos), e a possibilidade de o veículo trafegar pelas ruas (freqüentemente, vias locais, até mesmo em bairros de densidade alta, têm geometrias que não permitem usar veículos do tipo Padron, ou mesmo ônibus convencionais). Para a questão “esse critério é uma tática primária de projeto?”, 17 % (19 agências) responderam afirmativamente.

3.1.2.7 *Proximidade a pólos geradores*

Também não há nenhuma definição matemática para esse critério. Como no critério anterior, “proximidade” depende da definição dada por cada agência. O objetivo é chegar tão próximo quanto possível do destino (com motivo diferente de

retorno à residência) de um usuário, sem atrasos desnecessários ou penalizar outros usuários. O principal fator a ser considerado é densidade de emprego, embora a identificação de mercado e a operação de veículo também devam ser levados em conta. A escolha das vias “por onde vai passar” os ônibus também é um assunto para áreas não residenciais, pois as vias suburbanas normalmente têm geometrias que não permitem o tráfego de veículos grandes. À questão do levantamento que pergunta se esse critério constitui uma tática primária de projeto, 16 % (18 agências) responderam afirmativamente.

3.1.2.8 Limitação do número de transferências

Esse critério procura limitar o número de usuários que precisarão de baldeações, uma consideração importante no projeto ou revisão de uma linha de ônibus. Uma área poderia ser servida por uma linha alimentadora onde virtualmente todos usuários terão que ser transferidos para outra linha, a fim de completar a viagem, ou a própria linha poderia ser projetada para operar a viagem completa, por exemplo para a área central, e a necessidade de transferências seria poupada para muitos. Apenas 7 % (8) declararam que a limitação quanto ao número de transferências é uma tática primária de projeto. Sete das oito agências que assim relataram gerenciam sistemas pequenos. Dado que a transferência é uma ferramenta que o planejador precisa usar, é sensato pensar que não é surpreendente que a resistência às transferências seja o critério tático que menos apareceu como “primário”. Mesmo sendo uma tática de projeto importante, claramente é considerada secundária para a maioria dos sistemas.

Os últimos dois critérios tratam de um assunto tão fundamental quanto o ônibus em si – o ponto de parada. Dois assuntos de projeto para pontos de ônibus são a localização, ou colocação de um ponto, e o espaçamento entre paradas.

3.1.2.9 Localização dos pontos de parada

O local escolhido para a construção de um ponto de ônibus refere-se à localização no quarteirão (quadra) que o receberá. Pode ser logo antes de uma interseção (chamado *near-side*), logo após a interseção (*far-side*), ou no meio do quarteirão (*mid-block*). Por se tratar de um critério de nível operacional local, não interessa ao objetivo dessa pesquisa de mestrado.

3.1.2.10 Espaçamento dos pontos de parada

O espaçamento dos pontos de parada é a distância entre os pontos de embarque e desembarque (PED) adjacentes de uma mesma linha. Algumas referências sobre esse assunto podem ser encontradas no Capítulo anterior, porém não serão tratado por também não fazer parte do objetivo da pesquisa.

3.2. Análise do Levantamento Norte-Americano

A análise das respostas e conclusões obtidas pelo levantamento do TRB (1995) será feita com base nas considerações feitas pelas agências gestoras de grandes sistemas, ou seja, as de Classe 1 (acima de 1.000 ônibus).

3.2.1 Análise das Respostas Obtidas pelo TRB

Para se ter uma idéia geral do que foi respondido por todas as agências, e também para efeito de registro nesta Dissertação, apresenta-se a seguir uma tabela que resume o índice de respostas para cada questão relativa aos padrões usados em projeto de itinerários. À tabela original foram acrescentadas as percentagens parciais, úteis à análise, e a ponderação sobre o total relativo de cada critério (explicada a seguir). Apesar dos dois últimos critérios listados não fazerem parte da discussão, resolveu-se mantê-los para se ter uma idéia da importância dada a eles pelos órgãos estrangeiros.

Na primeira coluna referente a cada Classe de tamanho do sistema (frota de ônibus) aparecem o número absoluto de agências que adotam o critério correspondente. A segunda coluna informa as percentagens que essas agências representam em relação ao número total de agências da mesma classe, no âmbito das que responderam ao questionário. Esse número de agências consta na parte inferior da tabela, que traz a distribuição dos 111 órgãos que responderam ao questionário de acordo com a Classe a que pertence.

Uso do Critério por Tamanho do Sistema (frota de ônibus)													
Critério	até 50		51 a 200		201 a 500		501 a 1000		+ de 1000		total	%	% pond.
Densidade populacional	29	69%	25	74%	13	81%	6	67%	9	90%	82	74%	80%
Densidade de empregos	25	60%	22	65%	13	81%	5	56%	8	80%	73	66%	72%
Espaçamento entre outras linhas de ônibus e corredores	25	60%	23	68%	11	69%	7	78%	7	70%	73	66%	71%
Limitações quanto ao número de desvios ou "braços"	9	21%	12	35%	5	31%	5	56%	4	40%	35	32%	41%
Cobertura geográfica equitativa por toda a área tarifária base	7	17%	4	12%	2	13%	1	11%	2	20%	16	14%	15%
Considerações quanto ao Projeto da Rede	6	14%	9	26%	2	13%	1	11%	2	20%	20	18%	17%
Não sobreposição de rotas	5	12%	4	12%	1	6%	3	33%	3	30%	16	14%	23%
Conectividade da rede	2	5%	3	9%	1	6%	1	11%	3	30%	10	9%	17%
Eqüidade do serviço prestado	3	7%	0		1	6%	0		0		4	4%	1%
"Direitura" de Rota	12	29%	15	44%	8	50%	3	33%	7	70%	45	41%	52%
Proximidade das residências	8	19%	6	18%	4	25%	1	11%	0	0%	19	17%	11%
Proximidade a pólos geradores	5	12%	7	21%	1	6%	3	33%	2	20%	18	16%	20%
Limitação do número de transferências	4	10%	3	9%	0		0		1	10%	8	7%	6%
Localização dos pontos de parada	33	79%	30	88%	14	88%	9	100%	10	100%	96	86%	95%
Espaçamento dos pontos de parada	34	81%	31	91%	14	88%	9	100%	10	100%	98	88%	96%
Numero de empresas em cada Categoria de Sistema	42	51%	34	41%	16	20%	9	11%	10	12%	111	100%	

TABELA 6 Critérios dos Padrões para Projeto de Rotas, Selecionados por Tamanho do Sistema

FONTE: TRB (1995), modificado

Foi feita uma ponderação segundo a frota de cada Classe de empresa consultada. Como não foi fornecida no relatório do TRB (1995), a média do número de veículos para cada categoria teve de ser arbitrada para efeito de definição de pesos. Para se determinar o peso da Classe 1, usou-se regressão linear, que apresentou os resultados contidos na Tabela 7.

TABELA 7 Pesos para ponderação das respostas por tamanho da frota

	Classe 5	Classe 4	Classe 3	Classe 2	Classe 1
pesos	1	5	14	30	45

Observando-se os totais na última coluna da tabela do TRB, nota-se que algumas porcentagens praticamente não se alteraram ao se aplicar a ponderação (ver porcentagens relativas ao 4º. critério primário e aos 1º. e 8º. secundários). Isso quer dizer que as respostas estavam distribuídas uniformemente entre as classes, não se podendo afirmar sobre tendências de uso de um critério ou outro de acordo com o tamanho do sistema.

Já aqueles critérios que tiveram sua participação diminuída após a ponderação, equidade do serviço e proximidade de residências, indicam que eles são mais utilizados por sistemas menores.

Como já explicitado, os índices que mais interessam para este item da Dissertação são os mais valorizados e/ou usados em sistemas grandes, do que os de sistemas médios ou pequenos. Isto porque pretende-se comparar o levantamento do TRB com o Estado da Prática da Roteirização de Ônibus: Levantamento Brasileiro – EPROLB, e para tal será necessário fazer a equiparação das técnicas e padrões normalmente adotados por órgãos gestores de grandes sistemas de transporte.

O aumento do índice de resposta após a ponderação indica que os sistemas grandes os adotam com maior frequência que os sistemas menores. Assim, a esses critérios, que tiveram a participação (índice) aumentada com a aplicação dos pesos, é auferida uma maior importância. As causas prováveis dessa constatação são detalhadas a seguir, para cada critério, analisado em grupo ou individualmente. Ressalta-se que as assertivas abaixo refletem a opinião do autor desta Dissertação sobre as conclusões do TRB, explicitadas no item anterior (3.3.2), e por isso são divergentes em alguns casos:

BÁSICOS

- densidade populacional e densidade de emprego – ambos critérios estão relacionados com a localização da demanda, seja em seu ponto de origem

(residências) ou nos pontos de destino com motivo trabalho (atividades profissionais, comerciais, ou mesmo de estudo são consideradas como motivação trabalho). Entende-se que nas redes complexas, é necessário saber exatamente onde está a demanda, para que o atendimento seja otimizado. A adoção desses dois critérios de densidade pelas agências de Classe 1 foi de 90 % e 80 %, respectivamente. O aumento da participação de ambos os critérios no total geral foi de 6 %, após a ponderação;

- espaçamento entre linhas – trata-se da cobertura espacial, ou seja, a distribuição uniforme da oferta nas áreas atendidas. Está relacionado com a distância máxima de caminhada adotada em projeto. Como as extensões das linhas de ônibus de sistemas grandes é naturalmente bem superior às de sistemas médios e pequenos, esse critério é mais considerado pelos grandes órgãos de transporte público, pois cada acréscimo na distância percorrida pelos veículos tem um reflexo significativo no custo total do sistema;
- limitação do número de braços – uma tradução mais adequada desse critério talvez fosse a “limitação do número de ramais”, e também é um critério a ser adotado essencialmente pelas grandes redes, que muitas vezes têm derivações da linha principal nas “pontas” dos bairros, para melhor cobertura. 70 % dessas redes consideram como primário esse critério, um índice próximo ao dos demais tamanhos de sistemas;

SECUNDÁRIOS

- não sobreposição de rotas – trata-se da não interferência da demanda de uma linha sobre a outra, ou melhor, a disputa improdutiva de demanda por duas linhas distintas. Essa preocupação torna-se mais evidente nos sistemas maiores por serem caracterizados por altas densidades populacionais, o que dificulta a definição e a separação dos mercados entre as linhas que atendem uma mesma região. Cerca de 30 % dos sistemas que possuem frota acima de 500 veículos (classes 1 e 2) consideram esse critério. Nas demais classes, o índice é bem inferior;
- conectividade da rede – é a relação de uma linha de ônibus específica com todas as outras linhas das diferentes modalidades que compõem a rede de TPU. Mas, ao contrário do que afirma o relatório do TRB, de que esse critério está

uniformemente distribuído de acordo com o tamanho do sistema, nota-se que há um aumento de sua participação no total geral após a ponderação. Explica-se isso pelo simples fato de 30 % das agências de Classe 1 adotarem-no, enquanto que em todas as outras classes a adoção não passa de 11 %. A causa provável para tal está também na complexidade de interação entre os modos e as linhas, considerando-se terminais de integração, pontos de parada comuns entre a linha considerada e as demais, etc. Essa complexidade normalmente não está presente em cidades pequenas e médias, sendo uma característica apenas dos grandes centros urbanos;

- “direitura” de rota – como detalhado no sub-item 3.3.2.5, a “direitura” de rota refere-se aos desvios que uma linha tronco (ramal principal) faz para atender a demanda. Normalmente esses desvios (por exemplo a linha sai de um bairro distante, faz um atendimento em um bairro que está fora do seu eixo principal de tráfego, e depois retorna a esse eixo para seguir para o centro) são inaceitáveis pelos usuários que sofrem a penalização, notadamente os moradores de periferias das regiões metropolitanas. Porém, como salientaram os técnicos do TRB, “vários sistemas menores têm padrões que até encorajam desvios de rota”, o que explica a consideração menor desse critério pelas classes 2 a 5 (em torno de 39 % em número absoluto de agências e participação total de 25 % na média ponderada, enquanto na Classe 1 foi de 70 %). De qualquer maneira, é um critério bastante importante, e isso pode ser notado simplesmente pelo alto índice de adoção por todas as classes;
- proximidade dos pólos geradores – o destaque para a adoção desse critério está no índice encontrado para a Classe 2, de 33 %, que foi bem superior aos demais e por isso contribuiu para o aumento da sua participação após a ponderação por tamanho da frota. Esse resultado pode indicar que em sistemas médios a localização de grandes pólos de produção e atração de viagens é mais determinante na escolha de uma rota do que em sistemas maiores ou do que nos menores. Pode-se imaginar os seguintes motivos prováveis: uma grande fábrica certamente possui pelo menos uma linha para seu atendimento, da mesma forma shopping centers, universidades, etc. No caso de sistemas médios, provavelmente essa linha seja suficiente para atender a sua demanda cativa, enquanto que em

sistemas grandes talvez duas ou mais linhas já passem próximo ao pólo gerador, de modo a promover sua ligação com um número maior de origens. Ou seja, a importância relativa desse critério torna-se maior devido a singularidade do atendimento em sistemas médios. Já a justificativa pela baixa adoção em pequenas cidades pode estar na própria simplicidade de sua rede, que certamente já atende aos pólos geradores existentes, e aos novos (como construção de um centro comercial, por exemplo);

- localização e espaçamento dos PEDs – esses dois últimos critérios foram sem dúvida os apontados, pelas agências, como os de maior relevância dentre todos os 15 critérios do TRB relativos ao planejamento de itinerários. Foram os critérios mais ressaltados, por todas as classes de órgãos de transporte, até mesmo mais relevantes que os 5 critérios básicos. E o índice de resposta relativo a esses critérios de ponto de parada foi crescendo de acordo com o aumento da frota do sistema em questão.

Esses dois últimos critérios representam bem o objetivo do levantamento do TRB: levantar os procedimentos operacionais usados no planejamento de linhas de ônibus. Assim, deve-se tomar cuidado ao se analisar as conclusões desse estudo, pois não se está levantando os procedimentos de planejamento dos sistemas a longo prazo, e sim nas técnicas consideradas no cotidiano.

3.2.2 Análise das Conclusões do TRB

3.2.2.1 Uso crescente de padrões

Comparando-se os dois estudos feitos pelo TRB sobre o mesmo tema, constata-se que um número crescente de gestores de transportes, particularmente os de sistemas maiores, está adotando padrões de avaliações das rotas. Em 1984, foram estudados ao todo 15 critérios, e em 1994 o número aumentou para 44. Com a ampliação do número de critérios que possivelmente são usados pelas agências, percebe-se que elas estão usando mais e mais ferramentas de avaliação para prover às próprias agências e ao público um melhor entendimento dos campos nos quais podem ser aplicados os recursos destinados ao TPU. A decisão sobre a destinação de

verbas nos orçamentos públicos, prática muito comum nos países desenvolvidos, pode assim ser consubstanciada por informações concretas e de fácil entendimento.

À medida que se conhece mais sobre as características operacionais das linhas, pode-se avaliar de forma criteriosa o nível de serviço ofertado, adequando-o à realidade local. Pode-se não só melhorar a qualidade dos serviços que se encontram abaixo do nível mínimo, mas também aumentar a oferta das linhas que apresentam alta produtividade e por isso podem trazer uma rentabilidade maior.

Uma conclusão encontrada pelo TRB: “os padrões de avaliação de linhas de ônibus são evolutivos”. Quanto mais os órgãos aplicam os critérios, mais eles entendem sobre a aplicação individual de cada um deles; o aumento no número de critérios de avaliação, em 10 anos, reflete esse melhor entendimento. Um critério adotado em 1984 poderia então transformar-se em dois ou três critérios distintos, como aconteceu em alguns padrões usados para determinação de quadros horários.

Para o caso brasileiro, espera-se que o mesmo aconteça. À medida que os órgãos gestores nacionais passem a utilizar cada vez mais padrões formais de controle operacional, maior compreensão se obterá sobre eles, e o próprio histórico que será formado provavelmente constituirá uma fonte de informações valiosas. O problema de se implantar as avaliações periódicas sempre recai na falta de recursos financeiros, porém nota-se uma tendência de melhoria na questão da auto gestão e auto financiamento de algumas agências municipais.

Com a municipalização do trânsito, alguns órgãos antigamente ligados às prefeituras transformaram-se em empresas públicas, ou de economia mista. Com a detenção de parte da arrecadação de taxas de licenciamento, infrações de trânsito, entre outros, em breve essas empresas poderão atingir um nível de independência financeira que lhes permita investir mais em controle, planejamento, sinalização e fiscalização modernizadas, etc.

Somente nas maiores cidades brasileiras pode ser visto algum esforço de planejamento a longo prazo e obtenção de recursos suficientes para a execução dentro do cronograma. Curitiba é realmente o melhor exemplo nacional, como citado no item 4.1.2, não só em termos de planejamento a longo prazo, mas também de controle operacional efetivo, regular e eficiente.

Já nas cidades médias e pequenas, mesmo as localizadas em regiões ricas do Estado mais desenvolvido do país, a situação é bem diferente. Um exemplo de cidade média brasileira desenvolvida pode ser São Carlos – SP, que possui 175.517 habitantes (IBGE, 1996). Há somente uma operadora, a Viação Renascença Ltda, detentora de uma frota total de 105 ônibus. Segundo o Eng^o. Maurício Olbrick (RODRIGUES, 1999)⁴⁹, responsável pelo Planejamento e Controle das linhas desta empresa, não existe uma política definida de verificação do carregamento ou desejos de viagem. A última pesquisa Sobe/Desce, por exemplo, realizada foi há aproximadamente 5 (cinco) anos e não há previsão de quando será feita a próxima.

