

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

**Avaliação Comparativa de Tecnologia de Transporte
Público Urbano: Ônibus x Transporte Público
Individualizado**

Leonardo Hitoshi Hotta

Orientador: Prof. Associado Antônio Nélon Rodrigues da Silva

Dissertação apresentada ao Departamento de Transportes, da Escola de Engenharia de São Carlos (Universidade de São Paulo-USP), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes – Área: Planejamento e Operação de Sistemas de Transporte.

São Carlos

2007

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

H834a Hotta, Leonardo Hitoshi
Avaliação comparativa de tecnologia de transporte público urbano : ônibus x transporte público individualizado / Leonardo Hitoshi Hotta ; orientador Antônio Néelson Rodrigues da Silva. -- São Carlos, 2007.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

1. Transporte urbano. 2. PRT. 3. Transporte público individualizado. 4. Avaliação de projetos de transportes. 5. Transporte público urbano. 6. AHP. I. Título.

Aos meus pais, Tereza e Shunsuke,
por não terem dado tudo que eu quis, mas por terem dado tudo que eu precisei.

Agradecimentos

Aos meus pais Tereza e Shunsuke pelo apoio incondicional em tudo que eu fiz. Aos meus irmãos Suely, Michel e Aurélio pela compreensão e torcida naquilo que eu escolhi. Aos meus avós Satiko e Yoshiharu (*in memorian*), e Some (*in memorian*) e Mitsushi pela lição de vida que me passaram. Aos meus tios e primos pelos momentos de convivência nestes anos.

Ao Prof^o Antônio Nélon pela formação, dedicação e, sobretudo, pela paciência em ser meu orientador neste mestrado. Devo muito do meu crescimento acadêmico à sua perseverança.

Aos professores da EESC pela formação acadêmica, e em especial os professores Leomar, que me ajudou nos primeiros passos na pesquisa e incentivou o desenvolvimento na pós-graduação, Eiji, por ensinar conceitos fundamentais para este trabalho, Widmer, que me ensinou a olhar diferente a engenharia, Manoel, pelas desavenças que ajudaram no amadurecimento do meu conhecimento científico, Setti, que me ensinou a usar o *Integration*, Javier, pelo talento em ensinar engenharia, José Eduardo, por me alertar sobre as dificuldades do curso e ter alugado a casa que me acolheu nos anos da faculdade e Samuel, grande incentivador no aprendizado da engenharia. Aos funcionários, pelos serviços prestados e, em especial, a Magaly pela companhia.

Aos pesquisadores e usuários que participaram da avaliação, sem se importar com o tempo dispendido nesta atividade, sem a qual seria impossível o desenvolvimento deste trabalho. Aos professores Coca e Cacá pela participação na banca de Qualificação e idéias sugeridas para este trabalho.

À Sueli, Roberto, Kaio, Alzira e Vicente por ter me acolhido na família e especialmente à Karol, com que dividi os melhores e mais difíceis momentos na vida.

Aos colegas da Prefeitura de São Carlos pelos ensinamentos e amizade nestes anos de convivência, pela cessão de dados e permissão para realizar este trabalho.

São tantos que não citarei os nomes, para não correr o risco de esquecer alguém.

Aos bródis da república: Farzin, Ferdinando, Jucá, Leandro Lima, Leonardo Massaro, Leonardo Ribeiro, Maurício, Nilson e Paulo, e aos guris: Ariel, Aruan, Douglas, Emerson, Filipe, Gustavo, Polli pelos anos de convívio, bagunça e muita amizade.

Aos engenheiros Leonel, Leopoldo, Arlindo, Valdir, Mário e Elpídio pelas oportunidades de aprendizado e de crescimento profissional.

Aos colegas de graduação e pós-graduação da EESC que tornaram tempos tão difíceis em tempos inesquecíveis. São tantos que não citarei para não incorrer na injustiça de esquecer alguém.

Aos professores e colegas da ETE Presidente Vargas e EEPG Profº João Cardoso dos Santos de Mogi das Cruzes pelo aprendizado, convívio e incentivo no início de tudo. Aos colegas do Seinenkai de Biritiba Ussu pela amizade e alegria que partilhamos.

Às pessoas que não citei anteriormente, mas que de alguma forma, estiveram e estão comigo nesta jornada.

“O conhecimento é neutro, desprovido de valor – pode tanto nos levar a realizações maravilhosas quanto atender propósito terríveis.”

John Gray

Resumo

HOTTA, L. H. *Avaliação Comparativa de Tecnologia de Transporte Público Urbano: Ônibus x Transporte Público Individualizado*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

Este trabalho apresenta uma metodologia para avaliação de novas tecnologias de transporte público urbano. O objetivo é aplicar esta metodologia para tornar possível a comparação entre diferentes tecnologias para o transporte público. Este trabalho também considera ainda a introdução de uma nova tecnologia em uma cidade média brasileira. Trata-se do Transporte Público Individualizado (TPI) ou *Personal Rapid Transit* (PRT), como potencial substituto do ônibus. O TPI, que é uma tecnologia pouco conhecida, porém tem um potencial a ser explorado, já que possui características de transporte individual e ao mesmo tempo, é um serviço de transporte público. A metodologia consiste em duas etapas: a primeira etapa emprega a técnica conhecida como *Analytic Hierarchy Process* (AHP), que já foi utilizada para avaliar projetos de transporte que envolvem atributos de diferentes naturezas e que são de difícil comparação utilizando outras técnicas. A estrutura desenvolvida contemplou a seleção de critérios, a determinação dos pesos dos critérios, o levantamento dos dados de cada tecnologia para comparação, a comparação dos dados das tecnologias dentro de cada critério e, por fim, a determinação da tecnologia mais adequada. Dois grupos de avaliadores foram considerados: pesquisadores especialistas em transporte público e usuários. A segunda etapa consiste em comparar diretamente o desempenho operacional das tecnologias. Foram comparados o tempo de atendimento, a capacidade máxima de atendimento, o tempo de viagem por passageiro e pelo sistema. A avaliação da primeira etapa deu ao TPI uma ligeira vantagem para os dois grupos, o que pode evidenciar a necessidade de se modificar o conceito de transporte público urbano. A avaliação para a segunda etapa demonstrou que o TPI atenderia a demanda numa cidade média com qualidade superior ao ônibus, porém a capacidade de atendimento, na forma apresentada, é inferior ao ônibus. Com base nos resultados, o TPI surge como uma alternativa interessante ao ônibus, porém sofre restrições por conta de seu alto custo de investimento.

Palavras-chave: PRT, transporte público individualizado, avaliação de projetos em transportes, transporte público urbano, AHP

Abstract

HOTTA, L. H. *A comparative assessment of transit technologies: bus x personal rapid transit (PRT)*. Thesis (Master's) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2007.

This work discusses a methodology for the appraisal of new technologies of urban public transportation. The objective is to apply such a methodology to make possible a comparison of different technologies for public transportation. This work also considers the introduction of the Personal Rapid Transit (PRT) in a Brazilian medium-sized city as a potential candidate to replace the traditional bus technology. Although not yet a widespread alternative, PRT is a promising transportation technology, given its characteristics of individual transportation and, at the same time, the status of public service. The methodology consists in two steps: the first one uses the well-known technique named Analytic Hierarchy Process (AHP), which has already been extensively used to assess transportation projects that involve different attributes and that cannot be easily compared with other techniques. The framework developed had the following phases: selection of criteria, identification of criteria weights, identification and comparison of the characteristics of each technology under comparison, and determination of the best alternative. Two groups of evaluators were considered in the analysis: experts and regular users of urban public transportation. The second phase is a direct comparison of the operational performance of the technologies under analysis. The analysis was done through the comparison of services times, maximum service capacity, and travel times per passenger and in the entire system. The final outcome of the evaluation has shown a slight advantage to PRT for both groups, what can suggest the need for changing the current view of urban public transportation. The second part of the evaluation has demonstrated that PRT could serve the demand of a medium-sized city with a higher level of service, although with capacity constraints in the case considered. The results suggest that PRT can be an interesting alternative to bus, if not limited by the very high investment costs.

Key words: PRT, personal rapid transit, transportation project assessment, urban public transportation, AHP

Lista de figuras

Figura 2.1: Classificação geral dos modos de transporte urbanos	6
Figura 2.2: Ilustração de uma estação do TPI	7
Figura 2.3: Esquema da estação do TPI	8
Figura 2.4: Ilustração da estação do TPI	8
Figura 2.5: Acesso a bicicletas	8
Figura 2.6: Acesso a cadeirantes	8
Figura 2.7: Veículo do TPI	9
Figura 2.8: Veículo do TPI	9
Figura 2.9: Cabintaxi em operação	14
Figura 2.10: Vista parcial do sistema	15
Figura 2.11: Vista da estação	15
Figura 2.12: Veículo do CVS	15
Figura 2.13: Estrutura do CVS	15
Figura 2.14: Vista do projeto ULTra	17
Figura 2.15: Veículo do ULTra	17
Figura 2.2: Fluxograma da simulação de atendimento à demanda no TPI	41
Figura 2.2: Imagem da simulação de uma via com uma estação	43
Figura 2.2: Imagem da rede resultante no <i>Integration</i>	49
Figura 5.1: Peso relativo dos atributos	55
Figura 5.2: Carregamento dos links simulados através do SIG	61

Lista de equações

Equação 3.1 – Equação para cálculo do Índice de Consistência	28
Equação 3.2 – Equação para cálculo do Grau de Consistência	29
Equação 4.1 – Equação para estimativa da distância entre veículos	43
Equação 4.2 – Equação para estimativa da densidade do fluxo de veículos	44
Equação 4.3 – Equação para estimativa do fluxo de veículos	44
Equação 4.4 – Equação para estimativa da constante c_1	44
Equação 4.5 – Equação para estimativa da constante de calibração c_2	44
Equação 4.6 – Equação para estimativa da constante de calibração c_3	44
Equação 4.7 – Equação para estimativa da constante de calibração c_{vc}	44

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Escala de importância definida por Saaty.....	26
Tabela 3.2 – Exemplo de julgamento de critérios.....	26
Tabela 3.3 – Cálculo dos somatórios dos pesos da avaliação	27
Tabela 3.4 – Matriz de comparação par a par normalizada	27
Tabela 3.5 – Autovetor	27
Tabela 3.6 – Cálculo do autovalor	28
Tabela 3.7 – Valor de RI	28
Tabela 4.1 – Escala de importância de projeto.....	38
Tabela 5.1 – Peso relativo dos aspectos econômico, ambiental e social	51
Tabela 5.2 – Peso relativo dos atributos econômicos	52
Tabela 5.3 – Peso relativo dos atributos ambientais	53
Tabela 5.4 – Peso relativo dos atributos sociais.....	53
Tabela 5.5 – Avaliação das tecnologias	56
Tabela 5.6 – Comparação entre as tecnologias	57
Tabela 5.7 – Padrão de chegadas observado	58
Tabela 5.8 – Padrão de chegadas simulado	58
Tabela 5.9 – Simulação do tempo de atendimento	59
Tabela 5.10 – Velocidade operacional média dos veículos	62
Tabela 5.11 – Características da viagem por ônibus coletados	63
Tabela 5.12 – Características da viagem simulada por TPI	63

Lista de abreviaturas e siglas

TPI – Transporte Público Individualizado
PRT – Personal Rapid Transit
PAT – Personal Automated Transit
ULTra – Urban Light Transport
AHP – Analytic Hierarchy Process
VLT – Veículo Leve sobre Trilhos
APM – Automated People Mover
AGT – Automated Guideway Transit
UMTA – Urban Mass Transportation Administration
CVS – Computer Controlled Vehicle System
ATS – Advanced Transport System Ltd.
AVC – Automatic Vehicle Control
AVO – Automatic Vehicle Operation
AVP – Automatic Vehicle Protection
VPL – Valor Presente Líquido
TIR – Taxa Interna de Retorno
TIR Δ – Taxa Interna de Retorno Incremental
B/C – Razão Benefício/Custo
B/C – Razão Benefício/Custo Incremental
Kg – quilograma
h – hora
m – metro
kW – kilowatt
dBA – decibel
MJ – megajoule
km – quilômetro
a – aceleração
k – densidade de fluxo
k_j – densidade de congestionamento
v – velocidade
v_f – velocidade de fluxo livre
c₁ – constante de calibração 1
c₂ – constante de calibração 2
c₃ – constante de calibração 3
c_{vc} – coeficiente de ajuste velocidade na capacidade
v_c – velocidade correspondente à capacidade
q_c: fluxo de saturação
t_r – tempo de reação
% – percentagem
s – segundo
n – número de critérios
a_{ij} – elemento *a* da linha *i* e coluna *j*
CI – Índice de Consistência – (*Consistency Index*)
RI – Índice de Aleatoriedade – (*Random Index*)
CR – Grau de Consistência – (*Consistency Ratio*)
FIFO – *First In, First Out*

veíc – veículo
OD – Origem – Destino
Máx. – Máximo
Mín. – Mínimo
Oper./Manut – Custo de operação e manutenção
Intr. visual – Intrusão visual
Estrut. Urb – Adequação à estrutura urbana
Cons. Energia – Consumo de energia
Pol. Atmosf – Poluição atmosférica
Pol. Son – Poluição sonora
Acessib – Acessibilidade
Confiab. – Confiabilidade
Transbord. – Transbordabilidade
Pto Médio – Ponto médio
Amos. – Amostras
% Acum – Percentagem acumulada
processam. – Processamento
nº – número
pass. – passageiros
SIG – Sistema de Informações Geográficas
Dist – Distância
Vel. – velocidade
Exten. – Extensão
TPU – Transporte Público Urbano

Lista de símbolos

λ_{\max} – autovalor
 Δ_x – distância entre os veículos
 ε_{pos} – erro de posição
 Σ – Somatório