Algumas melhorias nesse sentido já são notáveis em alguns sistemas brasileiros, como o caso do Corredor São Mateus – Jabaquara. A concessionária Metra - Sistema Metropolitano de Transportes Ltda., operadora do serviço do corredor de trolebus “ABD”, na Região Metropolitana de São Paulo, repassa ao órgão gestor estadual, a Empresa Metropolitana de Transporte Urbano de São Paulo – EMTU/SP, 15% da receita tarifária mensal para cobrir os custos de manutenção dos terminais e de fiscalização da concessão. Além disso, um percentual de desconto na tarifa, definido quando da concorrência (esse percentual foi o definidor da licitação), é repassado mensalmente também à EMTU/SP, pela outorga da concessão (MACHADO, 1998). A Metra assumiu ainda a obrigação de dispor, em até 12 meses após a assinatura do contrato, de uma central de operação, com sistema de controle e monitoramento capacitado a aferir o cumprimento da programação. A central de operação deverá estar permanentemente interligada com a Central de Controle Operacional da EMTU/SP. Ou seja, haverá um ganho em termos de controle *on line*, além da arrecadação gerada para cobrir os custos da empresa gestora.

3.2.2.2 Tendências apontadas

De acordo com os índices de uso dos critérios encontrados no levantamento norte-americano, a síntese contém em sua conclusão algumas tendências que puderam ser observadas. Notou-se uma valorização de planejamento em nível do itinerário, já que o mesmo influi nos níveis seguintes, de planejamento dos quadros

⁴⁹ RODRIGUES, M. O. (1999) *Comunicação pessoal*. 16/junho.

horários, e conforto do usuário. Os técnicos do TRB enfatizam que a fatia de mercado relativa a uma linha de ônibus só pode crescer se houver uma satisfação do usuário derivada do aumento do nível de serviço oferecido (TRB, 1995).

Entendendo-se essa necessidade de se focar pela perspectiva do usuário, medindo a sua satisfação, pode-se comparar o desempenho de sistemas de transporte distintos. Começa a emergir, então, a adoção de padrões norte-americanos (em nível federativo) de avaliação de linhas que antes só pareciam apropriados para sistemas pertencentes à mesma Classe.

Infelizmente, esse tipo de enfoque ainda é exceção no Brasil, não que os técnicos não se preocupam em atender bem a demanda, mas muitas vezes a própria situação econômica brasileira impede que se ofereça níveis de serviço mais adequados. Assim, pouco adiantaria estabelecer padrões brasileiros, pois para que esses fossem comparados, seria necessário:

- A. que os órgãos gestores brasileiros adotassem padrões formais de avaliação de desempenho de linhas;
- B. que os sistemas fossem otimizados, para que uma eventual melhoria no nível de serviço não implicasse necessariamente em aumento de tarifa.

Essas premissas estão em consonância com toda a discussão desenvolvida nesta Dissertação, e serão comentadas com mais detalhes no Capítulo da Conclusão.

Baseando-se nas medidas dos padrões de avaliação das linhas, poderiam ser conhecidas as circunstâncias em que a implantação de um serviço do tipo *paratransit* (semi-público, podendo ser vans ou kombis, ou mesmo táxis) em um determinado corredor torna-se favorável. Assim, o TRB conclui também que devem ser inclusos, nos próximos levantamentos, padrões de avaliação da conveniência desse modo ao sistema em questão.

O TRB espera que as avaliações sejam feitas com maior frequência, especialmente com dados disponíveis mais prontamente (sistemas *on line*, como o que está sendo implantado em Porto Alegre). Devido ao ganho considerável na confiabilidade do sistema de transporte público, espera-se que continue a tendência de coleta de dados cada vez mais freqüente. Os técnicos estadunidenses prevêm que o uso de tecnologias mais sofisticadas para coleta e processamento de dados da

operação dos transportes tornará as coletas não só mais freqüentes mas também com a relação custo/benefício cada vez mais baixa.

4. A PRÁTICA DA ROTEIRIZAÇÃO NO TPU POR ÔNIBUS NO BRASIL

Como foi visto no Capítulo 2, o projeto da rede de transporte precede todas as demais fases de planejamento das linhas e influencia na eficiência do sistema. Assim, não há como se obter um Sistema eficiente, por mais que se invista em melhorias pontuais na operação, sem que haja uma reflexão sobre a eficácia da rede em si.

Este Capítulo se inicia com comentários breves sobre as redes urbanas de transporte público, e a análise de um levantamento realizado nesta pesquisa de mestrado, denominado Estado da Prática da Roteirização de Ônibus: Levantamento Brasileiro – EPROLB, que teve como objetivo saber-se o Estado da Prática da roteirização no TPU por ônibus.

Na Seção 4.2 detalham-se os procedimentos adotados no Brasil para o projeto de novos itinerários de ônibus, bem como modificações dos existentes. Analisam-se os padrões de procedimentos adotados por algumas das agências brasileiras de gestão de transporte urbano com relação aos procedimentos não padronizados, mas que são usados pela maioria dos técnicos.

No Capítulo 5, são comparados os procedimentos normalmente adotados no país com aqueles adotados nos EUA e Canadá. Isto se torna importante na medida em que pode-se situar o nível tecnológico do Brasil, em termos de planejamento de rotas de ônibus urbanos.

4.1. Roteirização no País

Nesta Seção expõe-se como é tratado o assunto “Roteirização” pelos especialistas brasileiros. Para se caracterizar o nível de uso e conhecimento das

técnicas objetivas de roteirização, recorreu-se a um levantamento que se assemelha em alguns aspectos ao do TRB, mas adaptado às peculiaridades brasileiras.

Relata-se primeiramente uma revisão da bibliografia nacional sobre o estado em que se encontram algumas das grandes redes de TPU brasileiras, bem como alguns projetos que visam suas atualizações. Destaca-se a importância do ônibus no transporte urbano de passageiros, e abordam-se alguns dos estudos que estão sendo realizados para a otimização da oferta de transporte. A seguir, apresenta-se o Estado da Prática da roteirização no país, analisando-se as informações coletadas no levantamento realizado pelo autor desta Dissertação.

4.1.1 Introdução ao Problema Nacional

Trafegando pelas vias principais de algumas das grandes cidades no país durante o período de entre-pico, percebe-se um baixo carregamento em boa parte dos ônibus. Mesmo ao se aproximar do centro da cidade, onde normalmente se concentra de forma mais acentuada a demanda, muitas vezes pode-se verificar veículos circulando com poucos passageiros.

Há, em algumas localidades, a concorrência improdutiva, principalmente nos corredores, o que poderia ser uma das causas dessa “falta” de passageiros. Os altos e baixos no carregamento poderiam indicar ainda que os quadros de horários estão mal dimensionados e que o problema poderia ser facilmente contornado com um estudo de demanda e redimensionamento. Porém, o problema é bem mais complexo do que possa parecer a princípio.

A variação acentuada de demanda que ocorre dos períodos de pico (manhã, almoço e final da tarde) para os períodos de entre-pico e vice-versa é inerente ao transporte urbano de passageiro, que depende dos horários das atividades. Obviamente, a frota necessária ao atendimento é calculada com base na demanda de pico máximo. Porém, quase sempre o nível de serviço oferecido está bem aquém do atendimento com qualidade dita “ideal”, por isso os ônibus ficam lotados nesse período. E, para prover a população com o número de ônibus suficiente para manter a lotação em níveis mais humanos, seriam necessários investimentos que elevariam o custo do sistema, tornando-o inviável tanto financeira quanto economicamente.

Hoje normalmente se calcula a capacidade como sendo a soma dos passageiros sentados com o produto da taxa de 7 pass/m² vezes a área útil do ônibus. Se essa taxa caísse para 5 pass/m², aumentando assim o conforto do usuário, teríamos um acréscimo de frota considerável, cujo custo de aquisição, depreciação, e outros seria repassado à tarifa.

Como o custo fixo do TPU por ônibus é da ordem de 70% do custo total, um aumento na quantidade de material rodante é significativo no aumento do custo total. Já um aumento no custo variável, por atender a cerca de 30% do total, não representa grandes alterações na tarifa. Por esse motivo, freqüentemente os órgãos gestores de transportes urbanos preferem definir um intervalo de atendimento bem inferior ao demandado durante os entre-picos. É uma maneira de se “atrair” o usuário que possui automóvel, e também incentivar os passageiros cativos a viajar mais em horários de menor demanda, quando houver opção para tal (por exemplo, a lazer durante à noite ou nos finais de semana).

Por outro lado, em alguns casos, a constatação da existência de ônibus quase vazios durante o período de vale não é fruto de programação deliberada que visa aumentar o conforto ao usuário. Trata-se da caducidade do sistema como um todo, que necessita ser reformado.

Da mesma forma, mas essa sendo uma constatação causada por motivo mais claro do que a anterior, é a super lotação de algumas linhas, durante o pico. Numa solução local, poder-se-ia alocar mais veículos (?!), ou adotar serviços expressos, ou ainda criar-se uma linha troncal com veículos de maior capacidade, congregando outras linhas que utilizam o mesmo corredor principal. Mas ainda assim o problema não seria solucionado em seu âmago, ou seja, na situação geral da rede de transporte público.

4.1.2 Mudanças nas Redes de Transporte Urbano de Passageiros Brasileiras

Ônibus urbano é o modo mais importante do sistema de transporte de passageiros no Brasil, correspondendo em média a 80% das viagens em transporte coletivo urbano. Nos últimos anos a quantidade de pessoas que demandam transporte por ônibus vem diminuindo continuamente, enquanto os custos operacionais estão

aumentando, colocando em dificuldade a manutenção do equilíbrio financeiro das empresas operadoras (NTU, 1998).

Segundo PEREIRA (1998), houve uma queda na demanda de aproximadamente 9%, durante o período 1995-1997. A redução da velocidade operacional dos veículos, devido aos crescentes congestionamentos urbanos, fez com que a frota tivesse que aumentar para manter a mesma oferta de transporte.

Motivado por esses problemas, e também considerando-se a inadequação de muitas linhas de TPU e conseqüentes reclamações de usuários (ver em SILVA, 1996), algumas redes urbanas de ônibus sofreram completa reorganização. A maneira como foram concebidas as atuais redes está sendo questionada em praticamente todo o país. Como efeito imediato, propostas e projetos de novos sistemas de ônibus foram apresentadas tanto pelas agências⁵⁰ (órgãos) de poder concedente de transporte quanto por empresas operadoras e pesquisadores.

Como exemplos de iniciativas de órgãos públicos pode-se citar os casos de Belo Horizonte, Fortaleza, Goiânia, Manaus e São Paulo. Como iniciativa das próprias empresas operadoras, amparada pelos órgãos municipais, cita-se o caso de Porto Alegre. Por fim, como iniciativa do meio acadêmico, há o estudo feito pela COPPE/UFRJ que está sendo aplicado no Rio de Janeiro e também um trabalho inter-institucional desenvolvido em 1994 pela UFRJ, UFPE, UFRN e UnB, para reestruturação do sistema de TPU do Recife, a pedido do GEIPOT.

Como já foi salientado, em boa parte das cidades o sistema está sendo revisto como um todo, estão sendo levantados dados de demanda, e reestruturações estão acontecendo ou estão para começar em breve. Até mesmo Curitiba, município brasileiro com maior tradição em planejamento de sistemas de transporte coletivo por ônibus, passou recentemente por uma alteração em seu sistema. Em março de 1999 entrou em operação o corredor Circular Sul, para o qual foram construídos mais 14

⁵⁰ Neste texto, os nomes “agência” ou “órgão” (concedente e/ou gestor de transportes urbanos) serão considerados sinônimos, para efeitos práticos. Assim, os órgãos municipais ou estaduais, as autarquias e as empresas públicas estão englobadas nesta nomenclatura.

(quatorze) km de canaletas exclusivas. O novo corredor faz o fechamento entre outros dois corredores de grande porte, o Pinheirinho e Boqueirão (FILLA, 1999⁵¹).

Recentemente, uma página eletrônica foi lançada na Internet, para a discussão e proposição de um novo modelo de relações institucionais entre órgãos gestores e empresas operadoras (ANTP et al., 1999). Para seu subsídio, foi realizado um levantamento da situação atual em algumas redes de transporte urbano do país. Dentre outras, foram analisados os casos das capitais dos Estados de Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Rio de Janeiro.

Em Belo Horizonte, tem-se:

“[...] o BHBUS - Plano de Reestruturação do Sistema de Transporte Coletivo, que se encontra em fase de implantação. Este plano, desenvolvido pela BHTRANS, visa reestruturar o sistema de transporte coletivo, possibilitar uma maior articulação entre as regiões da cidade, diminuir o volume de ônibus nos principais corredores de tráfego e na área central, reduzir o tempo médio de viagem dos usuários, permitir o pagamento de uma tarifa por deslocamento, melhorar os níveis de conforto e segurança para os usuários e diminuir o impacto ambiental produzido pelo sistema de transporte. O BHBUS pretende contribuir ainda para a descentralização e criação de novos pólos regionais.

Este plano prevê um sistema de transporte totalmente integrado, tronco-alimentado, interligado por estações e operando em pistas especiais, com pagamento feito através de bilhetagem automática. O sistema está baseado na linha do trem metropolitano como modo de transporte de alta capacidade e em serviços troncais de média capacidade, nos corredores de maior demanda, alimentados em estações de integração. Está prevista a construção de 16 estações, sendo 5 intermodais (ônibus-metrô), a cargo da CBTU, e 11 intramodais (ônibus-ônibus), das quais uma já se encontra em operação. O BHBUS prevê, ainda, medidas de tratamento preferencial para ônibus em 118 km de vias no município.” (ANTP et al., 1999)

⁵¹ FILLA, L. Comunicação por telefone, em maio/1999.

Boa parte do BHBUS já está implantada, propiciando à capital mineira o conceito de transporte de passageiros nos moldes da tronco-alimentação. Alguns problemas nessa fase inicial são facilmente notados, e devem-se provavelmente às alterações profundas que foram realizadas em período de tempo relativamente curto. Implantou-se pela primeira vez um sistema tronco-alimentado em Belo Horizonte no bairro Barreiro, em 1997, ligando-o ao centro da cidade. No ano seguinte, foi realizada uma grande licitação, por lote de veículos, de todas as linhas municipais. Atualmente, existe um estudo em andamento que visa corrigir os problemas ocasionados tanto por essas mudanças quanto por erros de previsão de demanda, quando do planejamento.

Em Fortaleza há um projeto em andamento que está sendo desenvolvido pela ETTUSA e DET/UFC (por meio da ASTEF), para redimensionamento e reestruturação do sistema de transporte público. Está-se fazendo um grande levantamento de dados de demanda, para adequar a oferta de ônibus e do trem metropolitano (METROFOR), de forma integrada e otimizada.

Goiânia teve seu principal corredor, a avenida Anhangüera, potencializado por meio da retirada do canteiro central e construção de estações com plataforma elevada e cobrança externa aos ônibus. São transportados cerca de 170.000 passageiros/dia nesse corredor, constituindo-se o eixo estruturador do sistema tronco-alimentado. Está em fase de implantação um novo sistema operacional, conjuntamente com a aquisição de frota. A operação será preferencialmente com ônibus articulados de três portas, com embarque e desembarque em nível.

A capital amazonense recebeu recentemente um financiamento do BNDES e do governo do Estado do Amazonas, para completa reestruturação do seu sistema de transporte público. Serão ampliados seus terminais urbanos, e construídos outros 3 (três). Prevê-se o uso de ônibus articulados com ar condicionado operando corredores exclusivos, tanto para serviços expressos quanto para serviços paradores. O projeto básico já foi aprovado, e está sendo aguardada a liberação das verbas para início das obras.

São Paulo está passando por uma grande revisão em seus 4 (quatro) principais sistemas tronco-alimentados. Além da preocupação de atendimento otimizado da

demanda, identificou-se a necessidade de maior interação entre os quatro sistemas, já que eles “se comunicam” somente no centro da cidade, por se tratarem de corredores radiais. Um bom exemplo de integração é o corredor São Mateus – Jabaquara, do qual participa a SPTrans (terminal Jabaquara), e outras empresas (dentre elas o Metrô). Há integração tarifária com o metrô e o trem de subúrbio. Um estudo em andamento para início de atuação em conjunto são os sistemas Rio Bonito e Guarapiranga com o sistema Santo Amaro (CASTRO, 1999⁵²).

Ou seja, cada vez mais o planejamento de linhas está apropriadamente sendo caracterizado como um problema de Análise de Sistemas, devendo-se tratar a rede como um todo, e não isoladamente, linha a linha. O planejamento local deve considerar as especificidades da região em questão, mas também deve contemplar as interações com as outras modalidades e mesmo com outras linhas do mesmo modo de transporte.

A Prefeitura de Porto Alegre elaborou o Novo Modelo Operacional para o sistema de ônibus urbanos, que estabelece a divisão do sistema de transporte por ônibus em bacias operacionais (a operação é dividida em 4 regiões: leste e sudeste, sul, norte/nordeste e “pública”). Além da operação do sistema por bacias, o novo Modelo contempla as seguintes diretrizes (ANTP et al., 1999):

- reduzir as necessidades de deslocamentos;
- ampliar as possibilidades de deslocamento por meio da adoção da integração inter-modal física e tarifária, em especial com o TRENSURB;
- reduzir o tempo médio de viagem dos usuários, através da racionalização das linhas e da adoção da integração físico-tarifária;
- reduzir os custos de investimentos através da otimização da infra-estrutura existente e da criação de novas faixas exclusivas, dando prioridade aos veículos de transporte coletivo no tráfego da cidade;
- reduzir os custos tarifários com a adoção da integração temporal através da implantação da bilhetagem automática;

⁵² CASTRO, H. P. Comunicação por telefone, em maio/1999.

- reduzir os impactos negativos ao meio ambiente através da racionalização das linhas e da redução de viagens à Área Central;
- ampliar o conforto dos usuários através da melhoria dos equipamentos de transportes, em especial os veículos e os pontos de embarque e desembarque.

A operação de TPU por ônibus municipal no Rio de Janeiro é descentralizada e com pouca interferência estatal. “...não existe integração tarifária, mas a integração física é expressiva [...]. A tendência histórica dos serviços de transportes do Rio de Janeiro é a do aumento da utilização do sistema ônibus, pois este foi progressivamente substituindo os outros serviços, como por exemplo o trem de subúrbio, que tradicionalmente atendia as áreas mais distantes. Isto levou a um aumento de extensão das linhas de médio e longo percurso. Um outro fator que também levou ao aumento de quilometragem foi o crescimento da frota, mas com a substituição de ônibus maiores por microônibus. O aumento da oferta se deu também pelo aumento da frequência das linhas, também como perspectiva de combate à concorrência das vans. Há um crescimento ‘natural’ da quilometragem, devido à necessidade de se criar novas linhas ou estender algumas linhas para atender a novos núcleos habitacionais.” (ANTP et al., 1999)

“O modo estruturador do transporte coletivo no município de Rio de Janeiro é o ônibus. A distribuição modal das viagens/dia útil é a seguinte: ônibus - 77,6 %; automóvel - 14,6 %; trem - 4,0 %; metrô - 2,9 % (dados de setembro/96).” (ANTP et al., 1999)

Na capital fluminense, está em andamento o projeto RIOBUS. Trata-se de um plano de reformulação geral dos itinerários, desenvolvido por uma equipe do Programa de Engenharia de Transportes – PET da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação – COPPE/UFRJ. O projeto está em fase preliminar, não sendo possível obter maiores dados sobre quando ele entrará em operação.

Também coordenado pela COPPE/UFRJ, foi desenvolvido um projeto de reestruturação do sistema de TPU do Recife, que não chegou a ser implantado. Algumas considerações decorrentes do projeto, e também outros estudos

aprofundados sobre a regulamentação de transportes coletivos urbanos podem ser encontrados em ORRICO FILHO et al. (1996).

4.1.3 Estado da Prática no País

Este item descreve um levantamento nacional que enfoca os métodos de roteirização e as abordagens habitualmente adotadas no planejamento de novas linhas de ônibus ou mesmo a completa reestruturação do sistema. Nesta Dissertação, qualquer referência a “levantamento nacional”, ou “pesquisa realizada no Brasil” trata-se deste levantamento descrito neste item, denominado “Estado da Prática da Roteirização de Ônibus: Levantamento Brasileiro” – EPROLB.

A fim de se conhecer o estado da prática da roteirização no TPU decidiu-se consultar 14 agências de trânsito governamentais sobre os métodos adotados para estabelecer as rotas de ônibus. Das 14 agências, 12 estão localizadas em capitais com no mínimo 1.000.000 de habitantes. Não se estendeu a consulta a cidades menores porque são os grandes centros que geralmente necessitam de planejamento de transportes mais refinado e dispõem de corpo técnico capacitado para essa tarefa.

No Brasil, pelo menos 40 (quarenta) municípios têm mais de 400.000 habitantes (IBGE, 1996), e provavelmente todas requerem um planejamento criterioso do seu sistema de transporte público. Decidiu-se então fazer uma coleta amostral dirigida, selecionando as 12 (doze) capitais mais populosas (dentro dos limites do município), nesta ordem (IBGE,1996): São Paulo - SP, Rio de Janeiro - RJ, Salvador - BA, Belo Horizonte - MG, Fortaleza - CE, Brasília - DF, Curitiba - PR, Recife - PE, Porto Alegre - RS, Manaus - AM, Belém - PA e Goiânia - GO, bem como as cidades de Campinas - SP e Nova Iguaçu - RJ. Assim, consegue-se representar todas as regiões do país, por meio de pelo menos duas capitais por região. Cada uma das duas regiões mais populosas (Sudeste e Nordeste), está representada por três capitais na amostra.

Já a inclusão de duas cidades interioranas foi motivada pelo fato de possuírem cerca de um milhão de habitantes, se contado o aglomerado urbano de seus limites, o que faz crer que os seus problemas de transporte e tráfego provavelmente são comparáveis aos de Goiânia ou Belém, por exemplo. Acredita-se que selecionando as

capitais e essas duas importantes cidades do interior dos dois Estados mais ricos da Federação, há uma boa chance de se estar conhecendo o estado da prática alcançado pelos municípios brasileiros, em termos de roteirização.

Resolveu-se não contemplar localidades do exterior, pois, para que fosse representativa, a amostra seria de difícil coleta (alto custo, demora na obtenção de respostas, dificuldade na obtenção de endereços postais e/ou eletrônicos, elevado tempo para se esclarecer eventuais dúvidas, etc) e, principalmente, por não ser este o objetivo desta Dissertação. Caso a pesquisa fosse estendida para o exterior, seria uma maneira de se comparar os processos adotados em países desenvolvidos, e também de outros países em desenvolvimento como o Brasil, com os usados no país. Esta comparação foi possível de ser feita somente em relação aos Estados Unidos e Canadá, graças ao levantamento do TRB (1995).

4.1.3.1 O Formulário do EPROLB

O formulário padrão enviado consta de 13 (treze) itens e pode ser visualizado no Apêndice I desta Dissertação, bem como as respostas já digitadas. O formulário pode ser dividido em 4 (quatro) partes: a primeira, contendo o cabeçalho e as 9 (nove) primeiras perguntas é a parte de caracterização básica do órgão, da cidade e de seu sistema de transporte; a segunda é formada pela pergunta número 10 (dez), com seus três sub-itens, os quais foram o cerne do EPROLB (questiona-se os métodos, procedimentos, critérios adotados pelos órgãos no traçado dos itinerários); a terceira parte tem como objetivo conhecer-se o nível de informatização dos órgãos, e inclui as perguntas 11 (onze) e 12 (doze); e, finalmente, a quarta parte é constituída somente de um espaço (item 13) para observações/manifestações espontâneas.

4.1.3.2 Método de Coleta e Número de Respostas Obtidas

Dos 14 (quatorze) formulário enviados, 11 (onze) foram respondidos, enviando todas as informações requeridas no formulário padrão, ou seja, quase 80% dos formulários foram retornados. Este alto índice de respostas se deve principalmente ao método adotado. Primeiramente foram feitas ligações telefônicas, para saber o setor da empresa e os profissionais responsáveis pelo planejamento de itinerários de ônibus. Em seguida, explicou-se diretamente a esses, também por telefone, o tema da pesquisa de mestrado, a finalidade do levantamento e perguntou-

se qual seria a melhor maneira de se enviar o formulário (fax, e-mail ou correio). Finalmente enviava-se o formulário de duas páginas, mais uma carta de apresentação enfatizando a importância da colaboração no levantamento.

Apesar de todo esse esforço, que só foi possível devido ao número reduzido de cidades consultadas, diversos locais não retornaram o formulário preenchido dentro do período de tempo combinado. Nesses casos, novamente foram feitos contatos por telefone ou e-mail para se insistir com os técnicos e chefias para que respondessem às questões formuladas. Mesmo após muita insistência, os municípios do interior (Campinas – SP e Nova Iguaçu – RJ) e a capital federal não responderam.

Porém, a falta desses três não pode ser considerada prejudicial ao EPROLB, pois a amostra obtida representa bem os grandes municípios brasileiros. Fazendo um ranking em termos populacionais, tem-se:

TABELA 8 As doze capitais brasileiras mais populosas

CAPITAIS				
REGIÃO	ESTADO	MUNICÍPIO	TOTAL	CLASSIF.*
Sudeste	SP	São Paulo	9.839.066	1
Sudeste	RJ	Rio de Janeiro	5.551.538	2
Nordeste	BA	Salvador	2.211.539	3
Sudeste	MG	Belo Horizonte	2.091.371	4
Nordeste	CE	Fortaleza	1.965.513	5
Centro-Oeste	DF	Brasília	1.821.946	6
Sul	PR	Curitiba	1.476.253	7
Nordeste	PE	Recife	1.346.045	8
Sul	RS	Porto Alegre	1.288.879	9
Norte	AM	Manaus	1.157.357	10
Norte	PA	Belém	1.144.312	11
Centro-Oeste	GO	Goiânia	1.003.477	12

* Classificação segundo a população

FONTE: (IBGE, 1996)

TABELA 9 Os quatro mais populosos municípios brasileiros do interior**INTERIOR**

REGIÃO	ESTADO	MUNICÍPIO	TOTAL	CLASSIF.*
<i>Sudeste</i>	<i>SP</i>	<i>Guarulhos</i>	<i>972.197</i>	1
<i>Sudeste</i>	<i>SP</i>	<i>Campinas</i>	<i>908.906</i>	2
<i>Sudeste</i>	<i>RJ</i>	<i>São Gonçalo</i>	<i>833.379</i>	3
<i>Sudeste</i>	<i>RJ</i>	<i>Nova Iguaçu</i>	<i>826.188</i>	4

* Classificação segundo a população

FONTE: (IBGE, 1996)

Coincidentemente, os dois municípios do interior que foram contemplados são os segundos mais populosos dos dois estados mais desenvolvidos do país. Não se escolheu os dois mais populosos de cada Estado (Guarulhos – SP e São Gonçalo – RJ) simplesmente porque a facilidade de contato era menor.

4.1.3.3 *Análise das Respostas*

Não há a pretensão de se fazer um trabalho estatístico com os formulários recebidos, de modo que se tenha um “retrato” do país com a amostra coletada, até porque as cidades escolhidas e o tamanho da amostra não são representativos das cidades brasileiras. Fazendo um tratamento estatístico simples com as respostas, pode-se perceber que a extensão média das linhas de ônibus é de 32 km e que existe um ônibus para cada 804 habitantes de cidades grandes.

Ahmedabad possui 2,1 milhões de habitantes, e é a sexta maior metrópole da Índia. Como já foi citado, cerca de 190 linhas servem a cidade, com uma quilometragem média de 8 km e frota de 670 ônibus. A demanda é de 850.000 passageiros/dia. (MARWAH et al, 1984). Esses dados são similares aos encontrados nas grandes cidades brasileiras: grandes aglomerações urbanas, alta demanda pelo modo ônibus, economias em desenvolvimento. Porém, comparando-se esses dados com a média nacional, vê-se que: (a) a quilometragem média das linhas brasileiras é 4 vezes superior à da cidade indiana; (b) a média nacional do índice de habitantes por ônibus no Brasil também está próximo de 4 vezes melhor, pois em Ahmedabad o índice é cerca de 3.000 habitantes/veículo. A média populacional das cidades brasileiras analisadas é de 2,6 milhões de habitantes, superior à população de

Ahmedabad. Porém, pode-se afirmar que os números são proporcionais, mas em escala diferente.

Isso leva a crer que, de um modo geral, no Brasil a dependência pelo ônibus é mais acentuada que na cidade indiana. No Brasil a circulação de coletivos urbanos é mais intensa que no caso indiano e por isso merece estudos mais aprofundados, como os que vem sendo feitos lá há duas décadas. O EPROLB vem, assim, como uma iniciativa válida para se conhecer um pouco mais sobre o planejamento das rotas de ônibus nas grandes cidades brasileiras. Ele poderá subsidiar ou incentivar tais estudos.

Analisando-se as respostas à principal pergunta, *a de nº. 10: Como é feito o traçado (como se escolhe o itinerário) de novas linhas de ônibus (ou reformulação dos itinerários das linhas existentes)*, chega-se à principal constatação: nenhum órgão gestor de transportes urbanos do país usa no seu dia-a-dia técnicas objetivas de roteirização.

Não há grandes diferenças regionais em termos de adoção das diretrizes básicas de roteirização. Algumas das considerações contidas no manual da Mercedes-Benz do Brasil são colocadas no sub-item 10.1, no qual são listados cinco critérios, que deviam ser enumerados por ordem de importância. São eles:

A = evitar vias ou interseções congestionadas;

B = procurar atender os principais pontos de geração de viagens;

C = prover a grande maioria dos moradores com distância máxima de caminhada igual a "x" metros;

D = considerar a geometria da via (rampa, largura, tipo de pavimento, etc);

E = seguir basicamente o itinerário original da linha ou de linhas já existentes.

Foram enviadas pelas capitais as seguintes seqüências de importância (1 = critério mais importante):

TABELA 10 Respostas à questão 10.1 do formulário do EPROLB

	SP	RJ	BA	MG	CE	PR	PE	RS	AM	PA	GO	ranking
A	5	4	4	5	4	5	5	5	1	4	5	5
B	1	1	1	1	2	3	1	1	2	1	2	1
C	2	2	3	4	5	1	3	2	3	2	1	2
D	4	2	2	3	1	2	2	3	4	3	4	3
E	3	5	5	2	3	4	4	4	5	5	3	4

onde: *colunas* – representam as respostas de cada capital, representada pela sigla de seu respectivo Estado;

linhas – representam cada um dos 5 (cinco) critérios questionados.

A enumeração dos critérios por grau de importância mostrou-se muito heterogêneo, o que pode ser constatado pelo simples fato de não ter havido nenhuma coincidência de enumeração entre as 11 (onze) empresas gestoras. Todas as respostas foram diferentes uma das outras, havendo uma certa proximidade entre as enumerações dadas por Belém, Rio de Janeiro e Salvador (ver na tabela anterior).

Fazendo uma média de todas as respostas, obteve-se um ranking que representa o grau de importância atribuído, na média, pelas agências brasileiras de gestão, a cada critério. Esse ranking coincidiu com a classificação dada pela CARRIS, de Porto Alegre, que também é muito próximo ao adotado pela SPTrans.

No critério letra “C”, todas as empresas responderam que adotam 500 (quinhentos) metros como distância máxima de caminhada da residência do usuário até a linha de ônibus mais próxima, à exceção das seguintes empresas: CARRIS, de Porto Alegre (200 m); STP, de Salvador e TRANSURB, de Goiânia (600 m); e a EMTU, de Manaus (1.000 m).

A distância adotada pela STP e pela TRANSURB não difere muito do restante, mas os extremos (200 e 1.000 metros) são destoantes. Procurando-se as causas dessas diferenças, foi verificado que: em Porto Alegre o órgão consultado na verdade é um operador, e não o gestor. Além disso, sua área de cobertura localiza-se principalmente ao redor do centro da cidade, local de maior demanda e por

consequência de maior cobertura. Assim, não é de se estranhar a curta distância máxima de caminhada adotada para o projeto de linhas operadas pela CARRIS.

Por telefone, GONÇALVES (1999⁵³) da EMTU manauense confirmou que a distância de projeto é realmente um quilômetro de caminhada! O que a princípio parece inconcebível em termos técnicos, constata-se com surpresa que alguns usuários caminham dois, ou até três quilômetros para atingirem a rede de transporte público. Trata-se de uma realidade totalmente atípica em relação a todas as outras grandes cidades brasileiras. Segundo a gerente de Planejamento, M. P. Socorro Gonçalves, há uma grande carência de veículos, o que se agrava com o rápido e desordenado crescimento na zona leste do município.

O critério **A** – *Evitar vias ou interseções congestionadas* foi considerado de baixa importância pela grande maioria dos órgãos. Todos o consideram ou o mais irrelevante, ou o segundo menos importante, à exceção de Manaus, que novamente surpreende ao considerá-lo o mais importante critério na escolha do traçado. A baixa consideração desse critério se deve provavelmente ao tratamento prioritário que pode ser dado às vias e interseções pelas quais trafega o coletivo. Mas desconsiderando esse critério em específico, a enumeração da EMTU manauense corresponde à média das demais. Assim, conclui-se que provavelmente a capital do Estado do Amazonas deva estar sofrendo grandes problemas de tráfego, o que afetaria a avaliação da interferência dessa área no planejamento do transporte público como um todo.

Os critérios **B** e **C** referem-se à localização espacial da demanda, e foram os que obtiveram maior pontuação, portanto sendo considerados os mais relevantes. Assim, confirma-se a importância de se ter a demanda como principal variável a ser considerada em qualquer planejamento de transportes, principalmente no caso das grandes cidades. Todas as agências consideram esses dois critérios os mais importantes, com exceção da BHTRANS e da ETTUSA, que consideram o critério **C** de menor importância. No caso de Belo Horizonte, isso é explicado mais adiante no texto, mas pode-se adiantar que se trata de uma consideração mais “caso a caso” do

⁵³ GONÇALVES, M. P. S. (1999) Comunicação por telefone. (março)

critério. Isso faz com que se perca o sentido ao definir-se um número exato para a distância máxima de caminhada da casa do usuário ao serviço de transporte coletivo.

O critério **D** aparece como o terceiro mais importante, em média, e refere-se às características físicas das vias que podem ser consideradas como adequadas para receber linhas de ônibus. Esse foi o critério considerado como mais importante para a ETTUSA, de Fortaleza, e o segundo mais importante para Rio de Janeiro, Salvador, Curitiba e Recife. Provavelmente, nessas capitais os problemas referentes à largura e pavimentação das ruas, por exemplo, são mais graves ou mais relevantes para a realidade de seus sistemas, do que nas demais.

Finalmente, o critério **E** foi considerado na média como de baixa importância, à exceção da BHTRANS, que o considera como segundo mais importante. Trata-se de procedimento normalmente utilizado quando se pretende modificar o itinerário de uma linha existente: procurar não alterar significativamente seu traçado, para se evitar problemas de assimilação pelos usuários e também para não provocar confusão no atendimento devido a interferência de uma linha em outra.

No sub-item 10.2, é perguntado se “*É utilizado algum material bibliográfico (livro, apostila, artigo científico) que sirva como guia para se traçar novas linhas de ônibus, ou remanejar as existentes?*”. Somente duas empresas responderam afirmativamente: a CARRIS, de Porto Alegre, que inclusive foi a única operadora consultada no lugar do órgão gestor e a CTBel, de Belém.