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	1
1.2. JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	3
1.3. OBJETIVO	4
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2. TRANSPORTE PÚBLICO INDIVIDUALIZADO	5
2.1. CONCEITO	5
2.2. HISTÓRICO	13
2.3. PROJETO ULTRA	16
3. AVALIAÇÃO DE PROJETOS EM TRANSPORTE	19
3.1. INTRODUÇÃO	19
3.2. TÉCNICAS	20
3.3. ANÁLISE MULTICRITÉRIO	24
4. METODOLOGIA.....	29
4.1. SELEÇÃO DE TECNOLOGIA.....	30
4.1.1. SELEÇÃO DE CRITÉRIOS	30
4.1.2. DETERMINAÇÃO DOS PESOS DOS CRITÉRIOS	34
4.1.3. LEVANTAMENTO DOS DADOS DE CADA TECNOLOGIA PARA COMPARAÇÃO.....	36
4.1.4. COMPARAÇÃO DOS DADOS DAS TECNOLOGIAS DENTRO DE CADA CRITÉRIO	37
4.1.5. DETERMINAÇÃO DA TECNOLOGIA MAIS ADEQUADA	38
4.2. AVALIAÇÃO DA TECNOLOGIA.....	38
4.2.1. AVALIAÇÃO DO TEMPO DE ATENDIMENTO	38
4.2.2. DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE MÁXIMA	41
4.2.3. AVALIAÇÃO DO TEMPO DE VIAGEM POR PASSAGEIRO.....	45
4.2.4. AVALIAÇÃO DO TEMPO DE VIAGEM GLOBAL	46
5. RESULTADOS E ANÁLISES	49
5.1. SELEÇÃO DA TECNOLOGIA.....	49
5.2. AVALIAÇÃO DA TECNOLOGIA.....	56
5.2.1. AVALIAÇÃO DO TEMPO DE ATENDIMENTO	57
5.2.2. DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE MÁXIMA	58
5.2.3. AVALIAÇÃO DO TEMPO DE VIAGEM POR PASSAGEIRO.....	61
5.2.4. AVALIAÇÃO DO TEMPO DE VIAGEM GLOBAL	62
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	63
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
APÊNDICES	82

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será feita uma breve descrição do problema, que é a necessidade de se considerar novas tecnologias de transporte público em cidades brasileiras, assim como a justificativa para sua introdução e o objetivo que se pretende atingir com este trabalho. Ainda neste capítulo será apresentada a estrutura deste trabalho.

1.1. Caracterização do Problema

Com o contínuo aumento de pessoas morando em áreas urbanas e conseqüentemente do seu tamanho, as cidades ao redor do mundo têm enfrentado muitos problemas para fornecer transporte eficaz para a população. Em decorrência disso, o transporte trouxe uma série de problemas: congestionamentos, acidentes, poluição, perda de qualidade de vida e custos crescentes.

Estes problemas são agravados pelo uso cada vez mais intenso do transporte individual em detrimento do transporte público, já que este não tem os atrativos do transporte individual: maior flexibilidade no tempo e no espaço, oferece

deslocamento porta a porta, conforto, privacidade, agilidade e supostamente confere status para o proprietário.

Porém o transporte individual trouxe uma série de conseqüências negativas, tais como: aumento da poluição e do consumo de energia, quase que exclusivamente de fontes não-renováveis. É um meio excludente, uma vez que parcela representativa da população não pode conduzir um veículo. Necessita de maiores investimentos na infra-estrutura viária, já que os veículos particulares, proporcionalmente, ocupam mais espaço para circular e estacionar, e separam os indivíduos pela distância e pelas obras viárias, além de provocar o isolamento das pessoas em seus veículos.

Para reverter esta situação é necessário que haja a retomada do uso do transporte público. Mas como tornar o transporte público atraente? Conforme Zarattini (2003), em média, o trajeto feito pelo ônibus demora 2,3 vezes mais que o automóvel particular. A falta de flexibilidade do transporte público impõe, freqüentemente, ao usuário a caminhar centenas de metros, ou mesmo quilômetros, e esperar por dezenas de minutos pela passagem do veículo. Este desconforto pode ser acompanhado de caminhadas por locais inapropriados, sob condições climáticas adversas e inseguras.

Muitos deslocamentos necessitam de transbordo para serem completados. Isso inclui mais paradas e esperas, que podem ser semelhantes às condições descritas anteriormente. Outro incômodo é o fato de que a viagem pode ser feita em pé e conduções lotadas, tão comuns ao transporte público. Também não se pode transportar cargas.

Tendo em vista estas considerações é necessário tornar o transporte público tão atraente quanto o automóvel, para que todas as pessoas possam ter direito a um transporte de qualidade.

1.2. Justificativa do trabalho

Diante do exposto anteriormente, uma alternativa que surge é um sistema de transporte intermediário ao transporte público e individual. Uma alternativa que tem sido pesquisada é o Transporte Público Individualizado (TPI), também conhecido como *Personal Rapid Transit* (PRT) ou *Personal Automated Transit* (PAT). O TPI pode ser considerado público, uma vez que é disponível a todos que podem contratar este serviço, e individual, porque é oferecido para pequenos grupos, de uma a quatro pessoas. Em tese, até um táxi é uma forma de TPI. Este trabalho tratará, no entanto, de uma forma de transporte ainda experimental, mas que vai ao encontro da necessidade discutida anteriormente, de oferecer um transporte público com qualidades do transporte individual.

Antes de sua implementação, é necessário verificar se este sistema pode substituir o sistema de transporte público existente de forma satisfatória. Para isso é necessário avaliar o seu potencial. Com este objetivo será feita, neste trabalho, uma avaliação multicritério ou multiobjetivo, que é uma forma de avaliação que se baseia em diversos aspectos, tais como econômicos, ambientais, sociais, etc. Sendo assim, pode perfeitamente ser utilizada para a avaliação de uma nova tecnologia. E, para caracterizar este novo sistema, serão feitas comparações entre o desempenho deste com o sistema existente em uma cidade média, que se utiliza de ônibus.

1.3. Objetivo

O objetivo deste trabalho é aplicar uma metodologia para seleção e avaliação de sistemas de transporte público urbano que permita a comparação de novas tecnologias.

Como subprodutos desta pesquisa será possível identificar aspectos importantes para avaliação de novas tecnologias em transporte público e determinar potencialidades de cada sistema e, deste modo, sugerir aperfeiçoamentos para os sistemas.

1.4. Estrutura do trabalho

Este trabalho é composto por 7 capítulos, incluindo a bibliografia. O capítulo 2 descreve a tecnologia TPI, principalmente o ULTra, que servirá de base para o sistema a ser avaliado. O capítulo 3 descreverá o processo de avaliação de projetos em transporte e aprofundar-se-á na descrição da técnica de avaliação multicritério, em especial o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) aqui empregado.

No capítulo 4 será apresentada a metodologia para a seleção e avaliação dos dois sistemas considerados. No capítulo 5 serão apresentados os resultados da aplicação da metodologia e a análise destes resultados. O capítulo 6 contém as conclusões obtidas para este trabalho e as recomendações para trabalhos futuros, e é seguido pela bibliografia.

2. TRANSPORTE PÚBLICO INDIVIDUALIZADO

Este capítulo pretende apresentar o TPI: conceito, história, sistemas desenvolvidos e, com maior destaque, o projeto ULTra.

2.1. Conceito

Conforme Ferraz e Torres (2001), o transporte público urbano pode ser classificado em três grandes grupos: privado ou individual; público, coletivo ou de massa; e semipúblico:

- *Privado ou individual*: modo no qual o condutor possui a posse do veículo, que possui baixa capacidade e possui flexibilidade no espaço e no tempo.
- *Público, coletivo ou de massa*: modo com veículos de grande capacidade que operam com horário e rotas predeterminadas e pertencem a uma ou mais empresas.

- *Semipúblico*: neste modo a rota e o horário são adaptáveis ao desejo do usuário, porém o usuário não detém a posse do veículo.

A figura 2.1 exemplifica a descrição anterior, onde já aparece inserida a alternativa aqui estudada, o TPI, que é similar a um táxi sem motorista em uma via dedicada.

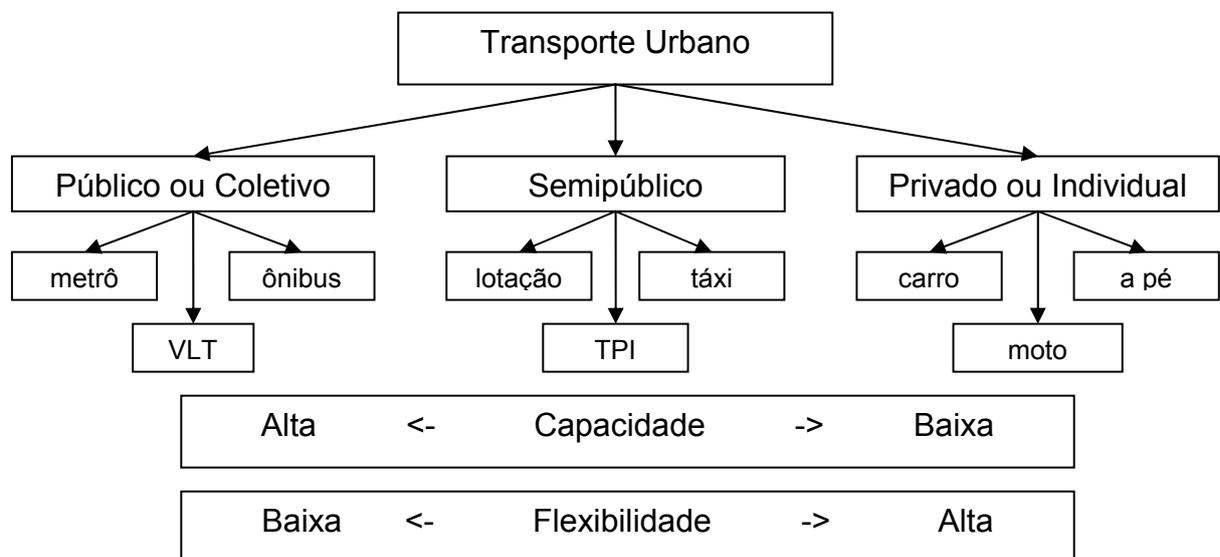


Figura 2.1: Classificação geral dos modos de transporte urbanos

Segundo Kieffer (1988), são sete as características que definem o sistema do

TPI:

- Veículos totalmente automatizados, sem condutor humano;
- O sistema possui veículos ligados às vias próprias;
- Os veículos tem capacidade para até 4 pessoas, que viajam juntas por escolha;
- As vias podem ser elevadas, subterrâneas ou ao nível da rua;

- Os veículos podem percorrer toda a rede e parar em qualquer estação, as quais se situam fora da linha principal;
- O TPI oferece viagem entre origem e destino sem a necessidade de transferência ou paradas em estações intermediárias e;
- O TPI pode estar disponível por demanda, segundo o desejo do usuário, ou em horários fixos como um ônibus.

Os veículos possuem controle automatizado, onde o usuário solicita a presença de um veículo em um painel existente na estação (figura 2.2) e pode informar o seu destino neste mesmo painel ou em um painel existente dentro do veículo. A trajetória pode ser realizada de forma a minimizar distâncias e tempos de viagem, evitando vias congestionadas ou com acidentes.



Figura 2.2 – Ilustração de uma estação do TPI

Por possuir estações fora da via principal, ao contrário dos trens convencionais (inclusive de metrô), o tráfego na via não é paralisado pela parada de um veículo (figuras 2.3 e 2.4) e os veículos do TPI, por serem menores e mais leves, exigem menores investimentos nas vias do que o metrô e trem, além de permitir um controle mais fácil, pois necessitam de equipamentos para frenagem mais leves e mais eficientes, permitindo um *headway* menor. Assim poderia ter um nível de segurança similar ao metrô e contaria com a manutenção contínua de pessoal especializado.

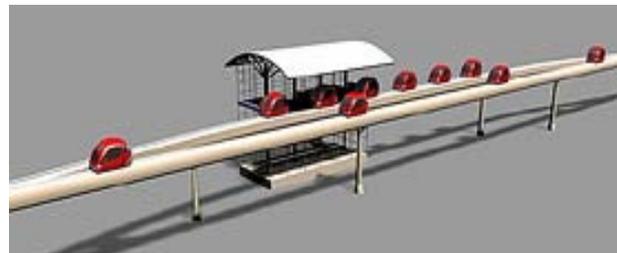
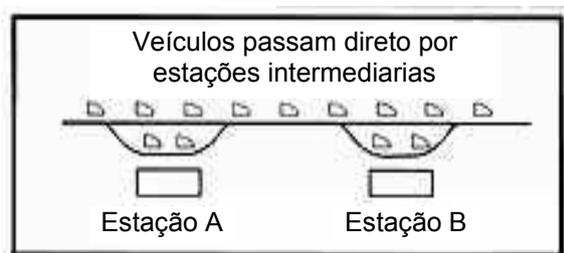


Figura 2.3: Esquema da estação do TPI

Figura 2.4: Ilustração da estação do TPI

Os veículos têm capacidade para levar pequenas cargas, bicicletas ou cadeira de rodas (figuras 2.5 e 2.6). Os veículos podem ser pequenos carros (figura 2.7) ou cabines (figura 2.8), oferecendo a comodidade e a privacidade de um automóvel. Os veículos do TPI dispensam a condução do veículo, que é uma atividade estressante ou mesmo traumática para as pessoas. Esta característica permite que as pessoas desenvolvam outras atividades enquanto dirigem-se ao seu destino.