A CARRIS é a operadora da “bacia pública”, e detém a maior frota do município. Atua em conjunto com a EPTC, que substituiu recentemente a Secretaria Municipal de Transportes no controle e fiscalização do sistema de transporte público da capital gaúcha. Eles utilizam o Boletim Técnico nº. 35 da CET-SP) para o planejamento e operação das linhas de ônibus. Porém, nesse Boletim não há nenhuma recomendação quanto ao traçado dos itinerários.

Na capital paraense, são adotados “dados do Plano Diretor Urbano de Belém, manuais do GEIPOT e da ANTP”, além da experiência técnica dos especialistas lotados no setor de planejamento das linhas. Ou seja, ambas não utilizam padrões formais de planejamento dos itinerários, nem com técnicas manuais, nem com métodos matemáticos. Ressalta-se que a experiência profissional é a base do

processo de projeto de novas linhas, ou modificações das existentes. Esta é a principal constatação promovida pelo levantamento nacional.

No sub-item 10.3 questiona-se se a matriz Origem/Destino é considerada no processo de traçado dos itinerários. São dadas as seguintes opções:

A = sim, utilizando-se um software para este fim;

B = sim, observando os desejos de viagens manualmente;

C = não, pois não há uma matriz O/D com todas as viagens do município;

D = não, apesar de estar disponível uma matriz O/D levantada (ou estimada) no ano de 19____, usando-se a técnica _____.

E = sim, dada a necessidade, faz-se um levantamento (ou estimativa) da demanda no local a ser afetado pela modificação/implementação das linhas..

Cada capital dos Estados representado em cada coluna marcou uma ou duas das opções acima:

TABELA 11 Respostas à questão 10.3 do formulário do EPROLB

	SP	RJ	BA	MG	CE	PR	PE	RS	AM	PA	GO	%
A				x								8%
B			x					x	x	x	x	38%
C		x				x					x	23%
D					x							8%
E	x			x			x					23%

A porcentagem foi calculada com base em todo o conjunto de respostas marcadas (13), e não sobre o número de empresas (12). Nota-se que as capitais dos Estados de BA, RS, AM, PA e GO observam os desejos de viagem manualmente, que é o procedimento mais adotado. Em segundo lugar, vêm empatados com três ocorrências cada a não utilização da matriz O/D, pelo fato de a mesma não existir (RJ, PR e GO) e a estimativa ou levantamento pontual, de acordo com a necessidade (SP, MG e PE). Em MG também se adota a análise da demanda com auxílio de um SPT, no caso o EMME/2. GO acrescenta a informação de que não há matriz O/D

levantada recentemente. Finalmente, o CE afirma ter uma matriz O/D de 1996, mas que ainda não é utilizada. A mesma foi realizada para os estudos de demanda para o metrô, mas pretende-se utilizá-la, também com o auxílio do EMME/2, para analisar a demanda por ônibus.

A questão 11 (sub-itens 11.1 e 11.2) não foi preenchida na maioria dos formulários. Os que preencheram serão comentados: Belém já utilizou o software BUS 45, e atualmente usa o AUTO BUS para mapear os desejos de viagem (novos itinerários) sobrepondo-os à malha existente para possibilitar melhor visualização; a BHTRANS, como afirmado acima, usa o EMME/2 para “simular o carregamento de passageiros, a velocidade média e o tempo de viagem das linhas ao longo do itinerário. Isto ajuda na definição de qual itinerário proporciona melhor desempenho em relação à viabilidade econômica e operacional da linha e qual a concorrência entre os que percorrem trechos coincidentes (corredores e arteriais principais).”; Curitiba usa programas de desenho, provavelmente também para visualização, além da função básica de projetos viários; a CARRIS utiliza o Maptitude para “auxiliar no processo de definição do traçado de linhas, contemplando o atendimento no entorno (através de rede buffer), e na padronização de extensões.”; Recife se utiliza do programa MANTRA e programas de desenho para “racionalizar percursos e utilizar melhor a pesquisa domiciliar”. Já foi estabelecido contato com o INPE para “utilizar/conhecer o SPRING”; a STP deixou de utilizar o TRANPLAN, e pretende utilizar o EMME/2 “no carregamento da linha estudada, e na definição de caminhos mínimos”; por fim, São Paulo utiliza o TRANPLAN, o Maptitude e o Map/Info. “O Maptitude é usado na área de planejamento para avaliar recebimentos, comparar áreas de influência e estudar a formulação de sistemas tronco/alimentados. A área operacional usa eventualmente o Maptitude para apresentar propostas.”

Como última pergunta do formulário, aparece a de número 12: *Seria interessante que fosse desenvolvido algum software que auxiliasse o especialista no momento dele planejar novas linhas?* RJ e PR responderam que não há como prever. Todos os demais órgãos gestores (83%) afirmaram que seria interessante ou muito interessante. Sete órgãos assinalaram que seria interessante caso fosse considerada a experiência do especialista (SP, CE, PE, RS, AM, PA e GO). Quatro responderam

que seria muito interessante porque há uma imensa carência nessa área (BA, MG, CE e PA).

No campo 13, de observações espontâneas, relativo à construção de um software para esse fim, foram dadas três colocações, por Salvador, Porto Alegre e Belém. A SPT queixa-se que os softwares existentes são de difícil adaptação para a dinâmica das cidades brasileiras. Danyela Moraes da Silva, chefe do setor de Planejamento e Operação da CARRIS, considera que “existe um carência muito maior de ferramentas para auxiliar o processo de dimensionamento horário e alocação de tripulação (tabelas horárias). Não conheço nenhum software que seja capaz de programar uma tabela horária (respeitando-se todas as restrições necessárias) e, ao mesmo tempo, faça a alocação das tripulações nas tabelas.” Já a SPT afirma que “tal software tem que ser adequado às características e peculiaridades do sistema local, e que, para tanto, devem ser consultados os técnicos responsáveis pelo planejamento, que por sua vez também serão os usuários do software.”

As outras observações de caráter mais geral já foram colocadas nesta Seção, ou serão comentadas oportunamente nesta Dissertação.

4.2. Procedimentos Adotados no País

Os 5 (cinco) critérios apresentados como principais na definição de rotas no EPROLB são enumerados segundo seu grau de importância, pelas empresas gestoras, na seguinte ordem (em média):

- 1º.) procurar atender os principais pontos de geração de viagens;
- 2º.) prover a grande maioria dos moradores com distância máxima de caminhada igual a **500** metros;
- 3º.) considerar a geometria da via (rampa, largura, tipo de pavimento, etc);
- 4º.) seguir basicamente o itinerário original da linha ou de linhas já existentes;
- 5º.) evitar vias ou interseções congestionadas.

Com base nessa enumeração, percebe-se que os critérios preponderantes referem-se à demanda. Direta ou indiretamente. As respostas indicam que “a linha deve passar onde a demanda se encontra”. A lógica volta-se então para o conhecimento da demanda, dos desejos de viagem, da sua localização geográfica, da sua quantificação e caracterização.

Porém, o que se constata é que na maioria dos casos de planejamento de linhas de ônibus, existe pouca ou nenhuma prática efetiva de levantamento sistemático de dados tais como: pesquisas Sobe/Desce, aferições em *cordon line* e *stream line*, e mesmo pesquisas mais caras, como a domiciliar ou a individual.

Uso de Ferramentas Computacionais

Somente um grupo restrito de planejadores de transporte brasileiros usam maciçamente algum software de transporte em seu trabalho diário. Apesar disso, os planejadores demonstram um interesse especial em Sistemas de Informação Geográfica – SIG e em Sistemas para Planejamento de Transportes – SPT. Melhor ainda, há uma pré-disposição para se conhecer melhor e passar a utilizar métodos novos e sistemas informatizados, não obstante o conhecimento a respeito ser, de um modo geral, bem superficial. A grande maioria das órgãos gestores consultados mostrou-se receptivo à adoção de critérios objetivos e sistemáticos, como complemento à experiência técnica.

O diretor de Planejamento (DIPLAN/TRANSURB) do órgão estadual goiano de gestão do transporte público, Milton Pires Batista, afirmou que há a necessidade de se automatizar alguns processos. “Pretende-se trabalhar com softwares para automatizar o planejamento e controle operacional das linhas” (BATISTA, 1999⁵⁴).

O nível de estruturação (infra-estrutura, tecnologias e pessoal especializado) dos sistemas de transporte nacional é diferente do encontrado em países desenvolvidos, estando aquém destes na maioria dos casos. Porém, para o planejamento de sistemas, o país tem acesso a informações e técnicas em nível bastante semelhante ao desses, o que poderia possibilitar o uso e aproveitamento de

⁵⁴ BATISTA, M. P. Comunicação por telefone. maio/1999

recursos dos softwares na área em iguais proporções. Mas hoje em dia ainda não se verifica uma massificação no uso dessas ferramentas no Brasil. A causa da não constatação pode estar na falta de recursos para sua aquisição dos softwares, mas pode ser o reflexo de uma pré-disposição dos técnicos em não aceitar facilmente a informatização de boa parte dos trabalhos que usualmente são feitos manualmente. Ou seja, os motivos podem ser vários, as reais causas dificilmente podem ser identificadas com precisão.

4.3. Comparação do Levantamento do TRB com o EPROLB

4.3.1 Considerações iniciais

Os dois levantamentos diferem de início em seus objetivos: enquanto o realizado pelo TRB pretendem cobrir boa parte do território dos Estados Unidos e Canadá, questionando os mais variados aspectos comumente adotados no planejamento e operação de linhas de ônibus, o realizado nesta pesquisa de mestrado pretende, de forma objetiva e restrita, verificar o grau de utilização de técnicas formais referentes ao projeto de itinerários.

O TRB pretendeu, em seu estudo, identificar padrões de avaliação de rotas de ônibus, em vários aspectos relacionados a elas. Dentre eles, está a questão do traçado dos itinerários. Já o EPROLB, que conseguiu também identificar a existência ou não de padrões para a escolha do traçado, pretendeu principalmente verificar se os especialistas brasileiros conhecem e/ou utilizam técnicas formais para esse fim. Ou seja, essa é uma diferença básica que precisa estar bem clara.

Há também outras profundas diferenças, tais como quantidade de pessoal e recursos envolvidos nos levantamentos, prazo para sua realização (mais crítico quando há limitação de pessoal e recurso, como é o caso de uma pesquisa de mestrado) e diferente nível de experiência em levantamento, por parte dos pesquisadores.

A base metodológica da pesquisa do TRB foi uma revisão de um estudo realizado em 1984 por esse mesmo órgão estadunidense, que levantou informações demográficas e estatísticas, narrativas sobre processos de avaliação e critérios de

performance e a percepção das agências de transportes sobre a influência do processo de avaliação na qualidade do serviço. Nesse levantamento, realizado dez anos antes ao levantamento de 1994, foi conduzido pelo corpo técnico do Metrô de Houston, EUA, convocado com o intuito de se obter mais detalhes, já que são profissionais da área, e por isso mais aptos a buscar mais detalhadamente as informações. Após o envio dos formulários, foram feitas entrevistas telefônicas para obtenção desses detalhes.

Em 1994, telefonemas foram feitos somente para dirimir dúvidas relativas ao preenchimento do formulário. Por isso, há nítidas diferenças entre o nível de detalhamento pretendido em cada pesquisa e a flexibilidade permitida por cada tipo de formulário. No Apêndice A do *Synthesis of Transit Practice 10* pode-se encontrar o resumo do formulário de 1984, que é extremamente simples e aberto. Ou seja, o entrevistado teve total liberdade para discorrer sobre os padrões adotados em sua agência de transportes. Ao contrário, em 1994 as respostas foram de múltipla escolha, pré-definidas de acordo com a revisão das respostas obtidas na pesquisa da década anterior.

Certamente muitos problemas encontrados no primeiro levantamento foram estudados para que não se repetissem no mais recente. Assim, o índice de problemas causados por má interpretação, ou por inadequação das perguntas, ou mesmo por falta de compreensão do técnico sobre o que se desejava saber, foi provavelmente bem menor no levantamento mais recente.

Essa discussão sobre as duas pesquisas do TRB e sobre a de 1994 em si tem por objetivo contextualizar o leitor sobre as diferenças entre os levantamentos do TRB e o levantamento realizado no Brasil. Conclui-se que não há como comparar os levantamentos de igual para igual, mas algumas observações são cabíveis, mesmo considerando-se todas essas diferenças.

4.3.2 Pontos falhos dos dois levantamentos

A primeira observação sobre as duas pesquisas (1994 do TRB e o EPROLB) é a respeito do método de levantamento de dados. Ambas se utilizaram de formulários que foram enviados aos órgãos competentes. Enquanto que no

levantamento do TRB (1995) foram distribuídos 297 formulários, no EPROLB foram 14. Assim, a forma de condução impessoal (não havia contato particular, só o envio do formulário) provavelmente contribuiu para o baixo índice de retorno obtido pelo primeiro (37 %, contra 79 % do nacional). Alia-se a esse fato a dificuldade, devido ao grande número de órgãos entrevistados, de completar-se as informações escritas com perguntas por telefone, como previsto pelos técnicos de Metrô de Houston. Isso provavelmente prejudicou o entendimento exato de algumas respostas.

Pode-se fazer algumas críticas à real necessidade de cada questão do levantamento nacional, ou a falta de algum outro fator relevante que tenha passado despercebido. Por exemplo, poder-se-ia incluir o IPK médio dos sistemas de transporte coletivo do país, ou se há sistema tronco-alimentado e qual o número e grau de importância das estações e terminais e eixos troncais na cidade em questão. Por outro lado, algumas questões poderiam ter sido suprimidas. Após o recebimento das respostas, foram constatadas como desnecessárias, por exemplo, as perguntas 2 e 6 do formulário do EPROLB, pois pouco acrescentaram ao escopo da pesquisa.

O critério E, de “seguir basicamente o itinerário original da linha ou de linhas já existentes”, poderia ter sido melhor explicado, já que ele só tem sentido no caso de modificação do itinerário de uma linha que já existe. Assim, para a implantação de uma linha nova, deveria ter sido dada uma alternativa, um critério substitutivo para esse caso.

O critério de limitação do número de transferências não foi considerado no EPROLB. No levantamento estadunidense, as respostas obtidas condizem com o que normalmente se espera: na prática somente órgãos de sistemas menores o consideram como de grande importância, ou de importância primária. Isso porque como afirma FERRAZ (1990), apesar de um número reduzido de cidades médias brasileiras utilizarem terminais centrais fechados (para integração físico-tarifária), esta é uma alternativa fundamental, suficiente e satisfatória do ponto de vista da eficácia e de justiça social. Ou seja, a limitação quanto à quantidade de transbordos normalmente não é considerada em sistemas médios ou pequenos porque basta um único terminal de integração, localizado no centro da cidade, para solucionar a grande parte dos seus

problemas de transporte público, tendo então no máximo uma transferência para se alcançar qualquer ponto da cidade.

O EPROLB contemplou apenas redes grandes, nas quais são utilizadas transferências para otimizar o sistema mais frequentemente. Caso fosse questionado o grau de importância dado pelas agências nacionais à limitação do número de transferências, provavelmente elas considerariam como de grau médio ou baixo de importância. Claro, há um limite aceitável pelo usuário, o qual geralmente é de no máximo três transferências no caso de grandes distâncias, que naturalmente já é levado em conta pelos técnicos da área de planejamento de TPU.

Uma falha que pode ser considerada grave, cometida pelo levantamento de 1994 do TRB, foi a pré definição, a separação hierárquica entre critérios “básicos” e critérios “secundários”. Provavelmente, algumas das respostas discordantes com essa classificação ficaram prejudicadas, pois não há alternativa de respostas ou preenchimento à mão. Como se trata de um formulário com questões de múltipla escolha, o responsável por respondê-las é obrigado a se ater às opções dadas. Assim, uma eventual contribuição no sentido de alterar a classificação certamente não foi feita, ou foi feita de maneira improvisada, e alguns dos critérios considerados como “secundários” pelo TRB na verdade mostraram-se mais importantes do que alguns dos critérios “primários” e vice versa.

Uma outra crítica poderia ser dirigida ao relatório do TRB em si, que faz parte da coleção *Synthesis of Transit Practice*, do *Transit Cooperative Research Program*. Seu formato é muito simplificado, e pouca discussão é feita sobre os resultados obtidos. Isso quer dizer que o enorme trabalho que se teve para levantar os dados não condiz com as poucas informações repassadas no texto final. Os dados são também apresentados de forma bastante agregada, o que dificulta a análise. Essa posição editorial está explícita inclusive no prefácio, que a justifica pelo objetivo maior em recomendar a adoção de práticas, do que promover discussões sobre essas práticas.

5. ESCOLHA DO MÉTODO MAIS ADEQUADO ÀS GRANDES CIDADES BRASILEIRAS

Para se escolher o método mais adequado ao caso brasileiro, será levada em consideração principalmente a revisão bibliográfica dos métodos de roteirização do TPU apresentada no Capítulo 2. Porém, para se saber qual desses métodos é o mais adequado para o Brasil, deve-se entender o contexto da prática cotidiana da roteirização no país.

Assim, na Seção 5.1 apresenta-se a comparação dos padrões de avaliação dos itinerários de linhas de ônibus normalmente usados pelos órgãos gestores nacionais com os padrões adotados nos Estados Unidos e Canadá.

Define-se na Seção seguinte os critérios que servirão de base para a decisão. Com base nos aspectos teóricos e práticos, faz-se a escolha do melhor método, na Seção 5.3.