Figura 2.5 – Acesso a bicicletas



Figura 2.6 – Acesso a cadeirantes



Figura 2.7 – Veículo do TPI



Figura 2.8 – Veículo do TPI

O TPI dispensa grandes áreas de estacionamento, que são extremamente caras nas regiões centrais das cidades, uma vez que o sistema é rotativo. Estudos realizados mostram que no caso de um edifício de escritórios, se todas as pessoas utilizassem carros, seria necessário construir um outro edifício 20 % maior para atender a demanda por estacionamento (FERRAZ; TORRES, 2001).

O TPI permite uma cobrança proporcional à utilização do sistema, uma vez que é possível cobrar uma tarifa composta por uma parcela fixa, referente à disponibilidade do sistema e outra parcela, variável, que depende da distância

percorrida. Convém lembrar que, em muitos países, as classes menos favorecidas economicamente têm ocupado os bairros mais longínquos, como consequência da valorização das áreas centrais.

O TPI pode estar disponível como o ônibus, ou seja, para qualquer um que possa pagar o valor da tarifa, o que inclui parte da população que não tem condições de adquirir seu próprio veículo. É também mais democrático em relação aos automóveis particulares, uma vez que crianças, adolescentes, idosos, portadores de necessidades especiais ou pessoas que não queiram ou não possam conduzir podem utilizá-lo. Teste feito no condado de Cardiff, no País de Gales, aponta que pessoas com educação básica podem facilmente utilizar o TPI (ADVANCED TRANSPORT SYSTEM LTD, 2003).

Uma grande vantagem do TPI é que a maioria dos sistemas testados emprega sistemas elétricos, que consomem menos energia e utilizam fontes que não são poluentes no ambiente urbano. Isto pode resultar em um ambiente mais saudável para as pessoas e com menor dependência de fontes de energia não-renováveis. Esta característica favorece os países com deficiência nessas fontes (LOWSON, 2003) e para os países com uma matriz energética baseada em fontes renováveis, surge uma oportunidade para diminuir a dependência de importação de fontes não-renováveis.

O Protocolo de Kyoto exige que os países desenvolvidos reduzam as suas emissões de CO₂. A utilização do TPI ajudaria a atingir esta meta, pois permite que a energia eólica, energia hidroelétrica e a energia solar sejam usadas separadamente

ou em conjunto para este fim. Isso torna o TPI um sistema potencialmente sustentável em termos de energia para o transporte. As vantagens de um sistema sustentável de transporte tornam-se evidentes à medida que as reservas de combustíveis fósseis declinam. Os custos de energia de fontes renováveis devem permanecer constantes em um sistema verdadeiramente sustentável (JOHANSSON; MARTENSSON, 1999), enquanto os custos de fontes não-renováveis, tais como o petróleo, continuam a subir à medida que estão acabando.

Naturalmente, nem todos os benefícios citados anteriormente têm ainda fundamentação prática, uma vez que o sistema nunca foi plenamente implantado em nenhuma cidade no mundo. Ainda há determinadas barreiras e incertezas a respeito, pois o sistema não passou da fase experimental ou de protótipos (ZUYLEN; OUWCHAND, 2004).

Para Vuchic (1981), o conceito básico do PRT é paradoxal, pois combina pequenos veículos, ideais para baixas densidades com vias permanentes factíveis apenas em rotas com tráfego pesado. O custo para a implementação de uma via permanente capaz de servir o TPI chega a ser doze vezes superior à construção de uma via para tráfego de automóveis comuns, sendo que o sistema viário como o existente atualmente é o mais caro do conjunto de sistemas urbanos (sistema viário, sanitário, energético e de comunicações), já que normalmente abrange mais de 50% do custo total de urbanização (MASCARÓ, 1989). Isto indica que, caso o TPI fosse implantado, o custo do sistema viário, proporcionalmente, iria aumentar consideravelmente e, uma vez implantada, a via permanente apresentaria grande dificuldades para a sua mudança, a exemplo dos VLT, trólebus e metrô.

O TPI necessita de uma central automatizada e pessoal especializado para a sua operação. Também necessita de um pátio de manutenção em localização privilegiada e de equipamento especial para retirar os veículos avariados da via de forma rápida, sem prejudicar a operação do sistema. A maioria dos sistemas de TPI testados consistia em uma única via. Dessa forma, caso um veículo pare na via ou esta fique danificada, a via fica impedida de promover o deslocamento dos outros veículos. Esta característica, junto com outras desvantagens, tornou os VLT e tróibus desinteressantes.

Usar um sistema avançado e automatizado, como o TPI, pode trazer alguns problemas para as pessoas com dificuldades de aprendizado ou de memorização. Esta dificuldade pode ser vista na utilização de serviços informatizados, que estão disponíveis em bancos, lojas, etc.

O esforço por parte de muitos governos e municipalidades para promover a troca do transporte de automóveis particulares para o transporte público tem surtido efeito limitado ou nulo. Isso sugere que as pessoas não querem ceder o direito de circular com seus próprios automóveis em troca de outro sistema. O mesmo desafio existiria na troca pelo sistema TPI. Mudança cultural, promoção e educação seriam necessárias para as pessoas começarem a adotar um novo sistema que difere consideravelmente do sistema existente (BUCOLO; GINN: GILBERT, 2003).

Para implementar o TPI é necessário analisar alguns aspectos que vão além das vantagens e desvantagens relacionadas anteriormente. Um destes aspectos está relacionado à tecnologia do sistema. Neste caso pode-se afirmar que o TPI

pode ser executado com as tecnologias existentes. Tecnologia similar é usada atualmente para sistemas de *Automated People Mover* (APM) e *Automated Guideway Transit* (AGT) nos Estados Unidos (YODER; WESEMAN; DELAURENTIS, 2000).

Para a implantação do TPI é necessário desenvolver veículos e vias resistentes a ações de vandalismo, tão comuns nas cidades. Pode-se tomar como exemplo, os veículos do transporte coletivo (ônibus e trens), que sofrem atos como pichações, depredações, mau uso, etc. Muitas vezes, estes atos comprometem a operação do sistema de transporte, portanto é necessário investir na segurança da estrutura (via e veículos) para manter o serviço disponível e com qualidade para os usuários.

Pela envergadura do sistema de TPI seria necessária a intervenção do governo para alavancar recursos necessários a este projeto, inclusive com financiamento público, o que é difícil em muitos países, pois seus governos estão sob pressão para diminuir gastos e aumentar o foco em investimentos em saúde, educação, assistência social, etc.

2.2. Histórico

A origem do TPI remonta às décadas de 1950 e 1960, quando alguns pesquisadores vislumbraram a possibilidade de utilizar pequenos veículos correndo sobre trilhos para efetuar o transporte urbano em contraponto ao automóvel, chegando a construir protótipos que, apesar dos problemas que enfrentaram, contribuíram para o aperfeiçoamento do sistema de TPI. Após estes estudos iniciais,

relativamente independentes, surge uma preocupação política em desenvolver modos de transporte urbano mais econômicos e em 1966 é criado o *Urban Mass Transportation Administration* (UMTA), nos Estados Unidos, comitê para o estudo de alternativas para o transporte de massa. O comitê analisou diversas alternativas de meios de transporte e gerou um relatório (intitulado “*Tomorrow’s Transportation*”) com perspectivas otimistas para o desenvolvimento de novas tecnologias, mas a troca de governo federal fez com que o órgão fosse esvaziado (KIEFFER, 1988).

Durante a década de 1970 sistemas semelhantes de TPI foram construídos nos Estados Unidos da América, Reino Unido, Alemanha e Japão, que apesar de apresentarem um relativo sucesso, foram abandonados por vários motivos. São exemplos de TPI construídos:

- O *Cabintaxi* é um sistema de TPI desenvolvido sob patrocínio do Ministério de Ciência e Tecnologia da Alemanha. Ele consiste em cabines com três assentos em uma via suspensa. Cada via podia carregar cabines nos dois sentidos (figura 2.9) e as cabines viajavam com *headways* de 0,5 a 1,2 s.



Figura 2.9 – Cabintaxi em operação

- Em Morgantown, EUA, um sistema de APM conecta vários campi da Universidade da Virgínia Ocidental (figura 2.10 e figura 2.11). A construção do sistema foi iniciada em 1971 e foi terminada um ano mais tarde. Extensos testes foram efetuados e, após esta fase, o sistema foi aberto para serviço em 1975. A primeira fase consistiu na construção de 8,4 km de vias, com 45 veículos e três estações. O controle era feito a partir de uma estação. Em 1978, o sistema foi fechado para que a segunda fase pudesse ser construída. A frota do sistema foi expandida para 71 veículos e mais 5,6 km foram acrescentados ao sistema; houve a ampliação de uma estação e a construção de mais duas estações. As operações foram recomeçadas em 1979 e desde então está em operação com nível de confiabilidade de 99 % (SCHNEIDER, 2005).

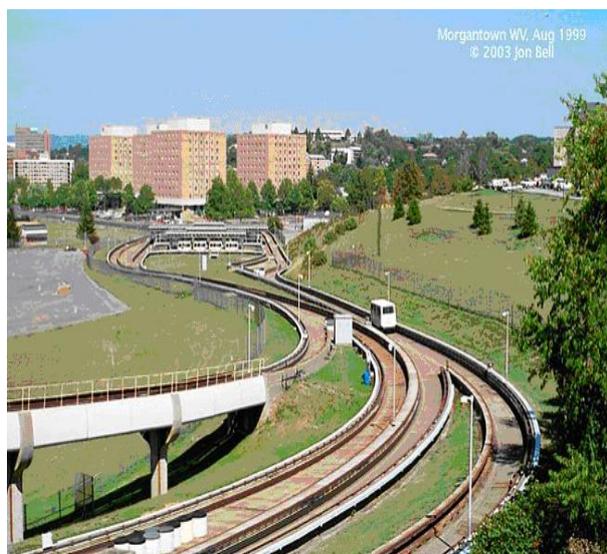


Figura 2.10 – Vista parcial do sistema



Figura 2.11 – Vista da estação

- O *Computer Controlled Vehicle System* (CVS) é um sistema desenvolvido no Japão em 1968. O sistema projetava *headway* de um segundo e o veículo (figura 2.12) pesava 900 kg e possuía capacidade para quatro passageiros. Um modelo em escala real (figura 2.13) iniciou a operação em 1972 em um subúrbio de Tóquio com

4,8 km de trilhos e 60 veículos. No final dos anos 1970, o programa do CVS foi interrompido. (SCHNEIDER, 2005).



Figura 2.12 – Veículo do CVS

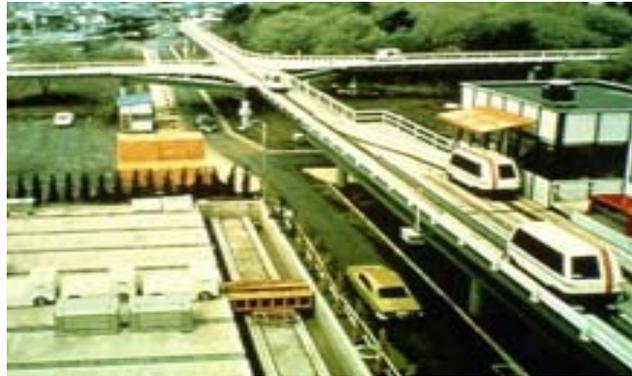


Figura 2.13 – Estrutura do CVS

Estes sistemas e outros não citados foram fundamentais para o desenvolvimento do TPI. Eles incorporaram uma variedade de soluções tecnológicas para suporte do veículo, direção, controle e propulsão, mas todos eles tinham os aspectos básicos de operação do TPI.

2.3. Projeto ULTra

O projeto ULTra (*Urban Light Transport*) foi iniciado em 1995, numa parceria da empresa *Advanced Transport System Ltd.* (ATS) e a Universidade de Bristol. Os testes foram iniciados em Cardiff (figura 2.14), onde foi construída uma pista de 1,0 km, parte em via elevada com 5,7 m acima do nível de rua e parte ao nível da rua, com subidas e descidas, curvas em ambas as direções e uma estação. Os testes duraram dois anos e os dois veículos usados para testes não apresentaram nenhuma falha.

Os veículos do sistema ULTra (figura 2.15) possuem capacidade para 4 assentos com cintos e reclináveis, ou carga até 500 kg, e atingem uma velocidade de 40 km/h. O veículo pode ser acessível por cadeirantes e levar bicicletas. O motor é elétrico, movido à bateria de 2 kW. Esta bateria adiciona 8 % ao peso bruto do veículo e é recarregada enquanto o veículo está estacionado. O comprimento do veículo é de 3,70 m, a largura é de 1,40 m e a altura é de 1,80 m. O veículo emite 43 dBA a uma distância de 2,5 m, não emite poluentes decorrentes do funcionamento do motor e o consumo de energia é de 0,55 MJ por passageiro.km.

A via é segregada do trânsito, pode ter raio de curvatura mínima igual a 5,00 m. A largura total da via é 2,10 m, a largura da via, quando em nível da rua, é de 1,75 m, a largura da pista interna é de 1,60 m e a altura é de 0,25 m. Com pneus de borracha, o veículo tem capacidade para subir rampas com até 20 %, mas por questões de conforto, são admitidas rampas máximas de 10 % em aclive e 6,25 % em declive. Seu sistema de frenagem permite uma desaceleração de $10,2 \text{ m/s}^2$. A infra-estrutura utilizada é modular, ou seja, permite que seja reaproveitada.



Figura 2.14 – Vista do projeto ULTra



Figura 2.15 – Veículo do ULTra

O controle do ULTra é dividido em três níveis: *Automatic Vehicle Control (AVC)*, que determina a rota a ser seguida pelo veículo; *Automatic Vehicle Operation (AVO)* responsável pelas atividades do veículo, como aceleração e abertura das portas e *Automatic Vehicle Protection (AVP)*, que protege o veículo, impedindo que o mesmo passe por situações inseguras.

O controle central gerencia a frota de veículos de forma sincronizada: cada veículo recebe informação do ponto onde está parado e o veículo só parte quando houver uma rota livre. Este controle também gerencia o tráfego de veículos vazios e os direciona para os locais com demanda.

Os veículos são controlados de forma autônoma. Uma vez que o veículo recebe a trajetória a ser cumprida, não há mais nenhuma intervenção a ser feita pelo controle central. Para manter a trajetória, o veículo possui um sistema de condução, que controla a transmissão, e a direção, que usa um sensor de posição lateral. A via possui um conjunto de laços indutivos que interagem com sensores a laser ou ultrassom, operando por blocos fixos, semelhantes à operação de trens. Os blocos fixos são definidos pelos laços indutivos ajustados na via que interagem com os sensores no veículo.

Foi feita uma pesquisa para avaliar o uso do sistema e 100 % dos participantes avaliaram como satisfatória ou muito satisfatória a experiência com o sistema (ADVANCED TRANSPORT SYSTEM, 2003).

3. AVALIAÇÃO DE PROJETOS EM TRANSPORTE

Neste capítulo são apresentados conceitos sobre a avaliação de projetos em transporte, as técnicas de avaliação e, em com maior destaque, a técnica de avaliação multicritério conhecido como *Analytic Hierarchy Process* (AHP).

3.1. Introdução

A avaliação de projetos em transportes é uma atividade que envolve diversos atores, tais como instituições, comunidades, empresas, etc., discutindo sobre aspectos financeiros, ambientais, institucionais, econômicos e tecnológicos de investimentos em busca de uma meta.

Projeto pode ser definido como um conjunto sistemático de informações que serve de base para a tomada de decisões relativas à alocação de certo montante de recursos (POMERANZ, 1985). Segundo Ferreira e Gomes (1994), a decisão é parte da vida cotidiana, porém é uma das tarefas mais complexas e das mais controvertidas. Para Furtado e Kawamoto (1997), um problema de tomada de decisão é caracterizado por um conjunto de objetos, alternativas e valores. Sobre

este conjunto é necessário considerar as várias soluções possíveis, chamadas ações potenciais.

A complexidade em se conduzir a avaliação de projetos tornou necessário o desenvolvimento de técnicas. Segundo Pomeranz (1985), a elaboração de um projeto constitui, assim, uma técnica de análise cujo objetivo é indicar quais os resultados que podem ser obtidos pela aplicação de um montante de recursos em diferentes usos alternativos. Conforme Ferreira e Gomes (1994), tem-se que escolher entre possíveis alternativas que retratam diferentes pontos de vista, considerando toda uma multiplicidade de fatores direta e indiretamente relacionados com as possíveis conseqüências da decisão a ser tomada.

Em Furtado e Kawamoto (1997) foi definido, de forma sintética, que o objetivo da tomada de decisão em transportes é o de auxiliar o desenvolvimento de programas, planos e alternativas, que tenham como propósito alocar recursos disponíveis para a resolução de um problema de transportes.

3.2. Técnicas

A necessidade de escolher entre diversas alternativas levou as organizações a desenvolverem diversas técnicas para ordenar as alternativas ou projetos. Em transportes, as primeiras técnicas foram de ordem monetária, ou seja, as alternativas eram ordenadas de acordo com sua viabilidade econômica. Para Pomeranz (1985), os estudos econômicos e financeiros envolvem cálculos sobre a eficiência econômica do projeto e sobre o seu financiamento. Trata-se de analisar os resultados que podem ser obtidos em cada uma das alternativas de concepção do

projeto apresentadas, através de índices econômicos apropriados segundo o critério adotado para a análise.

Segundo Furtado (1998) as técnicas monetárias estão classificadas em dois grandes grupos: as que são baseadas nas relações entre benefícios e custos e as que são baseadas nas relações custo e efetividade. Do primeiro grupo, as principais técnicas são: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Taxa Interna de Retorno Incremental ($TIR\Delta$), Razão Benefício/Custo (B/C) e Razão Benefício/Custo Incremental ($B/C\Delta$). Já no segundo grupo, existem apenas diferenças nas escalas adotadas para a medição dos Índices de Efetividade.

Na técnica VPL calcula-se o valor presente dos fluxos de benefícios e custos e os resultados são somados algebricamente, resultando no valor presente líquido. A técnica de TIR consiste no cálculo da taxa de juro ou desconto para a qual o módulo de valor presente dos benefícios iguala ao módulo do valor presente dos custos. A técnica $TIR\Delta$ possui dois passos essenciais: o primeiro consiste em determinar a taxa interna de retorno de cada alternativa, ordenada em ordem crescente de custos iniciais, e o segundo passo consiste em determinar a taxa interna de retorno dos custos e benefícios incrementais.

A técnica de B/C consiste em determinar os valores presentes de benefícios e custos e obter a razão entre eles. A técnica $B/C\Delta$ aproveita os mesmos valores presentes de fluxos de benefícios e custos determinados na técnica VPL e as alternativas são ordenadas de maneira que aquela com o menor custo inicial seja a primeira ser analisada. A partir daí, em função do cálculo B/C sobre o valor incremental, determina-se a melhor alternativa (FURTADO; KAWAMOTO, 1997).

A avaliação baseada no custo e efetividade não requer uma relação essencialmente monetária, sendo por isso mais utilizada em avaliações de caráter social (FURTADO, 1998). As técnicas consistem em avaliar os benefícios ou unidades de resultados advindos da implementação de um projeto com determinado custo.

As análises de custo e benefício foram durante muito tempo considerados instrumentos suficientes para balizar os processos de tomada de decisão. Respondiam e justificavam “tecnicamente” quanto à oportunidade e adequação de investimentos em projetos e empreendimentos de grande porte, ou que poderiam envolver até interesses antagônicos. Os aspectos econômicos e financeiros bastavam para demonstrar quão “sadios” eram os interesses que os empreendimentos objetivavam. Empreendimentos que garantissem adequadas taxas de retorno eram considerados “politicamente corretos” e bem vindos (ZIONI, 1994).

Este tipo de avaliação, sob a ótica da eficiência, predomina até hoje em organizações privadas, que buscam maximizar o benefício econômico em função do investimento feito, porém não é adequada para instituição de caráter público que, em tese, busca o bem-estar da sociedade. Conforme Furtado (1998), a consciência coletiva tem infundido um maior significado aos fatores sociais, culturais, econômicos e ambientais. Com isso, indivíduos e entidades passaram a ver com mais cuidado, os efeitos globais das mudanças propostas no sistema de transporte. Além disso, para Zioni (1994), reconhecem a dificuldade de quantificar e especialmente “monetarizar” os efeitos sociais.

Surgiram assim as técnicas não-monetárias. Estas técnicas, segundo Furtado (1998), envolvem basicamente um confronto entre conjunto de critérios de julgamento e uma matriz de impactos para que um ordenamento das alternativas por ordem de prioridade seja obtido. Estas técnicas permitem que sejam comparados simultaneamente aspectos econômico-financeiros, técnicos, institucionais, ambientais e sociais.

Para Furtado (1998), as técnicas não-monetárias são divididas em três grupos. As *técnicas discretas* trabalham com um número finito de alternativas e todas elas podem ser ordenadas sobre um conjunto de critérios. Já as *técnicas contínuas* são as que se baseiam na interação entre a análise e a decisão para definir uma região viável de decisão, considerando a preferência dos decisores. A estes dois grandes grupos, pode-se juntar ainda um terceiro, onde estão enquadradas aquelas técnicas destinadas para a *resolução de conflitos* ou que passem por processos de *negociação* para a seleção de alternativas.

As técnicas discretas dividem-se em três grupos: as técnicas de *relações binárias* empregam os conceitos de concordância e discordância, demonstradas por meio de índices. Na técnica de *utilidade multiatributo*, a utilidade é representada por uma função que traduz em representação matemática uma estrutura de preferência. O uso de técnicas de *hierarquia* requer, como princípio, uma estrutura hierárquica onde as atividades recebem um nível de intensidade de acordo com a sua contribuição para a solução do problema.

Para Arias (2001), as técnicas não-monetárias se dividem em dois grupos distintos:

- *Métodos de auxílio à decisão com objetivos múltiplos* – dizem respeito aos problemas nos quais as ações potenciais formam um contínuo, definidas implicitamente por um conjunto de restrições.
- *Métodos de auxílio à decisão com atributos múltiplos* – referem-se aos casos em que as ações potenciais, em número finitos, são explicitamente conhecidas.

Neste trabalho será abordado o último grupo, aqui denominado de análise multicritério.

3.3. Análise Multicritério

O objetivo da análise multicritério é identificar e selecionar a melhor alternativa de ação quando confrontado com um problema complexo de decisão que envolve objetivos múltiplos e talvez conflitantes (RABBANI e RABBANI, 1996). Para Ferreira e Gomes (1994) a análise de problemas que envolvem múltiplos critérios torna possível a consideração de um grande número de informações, relações e objetivos comumente presentes em uma situação de decisão.

Como citado anteriormente, uma forma de análise é através da hierarquia. Para Saaty (*apud* RABBANI; RABBANI, 1996), a decomposição hierárquica de sistemas complexos parece ser uma ferramenta usada pela mente humana para lidar com a diversidade. Uma forma simplificada usada para estruturar um problema de decisão é uma hierarquia com três níveis de detalhamento: meta, critérios e alternativas.

Numa estrutura hierárquica, a meta ou objetivo está no topo. Para atingir a meta, as alternativas, que formam a base da estrutura, devem ser comparados através dos critérios. Para Rabbani e Rabbani (1996), as técnicas de análise multicritério usam escalas apropriadas de medidas para ordenar alternativas com respeito aos diferentes critérios e também para medir a importância relativa dos critérios com respeito aos critérios ou objetivos mais elevados.

Uma técnica que utiliza a estrutura hierárquica é o *Analytic Hierarchy Process* (AHP). A premissa básica do AHP, desenvolvido por Thomas Saaty, baseia-se no conceito que muito do que nós consideramos atualmente ser “conhecimento”, pertence ao nosso senso instintivo de como as coisas realmente são (RABBANI; RABBANI, 1996), ou seja, a partir de nosso conhecimento podemos discernir qual alternativa é melhor ou pior, porém não sabemos quantificar esta qualidade de uma alternativa sobre outra.

O método AHP baseia-se em uma matriz quadrada $n \times n$, de comparação entre os n critérios, onde as linhas e as colunas correspondem aos critérios (na mesma ordem ao longo das linhas e das colunas). Os elementos a_{ij} da matriz representam a importância do critério na linha i em relação ao da coluna j (SANTOS, 2005). A escala de importância foi definida por Saaty como na Tabela 3.1.

Podem ser usados 2, 4, 6 ou 8 como valores intermediários. Os critérios serão avaliados de forma recíproca, ou seja, se um critério é n vezes mais importante que outro, este deve ser $1/n$ vezes mais importante que aquele critério. O elemento da diagonal é sempre igual a 1. O processo para atribuição de pesos pode ser realizado como descrito a seguir.

Tabela 3.1: Escala de importância definida por Saaty

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	Duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância mínima de um sobre outro	A experiência e o julgamento favorecem ligeiramente uma atividade sobre a outra
5	Muita importância de um sobre outro	A experiência e o julgamento favorecem muito uma atividade sobre a outra
7	Grande importância	Uma atividade é predominante sobre a outra
9	Importância absoluta	Uma atividade é praticamente absoluta sobre a outra

Etapa 1 – Construção da matriz de comparação par a par

Como no exemplo na tabela 3.2, pode ser construída uma planilha contendo uma matriz onde os critérios são dispostos, na mesma ordem, nas linhas e colunas para a comparação par a par. As células serão preenchidas de acordo com a escala demonstrada na tabela 3.1.

Tabela 3.2 – Exemplo de julgamento de critérios

Critérios	A	B	C
A	1	3	5
B	1/3	1	3
C	1/5	1/3	1

Etapa 2 – Cálculo do autovetor (no original, eigenvector) principal

Após o preenchimento das células para a comparação, será calculado determinado o somatório dos pesos de avaliação (tabela 3.3). A tabela 3.4 contém a matriz de comparação par a par normalizada, que mostra os valores de cada comparação (célula) divididos pelo somatório da coluna a que pertence. A tabela 3.5 apresenta o autovetor (em negrito), que é a somatória dos elementos da linha da matriz de comparação normalizada dividida pela somatória dos elementos da matriz de comparação.

Tabela 3.3 – Cálculo dos somatórios dos pesos da avaliação

Critérios	A	B	C
A	1	3	5
B	1/3	1	3
C	1/5	1/3	1
Σ	1,533	4,333	9,000

Tabela 3.4 – Matriz de comparação par a par normalizada

Critérios	A	B	C	Σ
A	0,652	0,692	0,556	1,900
B	0,217	0,231	0,333	0,781
C	0,130	0,077	0,111	0,318
		Σ	Σ	3,000

Tabela 3.5 – Autovetor

$1,900/3,000$	0,633
$0,781/3,000$	0,260
$0,318/3,000$	0,106
Σ	1,000

Etapa 3 – Cálculo do autovalor máximo (no original, eigenvalue)

Após o cálculo do autovetor, será calculado o autovalor máximo, que é a somatória do produto entre a matriz dos pesos pelo autovetor (tabela 3.6).

Tabela 3.6 – Cálculo do autovalor

Critérios	A	B	C		Autovetor	
A	1,000	3,000	5,000	X	0,633	<u>1,946</u>
B	0,333	1,000	3,000		0,260	<u>0,790</u>
C	0,200	0,333	1,000		0,106	<u>0,320</u>
					Σ	3,055
						Autovalor

Etapa 4 – Cálculo do Índice de Consistência (CI – Consistency Index)

O CI é calculado a partir do autovalor, pela seguinte equação:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3.1)$$

onde λ_{max} é o autovalor e n é o número de critérios comparados. No exemplo apresentado, CI é igual a 0,028.