5.1. Comparação dos padrões brasileiros com os padrões norte-americanos e canadenses

Para se comparar os critérios adotados pelas agências estadunidenses e canadenses com os adotados no Brasil, deve-se considerar apenas aquelas que gerenciam sistemas de transporte de porte equivalente. Ou seja, como o EPROLB realizado nesta pesquisa de mestrado contemplou sistemas de grandes cidades, somente as equivalentes nos Estados Unidos e no Canadá serão consideradas na comparação.

Assim, unicamente as 10 agências que gerenciam sistemas de frota total superior a 1.000 veículos (Classe 1) serão consideradas. Todas as 11 agências brasileiras pesquisadas gerenciam frota superior a esse número, sendo que o menor

(sistema de Manaus) conta com uma frota de mais de 1.100 ônibus. Apesar de não se saber a frota que cada órgão estrangeiro gerencia, a principal característica é atendida: a de se referir a uma frota grande, o que permite afirmar que são órgãos que normalmente lidam com problemas complexos e constantes desafios, proporcionais a sistemas de grande porte.

As 10 agências estrangeiras são as seguintes: MTA NYC TRANSIT (New York - NY), NJ TRANSIT (Newark – NJ), WMATA (Washington – DC), CHICAGO TRANSIT AUTHORITY (Chicago – IL), METRO HARRIS COUNTY TRANSIT (Houston – TX), LACMTA (Los Angeles – CA), MUNI OF METRO SEATTLE (Seattle – WA) e SEPTA (Philadelphia – PA), **dos EUA**; TORONTO TRANSIT COMMISSION (Toronto, ON) e STCUM (Montreal, PQ), **do Canadá**.

Das dez, oito responderam que adotam formalmente padrões para avaliação de rotas. As exceções estão na agência de Houston, que não adota padrões formais, e a de Filadélfia, que não respondeu a essa questão. Estas, mesmo não adotando os padrões de maneira formal, certamente utilizam alguns deles em suas avaliações e no planejamento das linhas. Isso porque há respostas atendidas por todas as 10, ou seja, existem padrões que unanimemente são considerados importantes, usados formal ou informalmente.

Comparando-se com os órgãos brasileiros, constata-se que somente a URBS (Curitiba) adota formalmente padrões de controle e avaliação das linhas de forma sistematizada e constante, o que corresponde a somente 9 % (uma em 11) dos órgãos gestores pesquisados. Isso pode indicar que falta tradição no país em termos de coleta freqüente de dados, ou pode indicar que os técnicos não dão a devida importância à coleta, ou ainda, pode indicar que os especialistas brasileiros não têm à disposição os recursos financeiros e/ou humanos para tal.

Essa constatação deve ser levada em consideração na escolha do método mais adequado para aplicação nas grandes cidades brasileiras. Assim, os dados requeridos pelos modelos devem preferencialmente ser tais que sua coleta utiliza técnicas simples e de baixo custo.

Se os dados fossem fornecidos de forma mais desagregada, poder-se-ia saber quais os critérios adotados por cada agência em particular. Conhecendo-se esses

detalhes, poder-se-ia entender melhor a lógica de cada sistema, por meio de pesquisa sobre as peculiaridades do transporte público de cada cidade. Por exemplo, a oferta de metrô é notadamente diferente em Nova Iorque em relação a Chicago, o que poderia influenciar a adoção de padrões diferenciados na avaliação das linhas de ônibus, quando integradas ou não a esse modo de transporte de massa.

Como pode ser verificado na Tabela 6, contida na Seção 3.2, os critérios mais importantes apontados pelas agências da Classe 1 são, pela ordem:

- 1º.) localização e espaçamento dos PEDs, os dois critérios empatados em primeiro com 100 % de adoção (o que leva a crer que as agências estrangeiras estão mais preocupadas com aspectos operacionais ou de planejamento local, e não com o planejamento global do sistema);
- 2º.) densidade populacional, com 9 adesões (somente um empresa não o adota);
- 3º.) densidade de emprego, critério adotado por 8 agências;
- 4º.) espaçamento entre linhas e “direitura” de rota, empatados em 4º. lugar com sete agências cada.

Essa ordem de preferência pode ser comparada diretamente com a ordem de preferência das grandes agências brasileiras, contida na Tabela 10 (sub-item 4.1.3.3), e dada em resposta à questão 10.1 do questionário nacional. Enquanto os onze órgãos de transportes do Brasil que responderam ao EPROLB elegeram como critério mais importante “procurar atender os principais pontos de geração de viagens”, o critério do TRB correspondente, de “proximidade a pólos geradores”, só é adotado por 2 agências, das 10 de Classe 1.

Mas se o conceito de pólo gerador de viagens for ampliado para as áreas densas onde muitas viagens são produzidas ou atraídas, então o critério mais importante, na opinião dos técnicos brasileiros, passa a confundir-se com o segundo e terceiro critérios mais importantes, de acordo com os técnicos norte-americanos e canadenses.

Os critérios mais adotados nos Estados Unidos e Canadá confundem-se de certa forma com o critério que ficou em segundo lugar no Brasil: “prover a grande

maioria dos moradores com distância máxima de caminhada igual a **500 metros**”. Não se pode comparar diretamente essa diretriz de projeto com o espaçamento entre os pontos de parada, muito menos com a localização de um PED ao longo do quarteirão que o receberá.

Porém, a combinação desses (que são o 9º. e 10º. critérios secundários) com o 3º. critério básico (ver no sub-item 3.1.1.3 – Espaçamento entre linhas / Cobertura espacial) aproxima-se muito da diretriz “caminhar no máximo 500 metros”. Isto porque o critério descrito no sub-item 3.1.1.3 indica que menor espaçamento entre linhas de ônibus deve ser de 805 m, ou seja, a distância máxima de caminhada do usuário até a linha mais próxima, no caso de adoção deste espaçamento mínimo, será de 402,5 m (a metade do espaçamento será o máximo que o passageiro caminhará, da sua residência até a via por onde passa o ônibus). Nas áreas urbanas, é recomendado pelo TRB que o espaçamento seja de no máximo 1,61 km. Neste caso, a distância de caminhada máxima passa a ser 805 metros. Este intervalo de distâncias máximas de caminhada (entre 402,5 e 805 m) assemelha-se ao encontrado no Brasil: 400 a 1.000 m.

Lembra-se também do critério de “proximidade das residências” (sub-item 3.1.2.6), que não especifica como seria medida essa proximidade, mas indica que deve ser a menor possível, dentro das limitações de projeto.

São dois os critérios norte-americanos que ficaram em 4º. lugar: espaçamento entre linhas e “direitura” de rota. Este assemelha-se em parte com o 4º. lugar do levantamento brasileiro, o de “seguir basicamente o itinerário original da linha ou de linhas já existentes”, já aquele foi comentado anteriormente. A semelhança está no fato de as linhas existentes normalmente já seguirem o caminho “natural” de fluxo, ou seja, seus itinerários passam pelas principais vias, e atendem grande parte da demanda.

Os critérios nacionais que ficaram em 3º. e 5º. lugares, “considerar a geometria da via” e “evitar vias ou interseções congestionadas” respectivamente, estão relacionados à Engenharia de Tráfego. Esta área do conhecimento ligada à Engenharia de Transportes não foi considerada no levantamento do TRB, que trata exclusivamente do Transporte Público Urbano por Ônibus. Portanto, não há como

saber qual é a importância dada pelos técnicos estrangeiros a esses fatores que influenciam a definição das rotas. Nos países desenvolvidos os problemas de tráfego podem ser solucionados mais facilmente, no que tange aos recursos necessários, e talvez por isso essas questões não tenham sido consideradas.

Sobre a demanda

O formulário do EPROLB é explícito quanto ao questionamento de uso ou não de dados de demanda no planejamento de linhas de ônibus. Na questão 10.3, pergunta-se de que maneira é utilizada a Matriz O/D (se é utilizada uma matriz levantada ou estimada, se algum software é usado para seu processamento, etc). Um outro problema gerado pelo fato de os critérios terem sido previamente classificados e definidos no trabalho do TRB foi a omissão, na consideração para o planejamento dos itinerários, de dados importantes como a Matriz O/D, que provavelmente é usada no cotidiano das agências estrangeiras. Mas não há como fazer afirmações sobre o seu grau de utilização, já que em nenhum campo do formulário do TRB há abertura para se inserir qualquer informação a respeito.

O critério considerado como o mais importante pelo TRB, o de densidade populacional, realmente dá uma boa idéia geral da localização da demanda. Porém, isso não é suficiente para definir as interações entre áreas adjacentes e os desejos de viagem dos indivíduos. Discorda-se assim que a densidade seja o principal fator de análise na definição de rotas. Substituindo esse critério pelo uso da Matriz Origem/Destino, obtém-se dados qualitativa e quantitativamente superiores, já que além do volume de viagens a ser atendido, tem-se os pares O/D, ou seja, a direção de fluxo desejada por cada usuário. Dessa forma, ao invés de um parâmetro estanque como a densidade, deve-se utilizar outro que considere a mobilidade inerente e necessária ao Planejamento de Transportes.

5.2. Para a Escolha do Método mais Adequado

Para se fazer a escolha, primeiramente são descritos os critérios sugeridos ou pelos pesquisadores que propuseram os métodos descritos na Seção 2.4, ou pelos autores de artigos que analisaram diversos métodos (ver no item 2.3.1). No item 5.2.2, faz-se algumas considerações sobre a necessidade de se informatizar os

métodos. Esta Seção se encerra com a escolha dos métodos candidatos à indicação para aplicação no país, apresentados no item 5.2.3.

5.2.1 Critérios para a Escolha

A característica considerada como mais importante por todos os autores dos métodos descritos na Seção 2.4. é a possibilidade de geração de diferentes alternativas derivadas de diferentes condições consideradas, incluindo-se nessas considerações objetivos conflitantes (ponto de vista do usuário vs. ponto de vista do operador).

Outra característica indicada por unanimidade como essencial é a determinação das freqüências de atendimento, de forma simultânea ou a *posteriori* à determinação das rotas ótimas.

São considerados principais também aqueles métodos de roteirização de TPU por ônibus que têm como principal variável os desejos de viagem. Todos os modelos construídos para representarem a demanda por viagens em grandes sistemas a consideram implicitamente. Ou seja, apesar dos autores não salientarem sua importância, esta é intrínseca aos modelos, e por isso deve ser considerada também como característica fundamental.

Segundo VAN NES et al. (1988), um modelo adequado ao projeto de redes deve atender perfeitamente a dois critérios: (a) deve possibilitar a análise a curto, médio e longo prazos quanto à determinação de freqüências, redefinição de parte da rede ou completa redefinição do sistema; e (b) deve ser acessível e de fácil entendimento para o especialista.

CEDER & WILSON (1986) afirmam: “para que o modelo seja melhor compreendido e aceito, deve-se provê-lo com diferentes níveis de complexidade. A aceitabilidade de um método depende diretamente de sua simplicidade, flexibilidade e praticidade.”

AXHAUSEN & SMITH (1984) fizeram a avaliação de 13 métodos heurísticos (os 10 europeus listados na Tabela 2 e mais três norte-americanos) de roteirização de TPU com base em três critérios:

1. avaliação subjetiva: usaram das próprias informações dadas sobre os métodos pesquisados para definir critérios subjetivos;
2. medidas de performance das aplicações de diferentes métodos em diferentes sistemas: avaliações feitas pelos próprios autores dos métodos sobre os mesmos;
3. medidas de performance das aplicações de diferentes métodos em um mesmo sistema de transporte: aplicações de vários métodos em uma mesma cidade feitas por AXHAUSEN & SMITH para teste e avaliação⁵⁵.

Esses autores consideraram a avaliação subjetiva como principal critério de avaliação, já que os dois seguintes mostraram-se limitados devido a falta de dados, especialmente o critério 3, que necessita dados para a mesma rede. Mas a avaliação em si também foi prejudicada devido a falta de uma *benchmark* na literatura, ou seja, de uma meta ou nível já alcançado que pudesse servir de referência para comparações.

São esses os critérios considerados mais importantes por AXHAUSEN & SMITH (1984):

- os algoritmos devem ser construídos usando variáveis e restrições que normalmente são consideradas na teoria de Escolha Modal, por esta ser a base teórica mais importante para a modelagem do problema em questão (por exemplo, a demanda);
- os algoritmos (heurísticas) devem fazer a busca em toda a gama de rotas candidatas, pois dessa forma aumenta-se o potencial de se encontrar soluções próximas à ótima;
- as soluções devem ser preferencialmente independentes do pré julgamento dos especialistas e da configuração existente do sistema de transporte. Porém, por outro lado, o método deve permitir a interação do especialista em suas várias etapas, de modo a promover uma melhor compreensão da mecânica do processo de redefinição das redes. O profissional pode inclusive contribuir para a redução

⁵⁵ Na verdade, esse critério foi invertido, na medida que os autores não conseguiram acesso a mais de um método. Assim, resolveram aplicar um único método (o de MANDL, 1979) a duas cidades, uma dos EUA (Madison) e da Alemanha (Dusseldorf).

do tempo computacional, selecionando e retirando dentre as rotas candidatas aquelas que são naturalmente importantes para o sistema como um todo (e.g., as linhas do metrô e suas estações de integração com o modo ônibus).

Esse último critério de AXHAUSEN & SMITH é salientado por MOSCATO⁵⁶ como sendo desejável para a construção de um sistema informatizado para a roteirização no TPU. Isto porque como as variáveis e suas restrições são muitas, o fator de interação humana pode simplificar e tornar bem mais eficiente esse sistema. Um outro exemplo: o especialista pode identificar visualmente alguma alternativa de rota dada como viável pelo sistema, mas que na verdade é inviável devido às condições viárias do local por onde passa. Assim, bastaria o planejador “clique” sobre a referida rota, e apagá-la, fazendo com que o sistema reinicializasse o processo já sem aquela alternativa, viabilizando assim outras rotas adjacentes que incorporariam a demanda daquela que foi excluída.

As premissas básicas do método HASSELSTRÖM (1981) descritas a seguir resumem bem praticamente todos os critérios descritos neste item 5.2.1, e são suficientes para as considerações para a escolha de um método adequado. Segundo o pesquisador, um bom método deve ter as seguintes características:

- proporcionar uma solução próxima da ótima;
- o modelo deve representar bem a realidade, e precisa ter implementação viável;
- as heurísticas são preferíveis para a busca das soluções, por atenderem bem às duas premissas anteriores e exigirem menor complexidade computacional;
- o método deve ser informatizado, de modo a produzir os cálculos rapidamente e ajustar facilmente os dados quando necessário;
- a análise do sistema deve ser conduzida por um técnico especialista, e o computador deve ser uma ferramenta de ajuda, e não uma máquina fechada em si;
- o problema geral deve ser dividido em problemas menores, sendo que em vários deles poderia ser aproveitada a experiência do profissional envolvido. Esta

⁵⁶ MOSCATO, P. (1998). *Comunicação pessoal*. USP. Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação. (julho).

flexibilidade promove maior compreensão e confiança nos resultados por parte do especialista.

5.2.2 Sobre a Informatização dos Métodos

É interessante analisar uma observação de NEWELL (1979), que considerava (de acordo com as limitações da época) como “computacionalmente proibitiva” a seleção das melhores alocações de demanda nas rotas por comparação direta. Hoje isto é perfeitamente possível, como descrito na Introdução. Pode-se assim supor que sua conclusão teria sido diferente, caso ele tivesse acesso às tecnologias atuais.

Observação semelhante é feita por SCHNEIDER & CLARK⁵⁷ apud SOARES (1982), que classificam como “incômodos” os modelos de planejamento de transportes, devido ao grande número de variáveis e de informações produzidas, sua difícil interpretação e de custo e tempo computacional elevados.

Analizando os métodos manuais e computadorizados descritos por CHUA & SILCOCK (1982), BRANDÃO (1993) afirma que “a utilização de diretrizes e padrões de serviços (nos métodos manuais) pode ser vista como uma introdução de um procedimento heurístico para orientar o delineamento de rotas.” Assim, pode-se inferir que praticamente todos os métodos manuais, desenvolvidos para aplicação em casos reais, podem ser informatizados, usando-se ou um procedimento heurístico ou um modelo matemático (exato).

Contudo, como o objetivo principal do presente trabalho é definir o método mais adequado, não há a preocupação de se estudar como seria a informatização de métodos manuais. Por outro lado, há, certamente, a preocupação de se pensar em como deve ser a informatização do método escolhido.

O método deve ser aberto, no sentido de se permitir a inclusão de novas variáveis e restrições e/ou exclusão das pré definidas. Deve-se prover liberdade ao planejador para que ele possa adequar os modelos contidos no método às peculiaridades locais do sistema de transporte que sofrerá as modificações. Dessa

⁵⁷ SCHNEIDER, J. B.; CLARK, J. W. (1976). High-performance bus rapid transit systems: a design – process experiment. *Transport and Road Research Laboratory*, 606. Crowthorne.

forma, ele poderá fazer trocas entre custos conflitantes, ou seja, poderá produzir cenários, de acordo com o nível de serviço pretendido. Poderá também selecionar pontos (terminais, estações) onde exista concentração de transferências, de modo a facilitar a identificação de locais para transferências programadas (como permite o método de SHIH et al., 1998) ou simplesmente diminuir a complexidade do problema de cobertura.

Sobre essa necessidade do método ser informatizado, parece não haver dúvidas da superioridade em relação a métodos manuais, em termos de possibilidade de análises, comparações, testes, correções, mudanças de parâmetros de projeto, além da apresentação final com maior qualidade gráfica.

5.2.3 Sobre a Relação Transporte – Trânsito

Neste item pretende-se chamar a atenção sobre uma curiosidade observada. Em nenhum das publicações relativas aos métodos pesquisados, os autores consideraram a malha viária como fator importante no planejamento das linhas de TPU. Analisando as respostas obtidas pelo EPROLB (ver item 4.1.3.3), e também pelo levantamento do TRB (1995), não há igualmente a preocupação explícita em se considerar o trânsito urbano no planejamento dos itinerários de ônibus.

Talvez essa variável seja a de mais difícil adequação à modelagem matemática, já que seria necessário o levantamento das características geométricas de todas as vias da cidade em que se pretende fazer a otimização da rede de transporte público. Assim, seriam necessários, no mínimo: sentido de direção, largura da via, tipo e condições do pavimento, inclinação (rampa), prioridade / semáforos nas interseções, etc.

Realmente, não parece ser apropriada a consideração do sistema viário como condicionante à implantação do sistema de transportes, não só devido a complexidade comentada no último parágrafo. Mas deve haver uma boa interação entre os técnicos ligados às duas áreas, de modo que o planejamento possibilite tanto a conformação das vias aos padrões mínimos necessários ao modo de transporte em questão, quanto as linhas de transporte possam sofrer pequenos desvios para se adequar às condições invariantes da malha viária. Principalmente em países em

desenvolvimento, essa flexibilidade é fundamental para se otimizar a aplicação dos recursos destinados ao transporte urbano de passageiros. Dessa forma, o sistema viário poderia ser uma das variáveis a serem consideradas no refinamento do planejamento, e não na concepção ou determinação preliminar, a ser promovidas com o auxílio de uma ferramenta computadorizada.

5.2.4 Sobre a Análise Multi-Modal

Uma outra observação é sobre a consideração do sistema de Transporte Público Urbano como um todo, conforme salientado no Capítulo 1. Nenhum dos métodos estudados apresenta uma preocupação aprofundada e explícita sobre o caráter multi-modal que o planejamento de sistemas deve ter. Uma exceção é o método de SHIH & MAHMASSANI (1994), que com o conceito de centros de transferências e suas ligações diretas está considerando intrinsecamente a integração entre modos de menor capacidade com outros de média e alta capacidade.

No caso das redes metropolitanas com extensões extremamente elevadas, como São Paulo ou Rio de Janeiro, a princípio pode-se pensar que a complexidade inerente a esses sistemas de transporte poderia inviabilizar a análise dessas redes como um todo. Assim, poder-se-ia considerar praticamente impossível a análise de todas as integrações possíveis entre os diversos modos de transporte e mesmo as interações entre as linhas de uma mesma modalidade. Mas os recursos computacionais disponíveis hoje em dia já são suficientes para desenvolver um sistema informatizado adequado à solução dos COP, conforme visto.

As restrições tecnológicas do modo (neste caso, o ônibus) devem-se ao tipo de linha (expressa, paradora, etc.), e ao grau de segregação do modo em relação aos outros modos de transporte (VUCHIC, 1981). Assim, se algum itinerário de ônibus demandar intervalos menores do que por exemplo três minutos (limite tecnológico), deve-se passar para um modo de maior capacidade, estudando então a possibilidade de adoção de ônibus articulados, VLT, ônibus bi-articulados ou até mesmo metrô. As configurações em termos de frequências máximas por capacidade dos veículos determinam as faixas de capacidade de transporte de um modo, bem resumidas na Figura 4.

FIGURA 3 - Capacidade de Transporte dos Modos

FONTE: VUCHIC (1981)

Os limites dados pela área que se encontra mais ao alto e à esquerda referem-se aos modos de maior mobilidade (flexibilidade de rotas) mas de menor capacidade de transporte. Os que se encontram na área mais retangular, à direita e em baixo do gráfico são os limites dos modos de alta capacidade, caracterizados por rotas fixas e segregação em relação aos outros modos.

5.2.5 Sobre os Métodos mais Apropriados

Dos 7 métodos descritos na Seção 2.4, somente o primeiro (ver no item 2.4.1) não atende a todos os critérios descritos no item 5.2.1. Isso porque o método de HASSELSTRÖM (1981) é complexo, fechado, e de difícil compreensão, o que

dificulta seu uso por parte dos profissionais. Descarta-se assim este método e o software derivado dele, o VIPS II.

Os seis métodos restantes podem ser agrupados pelos países nos quais foram desenvolvidos. O método de MARWAH et al. (1984) e o de PATTNAIK et al. (1998) foram desenvolvidos na Índia. Os métodos cujo autor principal é CEDER (CEDER & WILSON, 1985 e CEDER & ISRAELI, 1998) foram desenvolvidos em Israel. Os dois restantes, BAAJ & MAHMASSANI (1991) e SHIH & MAHMASSANI (1994) foram desenvolvidos nos Estados Unidos.

Pode-se afirmar que existem três grupos de pesquisa principais no estudo de planejamento das rotas de uma rede de Transporte Público Urbano, devido ao trabalho continuado que vêm desenvolvendo há mais de 10 anos sobre o tema. São eles: grupo do Instituto de Tecnologia Technion–Israel, em Haia, Israel, liderado pelo professor Avishai Ceder; o grupo da Universidade do Texas, *campus* de Austin, EUA, liderado pelo professor Hani Mahmassani e o grupo de pesquisadores de diversas localidades da Índia.

Dos pesquisadores indianos, destacam-se o professor Marwah, do Instituto Indiano de Tecnologia, *campus* de Kanpur, e o professor Pattnaik, do mesmo Instituto, porém do *campus* de Madras. É interessante salientar que eles fazem trabalhos de extensão universitária em parceria com empresas consultoras, o que é produtivo na medida que estão aplicando os métodos em casos reais.

Resolvendo o problema por linhas de pensamento diferentes, esses três grupos conseguiram alcançar excelentes resultados no que concerne à modelagem e à implementação dos diversos aspectos da roteirização de TPU. Porém, nenhum deles teve o interesse ou a oportunidade de implementar seus métodos de forma comercial. Assim, suas aplicações restringiram-se aos casos comentados.

Não há então um software pronto para ser utilizado de forma imediata em outras redes. Caso houvesse, dado seu custo de aquisição e atualização (*upgrade*), muito provavelmente ele seria indicado para teste em cidades brasileiras. Como não há, o mais correto parece ser aproveitar o que há de mais moderno em cada modelo.

5.3. Escolha do Método

Conforme foi enfatizado no Capítulo 2, os métodos de roteirização que baseiam-se em redes fictícias não podem ser considerados para aplicações reais, e sim somente para visualização de cenários de políticas de transporte. Também os primeiros métodos (ver no item 2.1.2), chamados “não-aplicáveis”, não podem ser usados em sistemas complexos. Isso porque baseiam-se principalmente na premissa de que dotando a rede de boa cobertura e conectividade (usando-se como parâmetro a demanda provável em cada rota) a demanda real será atendida de forma eficiente. Essa condição é verdadeira mas não suficiente, pois os desejos de viagem devem ser usados, em qualquer modelo usado para otimização de grandes redes de TPU, conforme já enfatizado nesta Dissertação.

Assim, a escolha recairá sobre os métodos descritos na Seção 2.4, com exceção do método de HASSELSTRÖM (1981). Além dos critérios definidos e os comentários apresentados na Seção anterior (5.2), deve-se ter em mente as observações dadas na Seção 5.1. E mais: o método deve ser de fácil implementação, pois o objetivo principal deste trabalho de mestrado é claro: “escolha de um método adequado à aplicação nas grandes cidades brasileiras”.

O método de MARWAH et al. (1984) traz como novidade a distribuição dos passageiros nos arcos, e só depois a definição das rotas que serão utilizadas. Isso promove maior eficiência computacional, mas corre-se o risco de se criar linhas concorrentes em corredores, por não ser prevista a fusão delas em linhas de maior capacidade. Sua principal vantagem é ter sido testado em uma rede grande.

O método de CEDER & WILSON (1985) traz a fundamentação de modelagem, mas não indica como seria sua implementação. Ou seja, é um trabalho puramente teórico, apesar de “aplicável”.

O método de BAAJ & MAHMASSANI (1995), como os anteriores descritos na Seção 2.4, também mostrou-se eficiente. Não possui grandes problemas de implantação, como mostrado no teste realizado pelos autores.

O método de CEDER & ISRAELI (1998) peca por não considerar todos os tempos gastos pelo usuário, restringindo-se ao tempo de espera no ponto de parada, e

tempo gasto com transferência(s). Apesar disso, atende perfeitamente os critérios definidos no item 5.2.1, porém não foi testado em redes reais.

O método de PATTNAIK et al. (1998) mostrou-se eficiente e foi o que mais utilizou técnicas modernas de IA. Ele apresenta dois métodos de resolução, cujos tempos de processamento foram de 480 e 68 minutos. Ou seja, o método mais simplificado, computacionalmente mais rápido, gastou mais de uma hora para processar uma pequena rede de Madras, de apenas 25 nós e 39 arcos. Assim, certamente o tempo de processamento seria bem superior a esse, se para o estudo de caso fosse analisada uma rede grande, o que talvez inviabilizaria seu uso imediato.

Porém, cabe ressaltar que a evolução dos microprocessadores tem sido muito rápida, o que indica que até mesmo o método mais sofisticado de PATTNAIK et al. possa ser aplicado a grandes sistemas de transporte urbano. De uma certa maneira, mesmo que o processamento demore algumas horas, esse tempo poderá não ser considerado alto se comparado à frequência que o método de roteirização será usado.

A grande inovação do método de SHIH & MAHMASSANI (1994) foi a de se possibilitar o planejamento de transferências programadas, o que certamente traz ganhos ao sistema de transporte como um todo. Lembra-se que esse método foi aplicado, e os resultados mostraram-se satisfatórios.

5.3.1 O Método Escolhido

O método que atende a todos os critérios definidos no item 5.2.1 e que pode ser aplicado imediatamente, é o método de SHIH & MAHMASSAN (1994). Seu grande diferencial está na possibilidade de se planejar, já em nível macro, a localização de terminais e estações de transferências. O usuário fica mais satisfeito, de perder pouco tempo com transbordos, e o carregamento das linhas troncais é garantido e previsto mais facilmente, já que se sabe exatamente em que horários as linhas alimentadoras chegarão ao terminal. Portanto, por o método de SHIH & MAHMASSANI (1994) possuir essa vantagem extra, além atender aos critérios, ele é o mais indicado para aplicação nas grandes cidades brasileiras.

Para a aplicação, porém, deve-se prever que alguns problemas de implementação poderão surgir. Isso porque o método indicado só foi testado em uma

cidade de porte médio, Austin, Estados Unidos⁵⁸, o que certamente não garante sua aplicabilidade imediata em grandes sistemas, que possuem maior complexidade. Mas pela descrição dada, parece ser perfeitamente possível o teste.

5.3.2 Possibilidades de Melhorias

Faz-se algumas considerações a seguir, visando a melhoria do método de SHIH & MAHMASSANI, visando sua aplicação no país.

5.3.2.1 Coleta de dados

Os dados de entrada do método foram estimados (ver Seção 2.4.5). O modelo utilizado foi o de TZYGALNITZKY para se estimar os desejos de viagem, já que os dados de demanda estavam agregados. Para o caso brasileiro, as pesquisas Sobe/Desce com O/D por ponto de parada poderiam ser usadas, por serem mais simples e atenderem as requisições de entrada de dados.

Dessa forma, atende-se aos requisitos de “coleta simples e a baixo custo”, apresentados anteriormente. Atende também às observações quanto a consideração da demanda, descritas na primeira Seção deste Capítulo, porém de forma simplificada (considera-se somente a Matriz O/D de cada linha, ou seja, o número de pessoas que sobem em cada ponto, e quantas descem em cada destino, ligando as duas informações).

⁵⁸ MAHMASSANI, H. (1999) *RGP Applications*. E-mail pessoal. (17/jun)

5.3.2.2 Valor do tempo do usuário

KAWAMOTO (1994a) apresenta valores de tempo para os usuários que viajam por motivo trabalho. No modelo utilizado, o valor de P_m pode ser obtido equalizando-se a utilidade intrínseca à utilidade do dinheiro.

A Tabela 12 traz parte dos valores apresentados pelo autor, e referem-se a viagens realizadas exclusivamente pelo modo ônibus.

TABELA 12 Valor do tempo de viagens a trabalho

D (km)	R_f (US\$/mês)	N_R	E (kcal/min)	T_s (min)	Velocidade (km/h)	P_s (US\$)
20	70	1	2,5	60	26,	0,3
20	70	1	2,5	65	24,	0,3
20	500	1	2,5	60	26,	1,5
20	500	1	2,5	65	20,	1,4
20	100	1	2,5	60	26,	2,5
20	100	1	2,5	65	24,	2,4

FONTE: KAWAMOTO (1994a)

Para os três níveis de renda R_f apresentados (usuários que ganham 70, 500 e 1.000 dólares por mês), percebe-se que para se economizar 5 minutos em uma viagem por ônibus cujo trajeto euclidiano tem 20 km, esses usuários estariam dispostos a pagar a mais: 1, 7 e 11 centavos de dólar por viagem, respectivamente. Essa é a diferença entre os valores de P_m para os dois tempos totais de viagem (60 e 65 minutos). Percebe-se claramente que quanto maior o poder aquisitivo do usuário, mais valia é dada ao tempo. Ressalta-se que esses valores, aparentemente baixos, são muito significativos se considerados ao longo de anos de operação, tanto para o usuário quanto para o operador.

Assim, a definição quanto ao valor do tempo considerar variáveis como o conforto, em termo de gasto calórico, e tempo economizado (mais detalhes sobre a modelagem podem ser encontrados em KAWAMOTO, 1994a) seria uma opção ao simples arbítrio que foi admitido no trabalho de SHIH et al. (1998).

5.3.2.3 Proveito de características de outros métodos

O método de SAHLING⁵⁹ apud AXHAUSEN & SMITH (1984) não é adequado para se aplicar nos dias de hoje por depender muito da subjetividade do técnico, mas apresenta uma lógica de construção das linhas básicas interessante. Primeiramente, o especialista seleciona, dentre as linhas geradas pelo algoritmo, as linhas mais produtivas. Depois a rotina descarta a demanda relativa a essas linhas e recomeça o processo, que é interrompido quando toda a demanda for servida, ou seja, todos os pares O/D estiverem servidos por pelo menos uma das linhas. Para medir-se a produtividade, o pesquisador usou o critério de ‘passageiro x km’ sobre a extensão da linha. Essa lógica de atender a demanda primeiramente pelas ligações de maior carregamento também é utilizada por praticamente todos os métodos descritos no Capítulo da revisão bibliográfica. O método de SHIH & MAHMASSANI (1994), além de atender a esse critério na seleção das rotas candidatas, deveria permitir que o usuário selecionasse as que já se encontram adequadas para a operação, eliminando-as da interação que se seguiria para seleção das outras rotas.

Pouca informação se tem sobre o método de SAHLING. Por ter sido desenvolvido para um projeto de consultoria, e não ter sido publicado em periódicos científicos, as únicas informações disponíveis resumem-se às relatadas no artigo de AXHAUSEN & SMITH (1984). Além desse projeto, provavelmente muitos outros trabalhos práticos foram feitos na área, em todo o planeta, mas não há como determinar, com exatidão, a quantidade deles, nem como se conhecer as funções objetivo utilizadas. Se fosse possível o cadastro de projetos de consultoria em redefinição de redes de TPU, certamente muitos procedimentos adotados, e mesmo métodos formais desenvolvidos, poderiam ser aproveitados para melhorar o método escolhido.

⁵⁹ Seminar Verkehrswesen, Sommer Semester 1981: *Linienplanung*. Institutsnotiz 29. Instituts fuer Verkehrswesen der Universitaet Karlsruhe, West Germany, 1983 /description and application of SAHLING's model/

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A realização deste trabalho foi motivada pela falta de conhecimento e/ou interesse dos profissionais de transportes brasileiros em técnicas objetivas de Roteirização no Transporte Público Urbano por Ônibus. Por meio do levantamento do Estado da Arte dos métodos adequados para aplicação em grandes cidades, procurou-se dotar os especialistas de um documento que possa servir como uma das principais referências nacionais sobre o assunto.

O objetivo principal deste trabalho foi alcançado, já que se conseguiu estudar diversas técnicas de roteirização no TPU por ônibus que podem ser aplicadas a grandes sistemas de transporte reais, e escolher a que mais se adequa ao caso brasileiro. A verificação dos procedimentos adotados nos Estados Unidos e Canadá foi importante para se comparar com o que habitualmente é feito na prática da roteirização no Brasil, e assim obter-se parâmetros para mensurar as diferenças quanto a tecnologias e práticas adotadas.

Este último Capítulo se inicia com um resumo comentado do trabalho desenvolvido nesta pesquisa de mestrado. Em seguida são apresentadas as conclusões alcançadas com base na discussão desenvolvida no Capítulo 5. Finalmente, são dadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

6.1. Comentários sobre o Trabalho Desenvolvido

A redefinição das redes de transporte, mormente nas grandes cidades, mostrou-se indispensável nos dias atuais. Como discutido no início do Capítulo 4, e também no item 2.1.1, problemas que normalmente sofrem tentativas de solução atacando-se as fases de definição das frequências, de adequação nas tabelas horárias, e de alocação de frota e pessoal, só podem ser resolvidos em definitivo se o sistema de transporte for otimizado como um todo. Para isso, o conhecimento das técnicas de

roteirização é um fator de “mais valia” com o qual o especialista pode contar além de sua experiência técnica.

Uma pequena contribuição também foi dada no sentido de se divulgar trabalhos desenvolvidos no exterior, já que alguns dos textos técnicos publicados em língua inglesa que foram estudados nesta pesquisa foram traduzidos e adaptados para subsidiar o tema da Dissertação. Na área de Roteirização de TPU, muito pouco material está disponível em português. Alia-se a isto o fato de ainda haver uma certa rejeição ou dificuldade, por alguns técnicos brasileiros de transportes, de se ler em inglês. Assim, a simples tradução poderia contribuir para se incentivar o uso de algumas sugestões apresentadas no exterior e que se mostraram adequadas ao caso brasileiro. Mas mais importante do que a tradução em si, são os comentários feitos para deixar esses textos mais compreensíveis.