Etapa 5 – Cálculo do Índice de Aleatoriedade (RI – Random Index)

O RI é calculado a partir da geração aleatória de matrizes recíprocas. Os valores de RI são apresentadas na tabela 3.7. No exemplo dado, RI é igual a 0,52.

Tabela 3.7 – Valor de RI

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
RI	0,00	0,00	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49	1,51	1,48

Etapa 6 – Cálculo do Grau de Consistência (CR – Consistency Ratio)

O CR indica o nível de coerência do julgamento do avaliador. Por exemplo, se o avaliador indica que A é melhor que B, e B melhor que C, logo ele deve avaliar que A é melhor que C. O CR é calculado a partir da seguinte equação:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3.2)$$

O CR do exemplo é igual a 0,048. Para Rabbani e Rabbani (1996), um CR menor que 0,10 é apropriado quando 5 ou mais elementos são comparados. Quando 4 elementos são comparados um CR menor que 0,08 é recomendado e para o caso de 3 elementos, 0,05 é recomendado. Neste trabalho será adotado um CR menor que 0,10 para todas as planilhas, para facilitar o preenchimento por parte dos avaliadores.

Etapa 7 – Eventual reavaliação da matriz de comparação se CR superior a 0,1

Caso o CR seja maior que 0,10, recomenda-se a reavaliação dos critérios.

Esta técnica será utilizada na metodologia para avaliar qual a tecnologia mais adequada para este estudo de caso.

4. METODOLOGIA

Este capítulo descreve o método adotado para a seleção e avaliação de uma tecnologia para transporte público urbano.

Segue-se a estrutura desenvolvida para a seleção:

1. Seleção de critérios;
2. Determinação dos pesos dos critérios;
3. Levantamento dos dados de cada tecnologia para comparação;
4. Comparação dos dados das tecnologias dentro de cada critério;
5. Determinação da tecnologia mais adequada.

Para a avaliação da tecnologia foi desenvolvida a seguinte estrutura:

1. Avaliação do tempo de atendimento;
2. Determinação da capacidade máxima;
3. Avaliação do tempo de viagem por passageiro;
4. Avaliação do tempo de viagem de todos os passageiros.

4.1. Seleção de Tecnologia

4.1.1. Seleção de critérios

Os critérios foram selecionados a partir do conceito de mobilidade urbana sustentável, que, de forma resumida, pode ser definida como exercício do direito ao deslocamento por toda a sociedade sem prejuízo ao ambiente e gerações futuras. Pode-se dizer que existem três dimensões principais dentro do conceito de mobilidade urbana sustentável:

- *Dimensão social:* que busca satisfazer a necessidade de mobilidade e acessibilidade da sociedade.
- *Dimensão ambiental:* trata do uso de recursos e preservação do ambiente.
- *Dimensão econômica:* que trata do transporte enquanto atividade econômica, ou seja, trata-se de sua viabilidade econômico-financeira.

Para este trabalho foram selecionados critérios que buscam refletir cada uma destas dimensões. Para a dimensão social, buscou-se critérios que indicam a capacidade da tecnologia em servir ao usuário com qualidade. Para a dimensão ambiental foram escolhidos critérios que refletem o impacto do sistema no ambiente. Na dimensão econômica foram selecionados indicadores relacionados aos custos para os usuários e gestor do sistema.

Segundo Ferraz e Torres (2001), são doze os principais fatores que influem na qualidade do transporte público urbano: acessibilidade, frequência de atendimento, tempo de viagem, lotação, confiabilidade, segurança, características dos veículos, características dos locais de parada, sistema de informações, transbordabilidade, comportamento dos operadores e estado das vias.

1. *Acessibilidade*: está associada à distância percorrida para iniciar e finalizar a viagem por transporte público e à comodidade experimentada nesses percursos.
2. *Frequência de atendimento*: está relacionada ao intervalo de tempo da passagem dos veículos e afeta diretamente o tempo de espera nos locais de parada.
3. *Tempo de viagem*: corresponde ao tempo gasto no interior dos veículos e depende da velocidade média de transporte e da distância entre os locais de embarque e desembarque.
4. *Lotação*: diz respeito à quantidade de passageiros no interior dos veículos.
5. *Confiabilidade*: está relacionada ao grau de certeza dos usuários de que o veículo de transporte público vai passar na origem e chegar ao destino no horário previsto e que a viagem vai se realizar.
6. *Segurança*: compreende os acidentes envolvendo os veículos e atos de violência no interior dos veículos e locais de parada.
7. *Características dos veículos*: a tecnologia e o estado de conservação dos veículos de transporte são fatores determinantes para a comodidade dos usuários.

8. *Características dos locais de parada:* aspectos para avaliar os locais de paradas são sinalização adequada, existência de coberturas e bancos para aguardar sentado.
9. *Sistema de informações:* compreende a disponibilidade de folhetos com horários e itinerários das linhas, existência de informações sobre as linhas e os horários nos locais de parada, informações sobre a rede de linhas no interior dos veículos, fornecimento de informações verbais por parte dos motoristas e cobradores, posto para fornecimento de informações e recebimento de reclamações e sugestões, etc.
10. *Transbordabilidade:* designa a facilidade de deslocamento dos usuários entre dois locais da cidade.
11. *Comportamento dos operadores:* compreende, em relação ao comportamento dos motoristas, a condução dos veículos com habilidade e cuidado, tratamento aos passageiros com respeito, espera pelos usuários para completar as operações de embarque e desembarque, resposta às perguntas dos usuários com cortesia, não falar palavras inconvenientes, etc. O mesmo vale para os cobradores, com exceção à condução dos veículos.
12. *Estados das vias:* o aspecto mais importante é a qualidade da superfície de rolamento, a fim de evitar as freqüentes reduções e aumentos da velocidade devido à presença de buracos, lombadas e valetas, os solavancos provocados por estes elementos e a existência de poeira ou lama no caso de vias não pavimentadas.

Para Arias (2001), os impactos ambientais são causados por transformações nas condições qualitativas no ambiente físico e no contexto social e cultural da área, ocasionadas pela implantação do sistema de transporte e pelas mudanças na configuração urbana oriundas da variação de acessibilidade. Neste trabalho são considerados os seguintes critérios dentro da dimensão ambiental:

1. *Intrusão visual*: é o impacto visual causado pela presença do sistema na paisagem urbana.
2. *Estrutura urbana*: este critério visa representar a adequação de cada alternativa à configuração da cidade e às condições da via (ARIAS, 2001).
3. *Consumo de energia*: critério que engloba o consumo de energia pelo sistema e sua fonte de origem, que pode ser renovável ou não, e se sua geração é poluente ou não.
4. *Poluição atmosférica*: este critério visa representar os impactos negativos que cada uma das alternativas pode provocar sobre a qualidade do ar ao longo do corredor e do seu entorno, provocando danos à saúde humana (ARIAS,2001).
5. *Poluição sonora*: este critério visa representar os impactos negativos que cada uma das alternativas pode provocar sobre as variações dos níveis de ruídos nos locais, provocando danos à saúde humana (ARIAS, 2001).

Segundo Ferraz e Torres (2001), os projetos de transporte envolvem, em geral, investimentos em infra-estrutura e veículos. A infra-estrutura engloba vias, terminais, garagens, oficinas, prédios administrativos, sistemas de controle etc. Os custos que correspondem à infra-estrutura são: planejamento, projetos, implantação e operação. Na operação estão incluídos os custos de manutenção e administração. Os custos

associados aos veículos de transporte são: aquisição e operação (o que inclui manutenção e administração). Para efeito deste trabalho, os elementos considerados são:

1. *Tarifa*: é o preço cobrado dos usuários pelo transporte (FERRAZ e TORRES, 2001).
2. *Subsídio*: é o valor custeado pelo governo que torna possível a operação do sistema a custos razoáveis para os usuários.
3. *Custos de implantação*: refere-se ao volume de recursos financeiros necessários à implantação do projeto. Estão embutidos nestes custos todos os itens relacionados ao investimento inicial, tanto no que se refere à aquisição da frota como na adequação de toda a infra-estrutura viária a ele relacionada (tratamento viário, terminais, pontos de paradas ou estações) (ARIAS, 2001).
4. *Custo de operação e manutenção do sistema*: refere-se tanto ao volume de recursos financeiros a serem utilizados anualmente para manter o sistema funcionando dentro dos padrões estabelecidos, como seus custos posteriores para ajustes de oferta às novas demandas e para manutenção adequada. Neste mesmo custo estão incluídos também aqueles necessários para a administração e gerenciamento da empresa operadora. (ARIAS, 2001).

4.1.2. Determinação dos pesos dos critérios

Após a seleção dos critérios, foram montadas planilhas para a determinação do peso relativo dos critérios selecionados. A pesquisa consistia em duas fases: na

primeira fase o avaliador determinava o peso relativo dos aspectos econômico, ambiental e operacional (apêndice A). Na segunda fase, o avaliador comparava os atributos dentro de cada aspecto (apêndices B, C e D). Esta escolha foi feita para facilitar a determinação dos pesos de todos os critérios considerados relevantes.

Durante a elaboração das planilhas usadas para a determinação dos pesos, foram adotadas algumas soluções que buscavam facilitar a sua construção e manuseio, além de comentários que foram introduzidos com o objetivo de melhorar a compreensão por parte dos avaliadores. Foram escolhidos dois grupos de avaliadores distintos:

1. *Pesquisadores*: Foram selecionados, após consulta à plataforma Lattes do CNPq, especialistas em transporte público urbano.
2. *Usuários*: Foram selecionados usuários cativos de ônibus em São Carlos. Este grupo basicamente foi composto de trabalhadores e estudantes.

Aos avaliadores foi solicitado realizar comparações par a par entre os critérios selecionados sob o ponto de vista do gestor de um sistema de transporte público. Para a pesquisa, o avaliador analisava cada célula, na qual aparecia uma questão relativa à comparação. Para a resposta, o avaliador selecionava o valor da escala que acreditava ser mais adequado à resposta. Durante o preenchimento da planilha o avaliador podia acompanhar o Grau de Consistência de seu julgamento. Caso este valor fosse superior a 0,1, o avaliador era alertado e convidado a refazer seus julgamentos. Quando o valor do Grau de Consistência fosse inferior ao especificado, o avaliador era avisado que o processo havia terminado.

Após o término do processo, o avaliador devolvia a planilha preenchida. Esta foi processada e foram determinados os pesos de cada critério para cada avaliador. Os pesos finais foram determinados a partir de média aritmética de todas as avaliações.

4.1.3. Levantamento dos dados de cada tecnologia para comparação

Para determinar a tecnologia mais adequada para transporte público urbano em cidades médias foi necessário o levantamento dos dados de cada atributo. Para obter os dados sobre frequência, lotação, transbordabilidade, estado das vias, subsídio, do custo de implantação e custo de operação e manutenção da alternativa ônibus foi consultada a Prefeitura Municipal de São Carlos. Os dados sobre confiabilidade e segurança da alternativa ônibus foram retirados de Rodrigues (2006). O dado sobre a poluição ambiental causado pelo ônibus foi retirado de Kozerski e Hess (2006). Os dados sobre a intrusão visual, adequação à estrutura urbana e as características dos veículos foram retirados de Universidade Federal de Minas Gerais (2007).

Os dados sobre consumo de energia, poluição sonora, tempo de viagem da alternativa ônibus e os dados sobre intrusão visual, estrutura urbana, consumo de energia, poluição atmosférica, poluição sonora, frequência, tempo, lotação, confiabilidade, segurança, veículo, transbordabilidade, operador e via do TPI foram obtidos através de Advanced Transport System (2005). Os dados sobre subsídio, custo de implantação e custo de operação e manutenção do TPI foram retirados de

Tègner (2006), Yoser; Weseman; Delaurenti (2000), Bly e Teychenne (2006) e Wyatt (2007).

4.1.4. Comparação dos dados das tecnologias dentro de cada critério

Este item é semelhante ao item 4.1.2 e novamente é aplicado o método AHP, porém para comparar os dois sistemas. Os dados dos atributos de cada sistema podem ser confrontados de acordo com a escala da tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Escala de importância de projeto

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Equivalentes	Os dois projetos são equivalentes
3	Superioridade mínima de um sobre outro	A experiência e o julgamento favorecem ligeiramente um projeto sobre o outro
5	Um é superior ao outro	A experiência e o julgamento favorecem um projeto sobre o outro
7	Grande superioridade	Um projeto é muito superior ao outro
9	Superioridade absoluta	Um projeto é desprezível em relação ao outro

Foram montadas planilhas similares às descritas no item 4.1.2 (apêndice E) e respondidas pelos mesmos avaliadores, pesquisadores e usuários que participaram da pesquisa anterior.

4.1.5. Determinação da tecnologia mais adequada

As planilhas foram recolhidas e processadas de forma similar ao item 4.1.2. O produto final foi uma matriz que confrontou os atributos de cada tecnologia. Tendo o peso relativo de cada critério, determinou-se qual das tecnologias seria considerada mais adequada para o transporte público em São Carlos.

4.2. Avaliação da Tecnologia

4.2.1. Avaliação do tempo de atendimento

Esta atividade tem o objetivo de avaliar os tempos de atendimento do TPI e comparar com o sistema de ônibus. Para realizar a simulação do atendimento será utilizado o seguinte conjunto de padrões para estimar parâmetros de operação de um sistema de TPI para a cidade de São Carlos:

- O padrão de chegadas será considerado estocástico. Este padrão será levantado observando o processo de chegadas de passageiros em um ponto de parada num corredor de ônibus da cidade de São Carlos.
- O padrão de atendimento será composto de dois movimentos:
 - O tempo entre a chamada do veículo e sua chegada à estação será considerado estocástico, com base no resultado do projeto ULTra.
 - O tempo de embarque do passageiro e a informação do destino será considerado determinístico, com base em observação da média dos

tempos observados em embarques em ônibus, mais um tempo para a informação do destino.