6.1.1 Sobre a Revisão dos Métodos

A revisão bibliográfica sobre os métodos de roteirização de ônibus em grandes cidades pode ser considerada completa, já que provavelmente cobre quase que totalmente todos os textos científicos publicados sobre o assunto, desde o início das publicações, na década de 1960, até o ano de 1998.

A revisão poderia ter sido estendida para métodos adequados somente a cidades pequenas e/ou médias. Assim, ter-se-ia um Estado da Arte sobre a Roteirização de Ônibus Urbanos. Porém, resolveu-se restringir o estudo, dando ênfase somente aos métodos que podem ser aplicados em grandes sistemas de transporte. Parte-se do pressuposto que estes podem ser aplicados em sistemas menos complexos, mas que a recíproca quase sempre não é verdadeira.

Assim, essa delimitação foi proposital, pois os maiores problemas de transporte urbano do país estão localizados nas grandes capitais. Isso não quer dizer que as cidades menores não possam se beneficiar desta pesquisa, pois todas as técnicas detalhadas são diretamente aplicáveis a cidades pequenas e médias. O único inconveniente está no fato desses métodos serem mais trabalhosos do que aqueles concebidos especificamente para sistemas de transporte menos complexos, conforme breves comentários no item 2.3.3.

Poder-se-ia não dar tanta ênfase ao modo ônibus, já que a rede de transporte urbano de passageiros deve ser considerada com um todo. Poder-se-ia considerar os artigos científicos e capítulos de livros escritos sobre roteirização de bonde, VLT, metrô, trem, etc. desde o início da seleção dos trabalhos publicados na área. Neste caso, ter-se-ia um Estado da Arte da Roteirização do Transporte Público Urbano.

Uma pesquisa bibliográfica sobre os modelos de escolha modal também provavelmente contribuiria para se entender a lógica do usuário não cativo, e com isso sugerir alterações nos métodos apresentados. Esse problema é minimizado pelo fato de alguns dos métodos considerar essa lógica, como o de CEDER & ISRAELI (1998).

6.1.2 Sobre o EPROLB

Como o EPROLB contemplou apenas redes grandes, onde normalmente são utilizadas transferências para otimizar o sistema, poderia ter sido questionado o grau de importância dado pelos órgãos gestores de transporte do país à limitação do número de transferências, quando planejam suas redes. Apesar dessa falha, o levantamento mostrou-se bastante útil para se conhecer o Estado da Prática no país.

6.2. Conclusões relativas à Roteirização no TPU

Com base na revisão bibliográfica do Estado da Arte em Roteirização no Transporte Público Urbano por Ônibus, e na análise dos procedimentos adotados na prática, no Brasil, nos EUA, e no Canadá, algumas conclusões foram alcançadas. As principais conclusões são listadas a seguir.

6.2.1 Conclusões Principais

- A)** Consideração somente dos Métodos com Base na Demanda – este critério mostrou-se totalmente pertinente, já que o uso de métodos que não consideram a demanda como variável do problema não são adequados para aplicação em sistemas de transporte complexos;
- B)** Projeto Multi-Modal do Sistema de Transportes – a visão sistêmica das redes de transporte urbano de passageiros mostrou-se essencial e indispensável para se atingir um nível de eficiência condizente com as demandas atuais por

transporte otimizado de custo adequado, mas somente o método escolhido, dentre os estudados, a contempla de forma minimamente aceitável;

- C) Necessidade de um Sistema Informatizado – essa necessidade foi comentada no item 5.2.2, e dentre as inúmeras vantagens pode-se salientar a melhor visualização e comparação gráfica, além da própria facilitação dos cálculos, busca e análise;
- D) Consideração da Experiência do Especialista – tanto pela revisão bibliográfica, na qual pôde-se ver que os métodos mais adequados permitem a interação do planejador de transportes no sistema, quanto pela levantamento EPROLB, no qual as respostas indicaram que os especialistas desejam participar ativamente do processo, percebe-se a importância de considerar os recursos humanos na forma de experiência técnica;
- E) Métodos Heurísticos vs. Métodos Exatos – no caso de problemas de otimização combinatória (COP), como é o caso da Roteirização no TPU, os modelos baseados em heurísticas mostraram-se atualmente mais adequados do que aqueles baseados em métodos exatos.

Uma conclusão esperada, mas não verificada, foi sobre a necessidade de interação no planejamento dos sistemas de Transportes com do Sistema Viário, de forma conjunta e simultânea. Na Seção 2.1 e em praticamente todo o Capítulo 4, viu-se a importância de se considerar a malha viária no planejamento do TPU. As condições de tráfego influenciam em muito a operação, e por isso tratamentos especiais devem ser dados para se priorizar o transporte coletivo em relação ao transporte privado. Porém, conforme discutido na Seção 5.2.3, isto não é um condicionante para se planejar os itinerários.

6.2.2 Características Básicas de um Sistema Informatizado para a Roteirização de TPU

Dadas as conclusões principais desta pesquisa de mestrado, propõe-se que se construa um sistema informatizado que tenha como plataforma um Sistema de Informações Geográficas para a redefinição de grandes redes de Transporte Público Urbano. Há demanda por uma ferramenta que auxilie os especialistas brasileiros para

a roteirização de linhas de TPU, notadamente pelo modo ônibus, e também na redefinição das redes de TPU. Acredita-se que os ganhos em termos de eficiência serão significativos, pois além de se aproveitar as vantagens do método escolhido (o de SHIH et al., 1998), poder-se-á contar com todas as vantagens dos SIG (ver no item 2.1.2).

Assim, esse sistema irá atender àquelas expectativas iniciais do trabalho: (a) garantir um atendimento otimizado à demanda (característica mais importante), dimensionando a oferta tanto do ponto de vista do operador quanto do usuário; (b) permitir a inserção de conceitos modernos de planejamento de sistemas de transporte, como possibilidade de operação coordenada, utilização de veículos com diferentes capacidades e características de operação, dentre outros; (c) possibilitar a análise de alternativas ordenadas por uma medida de valor, incluindo-se aspectos de nível de serviço ofertado e (d) possibilitar fácil e rica visualização gráfica dessas alternativas.

A alternativa à construção de um sistema como esse seria a utilização do software VIPS II, porém o mesmo mostrou-se inviável principalmente por dois fatores: seu alto custo e a característica de “pacote” fechado inerente à sua concepção, o que impede eventuais mudanças de variáveis a serem consideradas.

Talvez a dificuldade maior em se construir um sistema informatizado que tenha como objetivo definir Redes de Transporte Público Urbano ótimas em grandes cidades esteja não na modelagem, mas sim na sua implementação. Vários dos métodos propostos apresentam modelos adequados, que podem ser diretamente (ou com poucas modificações) usados na formulação matemática do problema. Já a implementação se torna mais difícil porque não depende somente dos conhecimentos e pessoal qualificado. O custo envolvido pode ser um limitante ou até impeditivo para a construção das rotinas. Recomenda-se que seja feito um amplo planejamento de material, pessoal e tempo necessários para a implementação, antes de se tentar construí-lo.

6.3. Recomendações para Trabalhos Futuros

O EPROLB poderia ter sido estendido a todas as cidades grandes do país, definindo-se por exemplo um limite de corte para considerar a cidade como detentora

de um grande sistema de transportes. Para tal, poder-se-ia usar o critério populacional, que mostrou-se adequado devido às respostas obtidas. Nelas pode-se notar que o tamanho do sistema está quase que diretamente proporcional à população servida.

Nisso surge o problema, já comentado, dos aglomerados urbanos. Dada as referências consultadas, não foi possível descobrir a população conurbada das metrópoles. Isso seria interessante, no sentido de que o sistema deve ser considerado como um todo, o que inclui o transporte metropolitano. Assim, a área conurbada que em geral se forma junto aos grandes eixos de tráfego que se dirigem da capital para as cidades vizinhas também deveria ser estimada. E, obviamente, as linhas de TPU, a frota necessária, os terminais e estações de integração, etc.

Sugere-se também que trabalhos futuros sejam feitos para se verificar a aplicabilidade dos métodos descritos em Sistemas de Informação Geográfica. Deve-se estudar também sobre a necessidade e adequação de ferramentas metaheurísticas para se realizar as buscas locais.

Como já explicitado, atualmente os modelos heurísticos apresentam-se superiores aos exatos, no sentido de alcançarem soluções próximas ao ótimo a um custo computacional significativamente menor. Métodos baseados em heurísticas apresentam melhores resultados também em outras áreas do conhecimento que lidam com problemas de otimização combinatória (ver em REEVES, 1993). Trata-se então de um incentivo ao teste de novas possibilidades, como o uso de metaheurísticas ou mesmo algoritmos miméticos (basicamente trata-se do uso combinado de duas metaheurísticas). O uso de algoritmos miméticos mostrou-se satisfatório, e foi proposto por MOSCATO⁶⁰ apud COSTA (1995) em 1993.

O ideal seria testar-se todos os modelos estudados na Seção 2.4 – Métodos Aplicáveis a Grandes Sistemas. Ou pelo menos, aqueles de maior consistência e simplicidade, além de terem disponibilizado informações suficientes para suas implementações, a saber: SHIH & MAHMASSANI (1994), CEDER & ISRAELI

⁶⁰ MOSCATO, D. (1993) On the use of some known methods for T-coloring on graphs. *Annals of Operations Research*, 41: 343-358.

(1998) e PATTNAIK et al. (1998). Esses são também os que melhor resumem o desenvolvimento alcançado pelos três principais grupos da comunidade científica mundial que atualmente exploram o tema. Porém, somente o primeiro desses três contém detalhamento das rotinas desenvolvidas. Assim, para que se pudesse testar e comparar numericamente os outros dois seria necessário um contato maior com os autores para requisição de material mais pormenorizado.

A utilização de Algoritmos Genéticos na busca local em redes tem sido utilizada com sucesso, e não só em redes de transporte, como em redes de comunicação de dados (ver em DENGIZ et al., 1997). Afinal, o princípio de busca por melhores caminhos é o mesmo, para a aplicação em ambos os casos. Assim, poder-se-ia usar o método de PATTNAIK et al. (1998) como base para incrementar o método de SHIH & MAHMASSANI (1994). A Busca Tabu também vem se mostrando interessante na resolução de problemas de localização de mínimos ou máximos locais. Ambos poderiam ser usados para se maximizar a busca, como foi feito em COSTA (1995).

Atualmente muitas aplicações utilizam algum Sistema de Informação Geográfica para, dentre outros motivos, possibilitar uma boa visualização do problema. No caso específico da roteirização no TPU, o SIG poderá possibilitar a consideração das diferentes características locais de cada zona da área que contém a rede. A análise visual do processo poderá portanto contribuir para a melhoria das funções objetivo que constam nos métodos analisados, pois pode-se mais facilmente identificar possíveis distorções no modelo. SHIH et al. (1998) inclusive reconhecem essa falha no método deles, e já estão trabalhando no “...desenvolvimento de uma habilidade gráfica para delinear a rede de TPU que foi gerada e para possibilitar testes numéricos maiores”.

No Brasil, têm-se boas experiências nessa área. A filosofia usada no desenvolvimento do SIGTRANS de ALENCAR & AQUINO (1994) é inclusive semelhante à proposta nesta Dissertação. Porém, atualmente, devido à facilidade de se comprar um SIG adequado, do ponto de vista tanto de funcionalidade quanto de custo, talvez seja mais interessante adquirir um “pacote” já disponível no mercado.

Uma das vantagens em se utilizar um sistema já em comercialização como plataforma (um SIG ou SIG-T) está na “queima” de etapas que se obtém. A construção de *add-ins* (novas funções, rotinas complementares) mostra-se eficiente, e tem sido largamente utilizada em todo o mundo. Muitos Sistemas de Informação Geográfica estão disponíveis no mercado brasileiro. A revista eletrônica FATORGIS (1999) traz uma lista dos softwares mais comercializados, juntamente com suas características principais.

Como comentário final, registra-se a intenção deste trabalho ter contribuído para que num futuro próximo métodos formais sejam utilizados na prática da Roteirização de Ônibus Urbanos, bem como na redefinição dos sistemas de transporte público das cidades brasileiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALENCAR, V. C.; AQUINO, M. S. (1994) Um sistema de informações geográficas para o planejamento de rotas de ônibus. *Anais do Congresso e Feira para Usuários de Geoprocessamento – GISBRASIL '94*. Curitiba, 17 a 21 de outubro.
- ANDRÉASSON, I. (1977) A method for the analysis of transit networks. *Advances in Operations Research*. pp. 1-8.
- ANTP – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS; NTU – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS; FÓRUM NACIONAL DE SECRETÁRIOS DE TRANSPORTE URBANO E DE TRÂNSITO (1999) *Modelos de relações institucionais e de investimento*. /<http://www.transpublico.org.br/> mai.
- AQUINO, W. J. S. (1980) *Uma abordagem do problema de definição de rede intraurbana de rotas de ônibus*. Dissertação (Mestrado). Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. (out)
- AXHAUSEN, K. W.; SMITH JR., R. L. (1984) Evaluation of heuristic transit network optimization algorithms. *Transportation Research Record*, 976:7-20.
- BAAJ, M. H.; MAHMASSANI, H. S. (1990) TRUST: a Lisp program for the analysis of transit route configurations. *Transportation Research Record*, 1283:125-135.
- BAAJ, M. H.; MAHMASSANI, H. S. (1991) An AI-based approach for transit route system planning and design. *Journal of Advanced Transportation*, 25[2]:187-210.
- BAAJ, M. H.; MAHMASSANI, H. S. (1995) Hybrid route generation heuristic algorithm for the design of transit networks. *Transportation Research - C*, 3[1]:31-50.
- BARNETT & KLEITMAN (1973) Optimal scheduling policies for some simple transportation systems. *Transportation Science*, 7[1]: 85-99. February.
- BHTRANS (1996) *Projeto BHBUS - Relatório 17: Base de Dados de Origem/Destino de Viagens*. BHTRANS - Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte S/A, Belo Horizonte, MG, rev. 1. (fev.)
- BILLHEIMER, J. W.; GRAY, P. (1973) Network design with fixed and variable cost elements. *Transportation Science*, 7[1]: 49-74. February.
- BLACK, A. (1995). *Urban mass transportation planning*. Singapore: McGraw-Hill, 1995. 411 p. (McGraw-Hill series in transportation)
- BRANDÃO, L. M. (1993) *O planejamento da estrutura dos serviços de transporte coletivo regular de passageiros em cidades de porte médio*. Dissertação (Mestrado): Escola Politécnica / USP, São Paulo, SP. Orientação: Prof. J. Waisman.
- BRUTON, M. J. (1979) *Introdução ao planejamento dos transportes*. trad. de J. B. F. Arruda, C. Braune e C. C. Oliveira Neto. EDUSP, São Paulo.
- BYRNE, B. (1976) Cost minimizing positions, lengths and headways for parallel public transit lines having different speeds. *Transportation Research*, 10:209-214.
- CALIPER CORPORATION (1996a) *TransCAD- transportation GIS software- travel demand modeling with TransCAD 3.0*.