- Será considerado o padrão de atendimento tipo FIFO (*First In, First Out*), ou seja, o primeiro cliente a chegar a estação será o primeiro cliente a ser atendido. O que pode acontecer, na realidade, é o estabelecimento de prioridade, ou seja, alguns passageiros podem ceder a vez em favor de idosos, pessoas com crianças no colo, etc.
- Haverá apenas um canal de atendimento em cada estação,
- Existirá apenas um canal de serviço em cada rota, dada a natureza da via.
- A população será considerada infinita, apesar da população que utiliza ônibus ser finita. A capacidade de armazenamento do sistema também é considerada infinita.

O padrão de chegadas foi obtido numa parada de ônibus pela medida dos intervalos de chegadas consecutivas de passageiros. Em seguida, o tempo entre cada chegada de ônibus e sua partida (ou o instante quando o ônibus fecha a porta após o último passageiro embarcar) foi registrado. Foram utilizados apenas tempos de embarque quando este fosse somente de um passageiro, pois não inclui os atrasos produzidos pela formação de fila de passageiros. A tabulação dos dados de campo deu a distribuição de intervalos de chegadas consecutivas entre as paradas de ônibus, assim como o tempo médio de embarque por passageiro. Esta informação, associada com a geração de números aleatórios, foi a base para a simulação de chegadas de passageiros em estações do TPI. O processo de simulação adotado pode ser resumido na Figura 4.1 e se encontra detalhado em (HOTTA e SILVA, 2006).

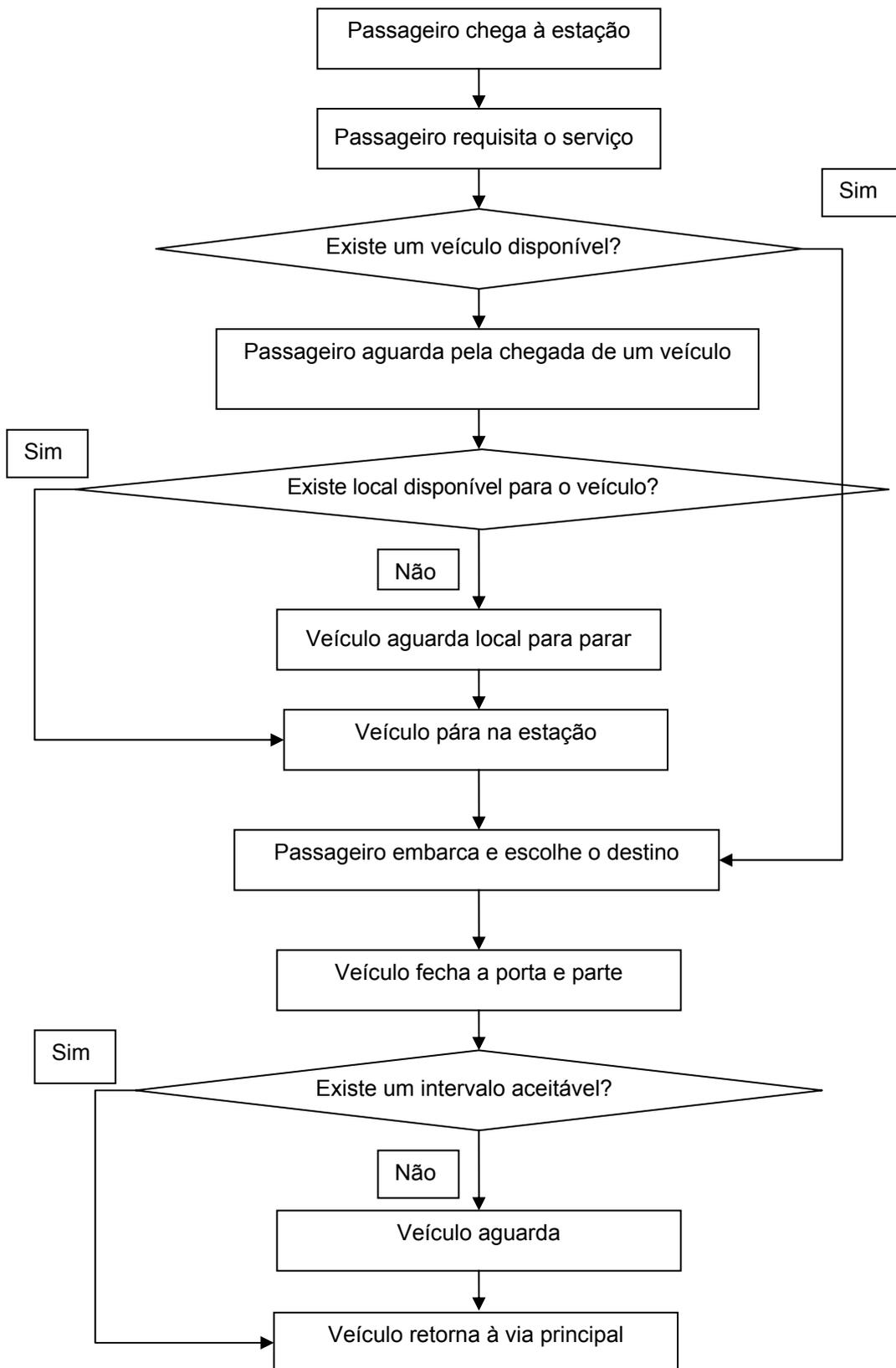


Figura 4.1 – Fluxograma da simulação de atendimento à demanda no TPI

4.2.2. Determinação da capacidade máxima

Inicialmente foram levantados os dados da operação de ônibus em São Carlos no trecho mais carregado para estimar a ocupação. Depois foi levantado o dado referente à capacidade do projeto ULTra. O passo seguinte foi de determinar a ocupação do tramo mais carregado caso as viagens dos usuários de ônibus fossem realizadas de forma direta entre a origem e destino. Para realizar tal atividade foi necessária, em primeiro lugar, a pesquisa sobe e desce dos usuários de ônibus realizada na cidade de São Carlos no ano de 2001.

Nesta pesquisa a área urbana da cidade foi dividida em 41 áreas ou zonas. Estas áreas foram consolidadas em 23 zonas para atender uma limitação de programa computacional *Integration*, utilizado na próxima atividade, que permite, no máximo, 25 zonas de origem e destino. As zonas consolidadas foram introduzidas no programa computacional *TransCAD*, com o qual foram definidos os centróides de cada zona.

O programa computacional *TransCAD* também foi alimentado com a rede de linhas de ônibus que operam na cidade. Com estes dois mapas, foi gerado um terceiro mapa que continha os centróides e os tramos que os conectavam através do menor caminho. Com o mapa gerado e a pesquisa sobe e desce, o *TransCAD* gerou um mapa com os carregamentos dos tramos e foi possível determinar o tramo mais carregado.

A atividade seguinte seria a determinação da capacidade máxima de atendimento à demanda. Para isso foi projetada uma via principal com uma estação *off-line* (figura 4.2). Em primeiro lugar foi verificada a capacidade da via principal, sem veículos entrando ou saindo da estação. O mesmo procedimento foi feito para veículos entrando e saindo da estação. Para simular a parada dos veículos na estação foi utilizado um módulo que simula parada de ônibus. Neste módulo foi necessário o levantamento de tempo de embarque. Este tempo foi observado durante a exibição do vídeo do projeto ULTra.

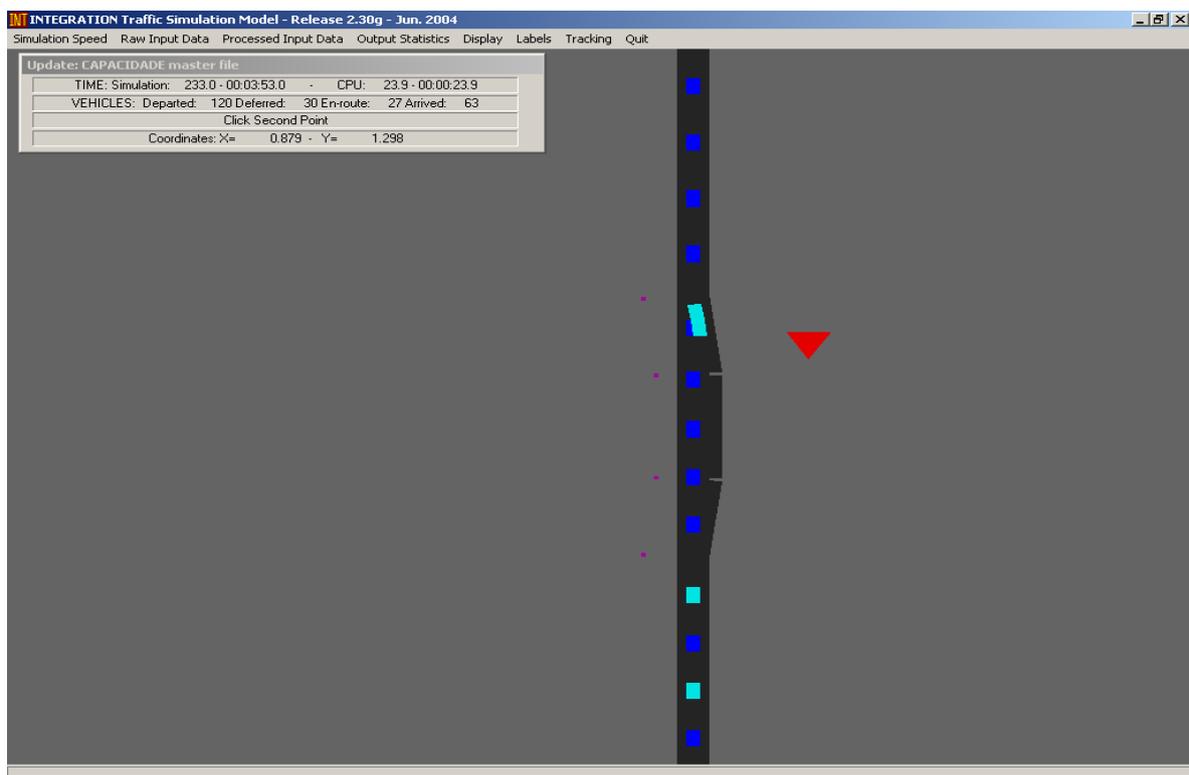


Figura 4.2 – Imagem da simulação de uma via com uma estação

Partiu-se de uma demanda de 100 veíc/h na via principal e 25 veíc/h na estação até atingir a demanda de 1500 veíc/h na via principal e de 150 veíc/h na

estação. Nesta parte da simulação foram coletados e armazenados os tempos de viagem e posteriormente calculadas as velocidades operacionais.

Para alimentar o *Integration* foi necessário determinar alguns parâmetros, que foram baseados no trabalho de Szillat (2001):

- A velocidade máxima em um tramo seria de 40 km/h, ou seja, seria a velocidade de fluxo livre.
- A densidade de congestionamento é de 125 veíc/km. Como o TPI opera por sistemas de bloco, foi adotado que cada bloco teria o tamanho do veículo (4 metros). Para prevenir qualquer erro de posição foi adotado o distanciamento mínimo de um bloco entre os veículos. Portanto, em 8 metros (dois blocos) há um veículo, resultando na densidade 125 veíc/km, citada anteriormente.
- A partir da equação (4.1), foi calculada a distância mínima que os veículos devem guardar entre si:

$$\Delta x = t_r + \frac{v^2}{2a} + \varepsilon_{pos} \quad (4.1)$$

Δx = distância entre os veículos, em metros;

t_r = tempo de reação, adotado: 0,3 s (SZILLAT, 2001);

v^2 = velocidade do veículo em m/s;

a = desaceleração, adotado: 3,0 m/s²;

ε_{pos} = erro de posição, adotado 4 metros (um bloco).

A partir da distância entre os veículos, foi determinada a densidade de tráfego. Com a densidade do tráfego e a velocidade do fluxo, foi determinado o fluxo de

veículos. Traçando o gráfico de fluxo x velocidade, foi possível determinar o fluxo de saturação e a respectiva velocidade (velocidade de capacidade).

Com base nestes dados, foi possível traçar o modelo de fluxo proposto por Van Aerde (2004). Para tanto, foi necessário traçar uma nova relação com as equações 4.2 a 4.7:

$$k = \frac{1}{c_1 + \frac{c_2}{v_f - v} + c_3 v} \quad (4.2)$$

$$q = vk \quad (4.3)$$

$$c_1 = c_{vc} c_2 \quad (4.4)$$

$$c_2 = \frac{1}{k_j \left(c_{vc} + \frac{1}{v_f} \right)} \quad (4.5)$$

$$c_3 = \frac{1}{v_c} \left(\frac{v_c}{q_c} - c_1 - \frac{c_2}{v_f - v_c} \right) \quad (4.6)$$

$$c_{vc} = \frac{2v_c - v_f}{(v_f - v_c)^2} \quad (4.7)$$

k: densidade de fluxo (veíc/km);

v: velocidade (km/h);

v_f : velocidade de fluxo livre;

c_1 : constante de calibração 1 (km);

c_2 : constante de calibração 2 (km²/h);

c_3 : constante de calibração 3 (h);

v_c : velocidade correspondente à capacidade (km/h);

q_c : fluxo de saturação (veíc/h);

k_j : densidade de congestionamento (veíc/km);

De posse destas informações, foi possível alimentar os arquivos de entrada do *Integration*. Para os tramos da via principal, foram utilizados os seguintes dados:

$$K_j = 125 \text{ veíc/km}$$

$$V_f = 40 \text{ km/h}$$

$$q_c = 1380 \text{ veíc/h}$$

$$v_c = 25 \text{ km/h}$$

Para os tramos que se situam na estação foi utilizada uma velocidade menor, por conta de maior trecho com situações perigosas. Os dados utilizados foram:

$$K_j = 125 \text{ veíc/km}$$

$$V_f = 20 \text{ km/h (valor adotado)}$$

$$q_c = 1235 \text{ veíc/h}$$

$$v_c = 15 \text{ km/h}$$

4.2.3. Avaliação do tempo de viagem por passageiro

Para realizar esta avaliação foram necessários os dados coletados em campo durante duas viagens de ônibus. Foram colhidos, para cada passageiro, ponto e o horário de embarque e desembarque. Com auxílio do mapa de itinerários dos ônibus da cidade, foi determinada a distância que cada passageiro percorreu utilizando o ônibus e determinada a velocidade média em cada viagem.