- CARVALHO, A. P. L. F. (1997). *Algoritmos Genéticos*. <http://www.icmsec.sc.usp.br/~andre/gene1.html> (5/dez)
- CEDER, A. (1984) Bus frequency determination using passenger count data. *Transportation Research A*, 18A[5-6]:439-453.
- CEDER, A. (1985) Computer application for determining bus headways and timetables. *Transportation Research Record*, 1011:76-87.
- CEDER, A. (1986) Methods for creating timetables. *Transportation Research A*, 21A[1]:59-83.
- CEDER, A.; ISRAELI, Y. (1998) User and operator perspectives in transit network design. *Transportation Research Record*, 1623:3-7. Sep.
- CEDER, A.; STERN, H. (1981) Deficit function bus scheduling with dead-heading trip insertion for fleet size reduction. *Transportation Science*, 14[1]:19-34.
- CEDER, A.; WILSON, N. H. M. (1986). Bus network design. *Transportation Research - B*, 20B[4]:331-344.
- CHAKROBORTY, P.; DEB, K.; SUBRAHMANYAM, P. S. (1995) Optimal scheduling of urban transit systems using genetic algorithms. *Journal of Transportation Engineering*, 121[6]:544-552.
- CHAPLEAU, R.; ALLARD, B.; TRÉPANIÉ, M. (1996) Transit path calculation supported by special-transit information system. *Transportation Research Record* 1521: 98-107. Jul.
- CHIEN, S.; SCHONFELD, P. (1997) Optimization of grid transit system in heterogeneous urban environment. *Journal of Transportation Engineering*, 123[1]:28-35. Jan./Feb.
- CHOI, K.; JANG, W. (1998) Transit network development and transit demand modeling within integrated geographic information system using spatial analysis and dynamic segmentation. *Proceedings of the 8th World Conference on Transport Research (WCTR)*. Antwerp, Belgium. July 12-17.
- CHOU, Y.-H. (1995). Automatic bus routing and passenger geocoding with a geographic information system. *Proceedings of the 6th Vehicle Navigation and Information Systems Conference (VNIS)*. IEEE, Piscataway, NJ, USA, 95CH35776. pp. 200-205. /Resumo em Compendex Plus, 1997, Ref.
- CHUA, T. A.; SILCOCK, D. T. (1982) The practice of British bus operators in planning urban bus services. *Traffic Engineering and Control*,
- CLARKE, G.; WRIGHT, J. (1964) Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12[4]:568-581.
- COSTA, D. (1995) An evolutionary tabu search algorithm and the NHL scheduling problem. *INFOR*, 33(3):161-178.
- DREZNER, Z.; WESOŁOWSKY, G. O. (1997). Selecting an optimum configuration of one-way and two-way routes. *Transportation Science*, 31[4]:386-394, November.
- DUBOIS, D.; BEL, G.; LLIBRE, M. (1979) A set of methods in transportation network synthesis and analysis. *Journal of Operational Research Society*, 39[9]:797-808.
- FATORGIS (1999) *Softwares relacionados a geoprocessamento e ciências geodésicas à disposição no mercado brasileiro*. <http://www.fatorgis.com.br/softwares/softwares.htm> (03/jun)

- FERRAZ, A. C. P. (1990) *Sobre a eficiência e a eficácia do transporte público nas cidades médias*. Tese (Livre-Docência). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 157 p.
- FERREIRA, F. E. (1993) *Análise da rede viária, utilizando técnicas de sensoriamento remoto, visando o planejamento da rede de transporte urbano por ônibus: um estudo de caso*. Dissertação (Mestrado): Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas / UFSC, Florianópolis, SC. Orientação: Prof. C. Loch.
- FURTH, P. G. (1986) Zonal route design for transit corridors. *Transportation Science*, 20[1]: 1-12. February.
- FURTH, P. G.; WILSON, N. H. M. (1981) Setting frequencies on bus routes: theory and practice. *Transportation Research Record*, 818:1-7.
- HASSELSTRÖM, D. (1977) A method for the analysis of transit networks. *Advances in Operations Research*. pp. 199-206.
- HASSELSTRÖM, D. (1981). *Public transportation planning – mathematical programming approach*. Department of Business Administration, University of Gothenburg, Gothenburg, Sweden.
- HOC, H. H. (1973) A computational approach to the selection of an optimal network. *Management Science*, 19[5]:488-498. Jan.
- HSU, J.; SURTI, V. H. (1975) Framework of route selection in bus network design. *Transportation Research Record*, 546:44-57.
- HSU, J.; SURTI, V. H. (1977) Decomposition approach to bus network design. *Transportation Engineering Journal*, 103[4]:447-459. Jul.
- HURDLE, V. F. (1973a) Minimum cost schedules for a public transportation route – I. theory. *Transportation Science*, 7[2]:109-137. May.
- HURDLE, V. F. (1973b) Minimum cost schedules for a public transportation route – II. examples. *Transportation Science*, 7[2]:138-157. May.
- HURDLE, V. F. (1973c) Minimum cost locations for parallel public transportation lines. *Transportation Science*, 7:97-102.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (1996) *Relatório estatístico anual* /home page/ (04/nov/97)
- IMAM, M. O. (1998) Optimal design of public bus service with demand equilibrium. *Journal of Transportation Engineering*, 124[5]:431-436. Sep./Oct.
- KAWAMOTO, E. (1994a) Subjective value of time and comfort: a semicompensatory model choice approach. *Proceedings of the 7th. International Conference on Travel Behavior – IATBR94*. Valle Nevado, Santiago, Chile. 13-16 June. pp. 519-530.
- KIKUCHI, S. (1985) Relationship between the number of stops and headway for a fixed-route transit system. *Transportation Research A*, 19A[1]:65-71.
- KOCUR, G.; HENDRICKSON, C. (1982) Design of local bus service with demand equilibrium. *Transportation Science*, 16[2]:149-170. May.
- KUAH, G. K.; PERL, J. (1988) Optimization of feeder bus routes and bus-stop spacing. *Journal of Transportation Engineering*, 114[3]:341-354.
- LAMPKIN, W.; SAALMANS, P. D. (1967) The design of routes, service frequency and schedules for a municipal bus undertaking: a case study. *Operational Research Quarterly*, 18[4]:375-397. Dec.
- MACHADO, P. L. B (1998) A operação do corredor São Mateus / Jabaquara. *Revista dos Transportes Públicos*, 20:23-36. ANTP. (1º. trim.)

- MAHA, Y. B. (1997) *Metodologia para a definição dos corredores de ônibus urbanos com a aplicação da Sintaxe Espacial*. Dissertação (Mestrado). Mestrado em Transportes Urbanos, ENC/FT/UnB, Brasília, DF. Orientação: Prof. Y. Yamashita.
- MANDL, C. E. (1979) *Applied network optimization*. Academic Press, New York.
- MANDL, C. E. (1980) Evaluation and optimization of urban public transportation networks. *European Journal of Operational Research*, 5[6]:396-404. Dec.
- MARWAH, B. R.; UMRIGAR, F. S.; PATTNAIK, S. B. (1984) Optimal design of bus routes and frequencies for Ahmedabad. *Transportation Research Record*, 994:41-47.
- MARWAH, B. R.; MADHUGIRI, A. (1998) Optimal design of feeder bus routes for a mass rapid transit system. In FREEMAN, P.; JAMET, C. *Urban Transport Policy – a sustainable development tool*. A.A. Balkema, Rotterdam. Proceedings of the International Conference VIII CODATU. Cape Town, South Africa. 21-25 Sept.
- MERCEDES-BENZ DO BRASIL S.A. (1987) *Sistema de transporte coletivo urbano por ônibus – planejamento e operação*. Departamento de Sistemas de Trânsito e Transporte, São Bernardo do Campo, SP. 85 p.
- MICHAELIS: moderno dicionário da língua portuguesa (1998) Companhia Melhoramentos. São Paulo.
- NEWELL, G. F. (1979). Some issues relating to the optimal design of bus routes. *Transportation Science*, 13[1]:20-35. Feb.
- NEWELL, G. F.; VUCHIC, V. R. (1968) Rapid transit interstation spacing for minimum travel time. *Transportation Science*, 2:303-309.
- NTU – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS (1998) *Transporte público urbano – crise e oportunidades. Pesquisa nacional – NTU. Conclusões do simpósio*. Brasília: NTU. 75 p. out.
- OLIVEIRA JR., J. A. (1996) *Planejamento, política de transportes e desenvolvimento regional*. IPLANCE, Fortaleza – CE, 188 p.
- ORRICO FILHO, R. D.; BRASILEIRO, A.; SANTOS, E. M.; ARAGÃO, J. J. G. (1996) *Ônibus urbano: regulamentação e mercados*. Brasília: L.G.E.. 304 p.
- OSUNA, E. E.; NEWELL, G. F. (1972) Control strategies for an idealized public transportation system. *Transportation Science*, 6:52-72.
- PATTNAIK, S. B.; MOHAN, S.; TOM, V. M. (1998) Urban bus transit route network design using genetic algorithm. *Journal of Transportation Engineering*, 124[4]:368-375. Jul./Aug.
- PEREIRA, W. A. A. (1998) Tendências observadas para os próximos anos. *Revista dos Transportes Públicos*, 80: 25-31. ANTP. (3º. trim.)
- RAMIREZ, A. I.; SENEVIRATNE, P. N. (1996) Transit route design applications using geographic information systems. *Transportation Research Record* 1557: 10-14. Nov.
- REA, J. C. (1972) Designing urban transit systems: an approach to the route technology selection problem. *Highway Research Record*, 44:48-59.
- REEVES, C. R. (ed.) (1993) *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*. Ed. John Wiley & Sons, New York, EUA, 320p.
- REEVES, C. R.; BEASLEY, J. E. (1993) Introduction to combinatorial problems, local and global optima, and Heuristics In.: Reeves, C. R. (ed.) *Modern heuristic*

- techniques for combinatorial problems*. Ed. John Wiley & Sons, New York, EUA, 320p.
- ROSELLO, X. (1977) An heuristic algorithm to generate an urban buses network. *Advances in Operations Research*. Elsevier, Amsterdam. pp. 409-419.
- SANCHES, S. P. (1988) *Contribuição à análise operacional de redes de transporte coletivo em cidades de porte médio*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. Orientação: Prof. J. A. Widmer.
- SANTOS, C. M. (1999) *A viabilização de softwares comerciais na roteirização de veículos de serviços de entregas, visando a geração de respostas rápidas e eficientes*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. Orientação: Prof. E. M. Aguiar.
- SHEFFI, Y. (1985) *Urban transportation networks*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 399p.
- SHIH, M.-C.; MAHMASSANI, H. S. (1994) *A design methodology for bus transit networks with coordinated operations*. Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, EUA, 185 p. Aug.
- SHIH, M.-C.; MAHMASSANI, H. S.; BAAJ, M. H. (1998) Planning and design model for transit route networks with coordinated operations. *Transportation Research Record*, 1623:16-237. Sep.
- SILVA, M. C. F. (1996) População opina sobre os serviços de ônibus em São Paulo e Belo Horizonte. *Revista dos Transportes Públicos*, 75. ANTP. (4º. trim.)
- SILVA, A. N. R.; FERRAZ, A. C. P. (1991) *Transporte público urbano – operação e administração: notas de aula*. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Transportes. Publicação 063/91. São Carlos. (jul.)
- SOARES, N. B. (1982) *Determinação de itinerários de um sistema de transporte coletivo através de ônibus: um processo aplicável em cidades de porte médio [Aracaju – SE]*. Dissertação (Mestrado). Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- STOCKHOLM TRANSPORT (1987a) Computerized planning of transport network – VIPS II. *Workshop Report for the 47th International Congress of UITP*. Lausanne.
- STOCKHOLM TRANSPORT (1987b) VIPS II – New computer system for public transit planning. *Report for the American Public Transit Association Annual Meeting*. San Francisco.
- TACO, P. W. G. (1997) *Modelo de geração de viagens com aplicação dos Sistemas de Informação Geográfica e Sensoriamento Remoto*. Dissertação (Mestrado): Departamento de Engenharia Civil / UnB, Brasília, DF. Orientação: Profª. Y. Yamashita.
- TRB – TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Transit Cooperative Research Program. (1995) *Synthesis of Transit Practice 10: Bus route evaluation standards*. National Academy Press, Washington.
- TSAO, S.; SCHONFELD, P. (1984) Branched transit services: an analysis. *Journal of Transportation Engineering*, 110[1]:112-128.
- VAN NES, R.; HAMERSLAG, R.; IMMERS, B. H. (1988) Design of public transport networks. *Transportation Research Record*, 1202:74-83.

- VAN OUDHEUSDEN, D. L.; RANJITHAN, S.; SINGH, K. N. (1987) The design of bus routes systems - an interactive location-allocation approach. *Transportation*, 14[3]:252-270.
- VUCHIC, V. R. (1981). *Urban public transportation: systems and technology*. Englewood Cliffs, New Jersey, USA: Prentice-Hall. 673p.
- WHITE, P. (1995). *Public transport: its planning, management and operation*. UCL Press, London, 3rd. ed.
- WILSON, A. G. (1998). Land-use / transportation interaction models. *Journal of Transport Economics and Policy*, 32[1]:3-26, Jan.

OBRAS CONSULTADAS

- AFFUM, J. K. (1998) Integration of geographic information systems and models for transport planning and analysis. *Proceedings of the 8th World Conference on Transport Research (WCTR)*. Antwerp, Belgium. July 12-17.
- AHUJA, R. K.; MAGNANTI, T. L.; ORLIN, J. B. (1993) *Network flows: theory, algorithms, and applications* Ed. Prentice-Hall, Englewoods Cliffs, USA.
- BAAJ, M. H.; ASHUR, S. A.; CHAPARROFARINA, M.; PIJAWKA, K. D. (1995) Design of routing networks using geographic information systems: applications to solid and hazardous waste transportation planning. *Transportation Research Record*, 1497:140-144. Jul.
- BUSTILHOS, J. A. R. T. (1996) Sistemas tronco-alimentadores de transporte coletivo – metodologia para melhorar e avaliar a operação de uma linha troncal de tipologia diametral. *Anais do IX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET*. São Carlos, 28 de junho a 02 de julho. pp. 1047-1058.
- CALIPER CORPORATION (1996b) *GISDK – Geographic information system developer's kit: programmer's guide – for use with Maptitude, GIS+ and TransCAD*.
- CEDER, A.; ISRAELI, Y. (1996) Public transportation assignment with passenger strategies for overlapping route choice. In LESORT, J.-B. (ed.) *Transportation and Traffic Theory. Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*. Pergamon: Lyon, France, 24-26 July.
- DÍAZ, A. (coord.); GLOVER, F.; GHAZIRI, H. M.; GONZÁLEZ, J. L.; LAGUNA, M.; MOSCATO, P.; TSENG, F. T. (1996). *Optimización heurística y redes neuronales*. Ed. Paraninfo, Madrid, 235p.
- DOT - U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Federal Transit Administration. Office of Technical Assistance. Prepared by: SCHWEIGER, C. L.; KIHLE, M.; LABELL, L. N. (1994) *Advanced public transportation systems: the state of the art, update '94*. Washington, D.C., USA: DOT, January. 133p.
- FERREIRA, F. E.; SÁ, L. A. C. M.; LOCH, C.; MAYERLE, S. F. (1993) Metodologia para o planejamento da rede transportes coletivos urbanos por ônibus. *Anais do VIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET*. Recife. pp. 529-539.
- FU, L.; RILETT, L. R. (1995). Estimation of expected minimum paths in dynamic and stochastic traffic networks. *Proceedings of the 6th Vehicle Navigation and Information Systems Conference (VNIS)*. IEEE, Piscataway, NJ, USA, 95CH35776. pp. 200-205. /Resumo em Compendex Plus, 1995, Ref.04265714/
- GREGORIM, C. O. (1997) *Melhoramentos: gramática prática da língua portuguesa*. São Paulo: Companhia Melhoramentos. 632 p.
- HAN, A. F.; WILSON, N. H. M. (1982). The allocation of buses in heavily utilized networks with overlapping routes. *Transportation Research B*, 16B[3]:221-232.
- HOBEIKA, A. G.; CHU, C. (1981). Equilibration of supply and demand in designing bus routes for small urban areas. *Transportation Research Record*, 730:7-13.
- HOLZMAN, A. G. (ed.) (1981). *Mathematical programming for operations researchers and computer scientists*. New York: Marcel Dekker. Vol. 6 of Industrial Engineering. 373p.

- HUNT, D. T.; STILL, S. E.; CARROLL, J. D.; KRUSE, A. O. (1986) A geodemographic model for bus service planning and marketing. *Transportation Research Record*, 1051:1-12.
- JANARTHANAN, N.; SCHNEIDER, J. (1984) Reducing the energy requirements of suburban transit services by route and schedule redesign. *Transportation Research Record*, 994:47-57.
- KADI, D.; KERBACHE, L. (1998) The vehicle routing problem: a neural networks approach. *Proceedings of the 8th World Conference on Transport Research (WCTR)*. Antwerp, Belgium. July 12-17.
- KAWAMOTO, E. (1994b). *Análise de sistemas de transporte*. São Carlos: EESC/USP. apostila 2ª. ed. 229p.
- LIMA, L. C.; GRANJA, L. Z.; SILVA, M. C. T.; MORA-CAMINO, F. A. C. (1987). Otimização de um Sistema de Transporte Público Urbano: uma abordagem de equilíbrio. *Revista dos Transportes Públicos*, 36. São Paulo: ANTP, junho.
- LUTIN, J. M.; LIOTINE, M.; ASH, T. M. (1981) Empirical models of transit service areas. *Transportation Engineering Journal*, 107[4]:421-444.
- MAGNANTI, T. L.; WONG, R. T. (1984) Network design and transportation planning: models and algorithms. *Transportation Science*, 18[1]:1-55. Feb.
- MEIRELLES, A. A. C.; SILVA, R. C.; AMARAL, F. M. P. (1998) O planejamento de transportes no contexto do planejamento urbano de Belo Horizonte. *Anais do IX Congresso Latino-americano de Transporte Público Urbano - CLATPU*. Guadalajara, 28 de junho a 02 de julho. CD-ROM.
- RABBANI, S. J. R.; RABBANI, S. R. (1996) *Decisions in transportation with the analytic hierarchy process*. Campina Grande: UFPB/CCT. 200p.
- SHIH, M.-C.; MAHMASSANI, H. S. (1995) Vehicle sizing model for bus transit networks. *Transportation Research Record*, 1452:35-41.
- SHIH, M.-C.; MAHMASSANI, H. S.; BAAJ, M. H. (1997) Trip assignment model for timed-transfer transit systems. *Transportation Research Record*, 1571:24-30.
- SILVA, A. N. R.; MARQUES, H. N. (1998) Um sistema de informações geográficas a serviço dos usuários de transporte público urbano. *Anais do IX Congresso Latino-americano de Transporte Público Urbano - CLATPU*. Guadalajara, 28 de junho a 02 de julho. CD-ROM.
- SOUZA, A. T. P. (1993) *Uma contribuição à solução do problema de roteamento considerando os objetivos conflitantes dos usuários e operadores (sistema de ônibus fretado)*. Dissertação (Mestrado). Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. Orientação: Prof. C. D. Nassi. ago.
- SOUZA, A. T. P. ; NASSI, C. D. (1995) Uma contribuição a solução do problema de roteamento considerando os objetivos conflitantes dos usuários e operadores (sistema de ônibus fretado). *Transportes*, 3[1]:91-109. mai.
- UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola de Engenharia de São Carlos. Serviço de Biblioteca (1993). *Diretrizes para elaboração de dissertações e teses na EESC-USP*. São Carlos.
- WAGNER, H. M. (1986). *Pesquisa operacional*. Prentice-Hall do Brasil, Rio de Janeiro, 2a. ed. 851p. Mariotto, P. A. (trad.) e Mariotto, F. L. (sup. trad.).
- WIRASINGHE, S. C.; LIU, G. (1995). Optimal schedule design for a transit route with one intermediate time point. *Transportation Planning and Technology*, 19[2]:121-145. /Resumo em Compendex Plus, 1995, Ref.04350990/