Para a simulação foram necessários os carregamentos no tramos e os dados coletados de tempo de viagem de usuários. Primeiro foi traçado o trajeto realizado pelo ônibus. Neste trajeto foram introduzidos os locais de embarque e desembarque

de algumas viagens observadas, por conta da limitação de zonas de origem e destino admitidas pelo programa. Foram impostas restrições baseadas na observação das características da malha viária da cidade de São Carlos.

Para os tramos considerados de tráfego local, o fluxo inicial foi considerado igual a 100 veíc/h. Para os tramos de tráfego médio, o fluxo inicial considerado foi igual a 250 veíc/h e para os tramos de tráfego pesado, o fluxo inicial considerado foi de 500 veíc/h. O fluxo foi incrementado até atingir 500, 1250 e 3000 veíc/h. Nesta parte da simulação foram coletados e armazenados os tempos de viagem e posteriormente calculadas as velocidades operacionais.

4.2.4. Avaliação do tempo de viagem de todos os passageiros

A partir do mapa, com os tramos carregados gerado pelo *TransCAD*, foi projetada a imagem do mapa no *Integration*. A rede foi simplificada de forma à atender a limitação do *Integration* para números de tramos. As interseções dos tramos foram consideradas do tipo rotatória, diferente do projeto ULTra que utiliza interseções em desnível. A Figura 4.3 mostra a rede resultante.

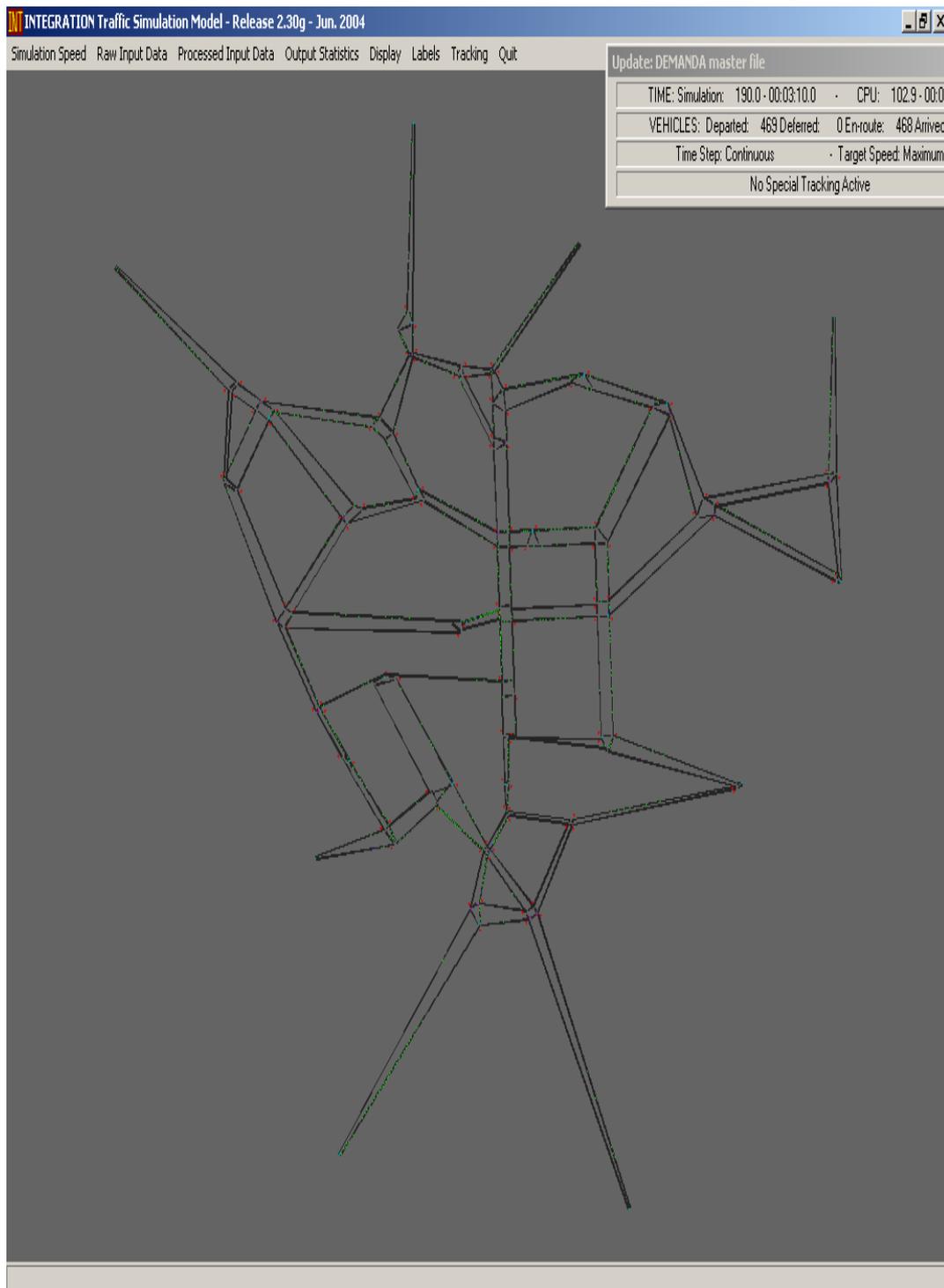


Figura 4.3 – Imagem da rede resultante no *Integration*

A demanda usada foi resultado da consolidação das zonas de OD e da distribuição das demandas menores que 5 viagens, por conta de limitação de número de pares de OD para alimentar o *Integration*. Foram simuladas duas horas

de viagem devido à extensão da rede. A cada 10 minutos foi registrada a imagem da rede para avaliar a sua dinâmica. Ao final da simulação foi possível comparar a velocidade média da rede com a velocidade operacional do ônibus.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos e serão feitas análises sobre estes resultados. Em primeiro lugar, serão apresentados os resultados referentes à determinação da melhor tecnologia para o transporte público urbano em São Carlos. Em seguida, serão apresentados os resultados da caracterização da operação do TPI em São Carlos.

5.1. Seleção da Tecnologia

Após a elaboração da planilha para a obtenção dos pesos dos atributos, esta foi enviada para um total de 46 pesquisadores, obteve-se a resposta de 15 pesquisadores. A mesma planilha foi aplicada em um grupo de 15 usuários cativos (estudantes e trabalhadores) de ônibus em São Carlos.

Cada planilha foi processada e a partir daí, determinado o peso para cada atributo. Em primeiro lugar foram comparados os aspectos *econômico*, *ambiental* e *social*, e foi obtido o seguinte resultado, apresentado na tabela 5.1:

Tabela 5.1 – Peso relativo dos aspectos econômico, ambiental e social

Aspecto	PESQUISADOR				USUÁRIO			
	Médio	Máx.	Mín.	Desvio Padrão	Médio	Máx.	Mín.	Desvio Padrão
Econômico	0,455	0,751	0,105	0,229	0,371	0,730	0,055	0,214
Ambiental	0,311	0,714	0,070	0,228	0,269	0,730	0,067	0,235
Social	0,233	0,637	0,059	0,164	0,360	0,714	0,081	0,173

Para o grupo de pesquisadores, nota-se que o aspecto *econômico* é o mais importante, seguido do aspecto *ambiental* e pelo aspecto *social*. Pode se observar que a percepção dos avaliadores é bem diversa, como pode ser visto pelos máximos, mínimos e desvio-padrão. Para o grupo de usuários, o aspecto *social* é tão importante quanto o *econômico* e estes são mais importantes do que o aspecto *ambiental*. Também entre os usuários a percepção é bem diversa.

Para a matriz dos atributos do aspecto econômico foi obtido o resultado apresentado na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Peso relativo dos atributos econômicos

Atributo	PESQUISADOR				USUÁRIO			
	Médio	Máx.	Mín.	Desvio Padrão	Médio	Máx.	Mín.	Desvio Padrão
Tarifa	0,366	0,712	0,073	0,195	0,420	0,750	0,043	0,222
Subsídio	0,184	0,522	0,036	0,164	0,199	0,635	0,048	0,188
Implantação	0,218	0,548	0,077	0,132	0,190	0,390	0,067	0,094
Oper./Manut.	0,232	0,461	0,055	0,145	0,191	0,402	0,040	0,127

Para os pesquisadores, o atributo *tarifa* é o mais importante dentre os do aspecto econômico, sendo seguido pelo *custo de operação e manutenção* e *custo de implantação*, que possuem importância relativa semelhante. O atributo menos importante é o *subsídio*, na visão do grupo de pesquisadores. Mais uma vez é

importante ressaltar que a avaliação é bem diversa. Para os usuários, o atributo mais importante é a *tarifa*, uma vez que é o atributo mais facilmente percebido pelos mesmos. Os outros três atributos têm importância semelhante entre si.

Para a matriz dos atributos do aspecto ambiental foi obtido o resultado apresentado na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Peso relativo dos atributos ambientais

Atributo	PESQUISADOR				USUÁRIO			
	Médio	Máx.	Mín.	Desvio Padrão	Médio	Máx.	Mín.	Desvio Padrão
<i>Intr. visual</i>	0,062	0,112	0,032	0,022	0,084	0,258	0,030	0,076
<i>Estrut. urb.</i>	0,270	0,503	0,043	0,141	0,134	0,502	0,043	0,114
<i>Cons. energia</i>	0,257	0,434	0,071	0,111	0,205	0,444	0,057	0,107
<i>Pol. atmosf.</i>	0,240	0,391	0,043	0,087	0,311	0,572	0,060	0,147
<i>Pol. son.</i>	0,172	0,308	0,070	0,076	0,266	0,664	0,071	0,178

Para os pesquisadores, os atributos mais importantes são *adequação à estrutura urbana, consumo de energia e poluição atmosférica*: o primeiro é uma preocupação constante no meio acadêmico e os dois últimos são problemas amplamente debatidos pela sociedade. Bem menos importante, o atributo *poluição sonora*, que ainda não configura um problema em cidades de porte médio e, por último, o atributo *intrusão visual* que é um problema pouco debatido no Brasil. Nestes atributos houve uma menor diversidade nas avaliações.

Diferente do resultado obtido na avaliação por parte dos pesquisadores, a *poluição atmosférica* e a *poluição sonora* são os atributos mais importantes, por serem mais perceptíveis ao usuário. O *consumo de energia*, como já dito, passa por um amplo debate na sociedade. A *adequação à estrutura urbana* e a *intrusão visual*

tem pequena importância, uma vez que a grande maioria dos avaliadores não encara esses fatores como problemas.

Para a matriz dos atributos do aspecto social foi obtido o resultado apresentado na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Peso relativo dos atributos sociais

Atributo	PESQUISADOR				USUÁRIO			
	Médio	Máx.	Mín.	Desvio Padrão	Médio	Máx.	Mín.	Desvio Padrão
<i>Acessibilidade</i>	0,107	0,171	0,024	0,049	0,080	0,141	0,015	0,041
<i>Freqüência</i>	0,106	0,212	0,021	0,051	0,086	0,189	0,012	0,051
<i>Tempo</i>	0,108	0,209	0,043	0,050	0,126	0,379	0,040	0,084
<i>Lotação</i>	0,082	0,229	0,042	0,050	0,096	0,267	0,034	0,040
<i>Confiabilidade</i>	0,105	0,165	0,042	0,032	0,088	0,230	0,012	0,061
<i>Segurança</i>	0,157	0,285	0,072	0,071	0,090	0,248	0,033	0,061
<i>Veículo</i>	0,062	0,129	0,019	0,029	0,070	0,189	0,014	0,046
<i>Parada</i>	0,049	0,129	0,019	0,029	0,076	0,147	0,015	0,046
<i>Informação</i>	0,055	0,129	0,018	0,034	0,031	0,070	0,010	0,020
<i>Transbord.</i>	0,074	0,220	0,016	0,058	0,119	0,198	0,014	0,052
<i>Operador</i>	0,037	0,084	0,015	0,017	0,050	0,111	0,015	0,026
<i>Via</i>	0,058	0,122	0,019	0,029	0,088	0,181	0,010	0,054

Para os pesquisadores, o atributo mais importante é a *segurança* e, em seguida, o *tempo de viagem*, a *acessibilidade*, a *freqüência* e a *confiabilidade*. Nesta avaliação, houve uma nítida divisão entre a importância relativa dos atributos: o grupo dos atributos mais importantes (*segurança*, *tempo de viagem*, *acessibilidade*, *freqüência* e *confiabilidade*) e, em outro grupo, os atributos menos importantes (*lotação*, *transbordabilidade*, *tecnologia do veículo*, *condição da via*, *sistema de informações*, *características da parada* e *comportamento do operador*).

Os usuários avaliaram que os atributos mais importantes são o *tempo de viagem* e a *transbordabilidade*. Isso é explicado pelo fato de que as viagens de ônibus são demoradas em função do tamanho da cidade, e que os usuários avaliam que o transbordo é incômodo. Os atributos *lotação*, *segurança*, *estado das vias*, *confiabilidade*, *freqüência*, *acessibilidade* e *características da parada* vêm a seguir como as mais importantes.

A avaliação por parte dos usuários de que a *lotação* e o *estado da via* são tão importantes quanto a *segurança*, a *confiabilidade*, a *freqüência* e a *acessibilidade* dá-se pelo fato de que existe certo desconforto durante a viagem com estes dois atributos. Vale lembrar que se tratam de usuários cativos que utilizam o transporte coletivo durante o horário de pico e que o estado da superfície de rolamento do pavimento encontra-se inadequado em grande parte das vias.

O resultado final da determinação dos pesos relativos dos atributos, que se encontra na figura 5.1, aponta, para ambos os grupos, que o atributo mais importante é a tarifa. De modo geral, para o grupo de pesquisadores, os atributos do aspecto econômico são os mais importantes, seguidos dos atributos do aspecto ambiental e por último, os atributos do aspecto social. Para o grupo de usuários, os atributos do aspecto ambiental são tão importantes quanto os do aspecto econômico e os atributos do aspecto social têm uma importância bem maior do que para os pesquisadores.

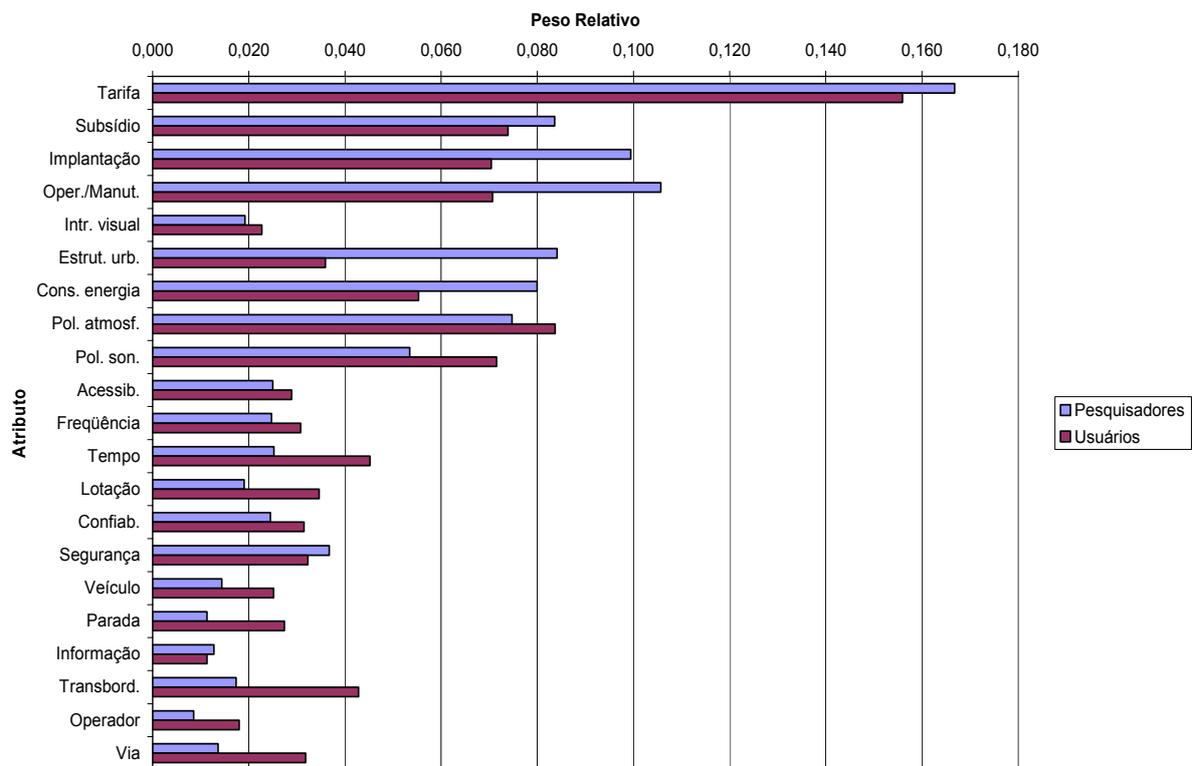


Figura 5.1 – Peso relativo dos atributos

A segunda fase da pesquisa consistia na comparação entre as tecnologias dentro de cada atributo. A planilha elaborada para esta fase foi enviada aos 15 pesquisadores que participaram da primeira fase, obtendo-se a resposta de 11 deles, e foi respondida pelos 15 mesmos usuários que participaram da fase inicial. O resultado final é apresentado na tabela 5.5.

Em termos gerais, as avaliações das tecnologias foram semelhantes. A única inversão de preferência na avaliação foi detectada no atributo *adequação à estrutura urbana*, na qual os pesquisadores avaliaram que a alternativa TPI é mais interessante que a alternativa ônibus. Os usuários avaliaram que a modificação

necessária para a implantação do TPI causaria transtornos às suas rotinas e à cidade.

Tabela 5.5 – Avaliação das tecnologias

Atributo	Pesquisador		Usuário	
	Ônibus	TPI	Ônibus	TPI
Tarifa	0,500	0,500	0,500	0,500
Subsídio	0,703	0,297	0,726	0,274
Custo de Implantação	0,789	0,211	0,779	0,221
Custo de Operação	0,722	0,278	0,733	0,267
Intrusão Visual	0,399	0,601	0,488	0,512
Estrutura Urbana	0,403	0,597	0,611	0,389
Consumo de Energia	0,158	0,842	0,217	0,783
Poluição Atmosférica	0,153	0,847	0,132	0,868
Poluição Sonora	0,139	0,861	0,187	0,813
Acessibilidade	0,500	0,500	0,500	0,500
Frequência	0,202	0,798	0,264	0,736
Tempo de Viagem	0,320	0,680	0,253	0,747
Lotação	0,305	0,695	0,320	0,680
Confiabilidade	0,268	0,732	0,294	0,706
Segurança	0,447	0,553	0,352	0,648
Veículo	0,228	0,772	0,189	0,811
Parada	0,500	0,500	0,500	0,500
Sistema de Informação	0,500	0,500	0,500	0,500
Transbordabilidade	0,318	0,682	0,238	0,762
Operador	0,249	0,751	0,333	0,667
Via	0,323	0,677	0,274	0,726

De posse dos pesos relativos e da comparação, determinou-se a tecnologia mais adequada para uma cidade de porte médio. A tabela 5.6 mostra o resultado final, que aponta que o TPI é ligeiramente superior ao ônibus, tanto na avaliação por parte dos pesquisadores quanto por parte dos usuários, sendo que a avaliação dos usuários leva a uma superioridade ainda maior por parte do TPI sobre o ônibus.

Tabela 5.6 – Comparação entre as tecnologias

Atributo	Pesquisador		Usuário	
	Ônibus	TPI	Ônibus	TPI
Tarifa	0,083	0,083	0,078	0,078
Operação/manutenção	0,059	0,025	0,054	0,020
Implantação	0,078	0,021	0,055	0,016
Estrutura urbana	0,076	0,029	0,052	0,019
Subsídio	0,008	0,012	0,011	0,012
Consumo de energia	0,034	0,050	0,022	0,014
Poluição atmosférica	0,013	0,067	0,012	0,043
Poluição Sonora	0,011	0,063	0,011	0,073
Segurança	0,007	0,046	0,013	0,058
Tempo de viagem	0,012	0,012	0,014	0,014
Acessibilidade	0,005	0,020	0,008	0,023
Frequência	0,008	0,017	0,011	0,034
Confiabilidade	0,006	0,013	0,011	0,024
Intrusão visual	0,007	0,018	0,009	0,022
Lotação	0,016	0,020	0,011	0,021
Transbordabilidade	0,003	0,011	0,005	0,020
Veículo	0,006	0,006	0,014	0,014
Via	0,006	0,006	0,006	0,006
Informação	0,006	0,012	0,010	0,033
Parada	0,002	0,006	0,006	0,012
Operador	0,004	0,009	0,009	0,023
Total	0,452	0,548	0,422	0,578

5.2. Avaliação da Tecnologia

Em primeiro lugar, será descrita a operação do ônibus na cidade de São Carlos que é uma cidade com aproximadamente 210.000 habitantes, com sistema de transporte por ônibus concessionado a uma empresa. A operação é feita com aproximadamente 110 ônibus, operando em 56 linhas, na sua maioria, diametrais, transportando cerca de 65.000 passageiros/dia útil.

5.2.1. Avaliação do tempo de atendimento

O resumo do padrão de chegadas obtido pela observação dos intervalos de chegadas consecutivas está descrito na tabela 5.7. O padrão de chegadas considerado na simulação do sistema do TPI, obtido usando a técnica de Monte Carlo, está descrito na tabela 5.8.

Tabela 5.7 – Padrão de chegadas observado					Tabela 5.8 – Padrão de chegadas simulado				
Intervalo	Pto Médio	Amos.	%	% Acum.	Intervalo	Pto Médio	Amos.	%	% Acum.
0 - 15	8	14	36%	36%	0 - 15	8	13	33%	33%
16 - 30	23	6	15%	51%	16 - 30	23	6	15%	49%
31 - 45	38	6	15%	67%	31 - 45	38	9	23%	72%
46 - 60	53	5	13%	79%	46 - 60	53	3	8%	79%
61 - 120	91	4	10%	90%	61 - 120	91	3	8%	87%
121 - 180	151	3	8%	97%	121 - 180	151	3	8%	95%
181 - 240	211	1	3%	100%	181 - 240	211	2	5%	100%

Trinta embarques foram observados na pesquisa de campo, com o valor médio de seis segundos, os quais foram usados na simulação do sistema de TPI. A demanda estimada, com base nos percursos dos ônibus, é igual a 1813 passageiros. Utilizando uma ocupação média igual 1,4 passageiro/veículo, o fluxo estimado de veículos para atender a demanda é igual a 1295 veículos. Os outros resultados obtidos com a simulação estão resumidos na tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Simulação do tempo de atendimento

Atributo	Ônibus	TPI					
		2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2
Headway	--						
Fluxo máximo (veículos/hora)	--	1333	1385	1440	1500	1565	1636
Porcentagem da via ocupada	--	97%	94%	90%	86%	83%	79%
Tempo médio de processam. (s)	503	1685	437	106	58	60	46
Tempo máximo de processam. (s)	1628	2906	803	207	160	135	123
Nº médio de pass. no sistema	11,4	9,8	6,7	2,4	1,7	1,8	1,6
Nº máximo de pass. no sistema	20	19	11	7	4	5	4

A simulação iniciou-se com *headway* de 2,7 segundos. Apesar do fato do número médio de passageiros no sistema para o TPI ser ligeiramente menor que no caso do ônibus para um *headway* de 2,7 segundos, o tempo médio de processamento é 3,35 vezes maior no TPI do que para o ônibus. Este fato sugere a necessidade de um exame cuidadoso de vários parâmetros para evitar conclusões enganosas. Uma pequena redução no valor do *headway* (de 2,6 segundos para 2,5 segundos) produz uma melhora significativa no nível de serviço, com uma redução em quatro vezes no tempo médio de processamento.

Existe outra importante redução, cerca de 50 % no tempo médio de processamento quando o *headway* foi reduzido de 2,5 segundos para 2,4 segundos. Os ganhos subseqüentes não são tão grandes, porque as características da aceleração do veículo e tempo de embarque dos passageiros tornam-se mais importantes no tempo total de processamento.

5.2.2. Determinação da capacidade máxima

No corredor de ônibus da cidade a freqüência chega a 63 veículos/h e, considerando que a lotação do veículo de 50 passageiros, chega-se à oferta de 3150 assentos/h.

Muitas referências (LOWSON, 2003; ADVANCED TRANSPORT SYSTEM, 2005; SZILLAT, 2001) descrevem a capacidade de TPI estimado no fluxo máximo possível com base apenas *headway* de segurança admissível. No caso do ULTra, por exemplo, um *headway* mínimo de três segundos resulta em um fluxo de 1200

veículos por hora. Considerando que cada veículo tem quatro assentos, isso conduz a uma capacidade teórica de 4800 assentos por hora. Para uma ocupação média de 1,4 passageiros por veículo, como o valor observado em Cardiff, a capacidade real vai para 1680 passageiros por hora (LOWSON, 2003).

A simulação, feita em SIG, aponta que, se as viagens fossem realizadas de forma direta entre origem e destino, o carregamento diminuiria para 1158 passageiros no trecho mais carregado (figura 5.2). Utilizando o fator de ocupação de 1,4 passageiros por veículo, foi estimado que seriam necessários 827 veículos para atender a demanda máxima. A tabela 5.10 apresenta os resultados obtidos através de simulação de um corredor com uma estação.

Tabela 5.10 – Velocidade operacional média dos veículos

		Fluxo na Estação (veíc/h)						
		0 veíc	25 veíc	50 veíc	75 veíc	100 veíc	125 veíc	150 veíc
Fluxo na Via Principal (veículos/hora)	100	38,9	35,1	31,5	30,7	28,4	27,6	25,5
	200	38,3	36,1	34,2	31,7	30,4	29,4	27,8
	300	37,6	35,3	34,4	33,2	31,5	30,0	28,9
	400	36,9	35,2	33,8	32,7	31,5	30,3	29,0
	500	36,0	34,3	33,4	32,7	31,4	30,3	29,5
	600	35,1	33,7	32,8	31,8	30,7	29,8	28,9
	700	34,1	33,0	32,0	31,1	30,3	29,4	28,4
	800	33,2	32,2	31,1	30,2	29,4	28,5	27,4
	900	32,0	31,1	30,1	29,3	28,3	27,2	25,6
	1000	30,5	29,5	28,6	27,6	26,7	25,6	24,2
	1100	28,8	27,8	26,7	25,7	24,4	23,0	21,3
	1200	26,1	24,6	22,6	21,1	19,8	17,7	15,4
	1300	21,0	18,9	16,3	13,8	11,4	9,3	8,3
	1400	12,0	9,7	8,7	7,4	6,4	5,9	5,4
	1500	6,6	6,1	5,5	4,9	4,5	4,2	3,9

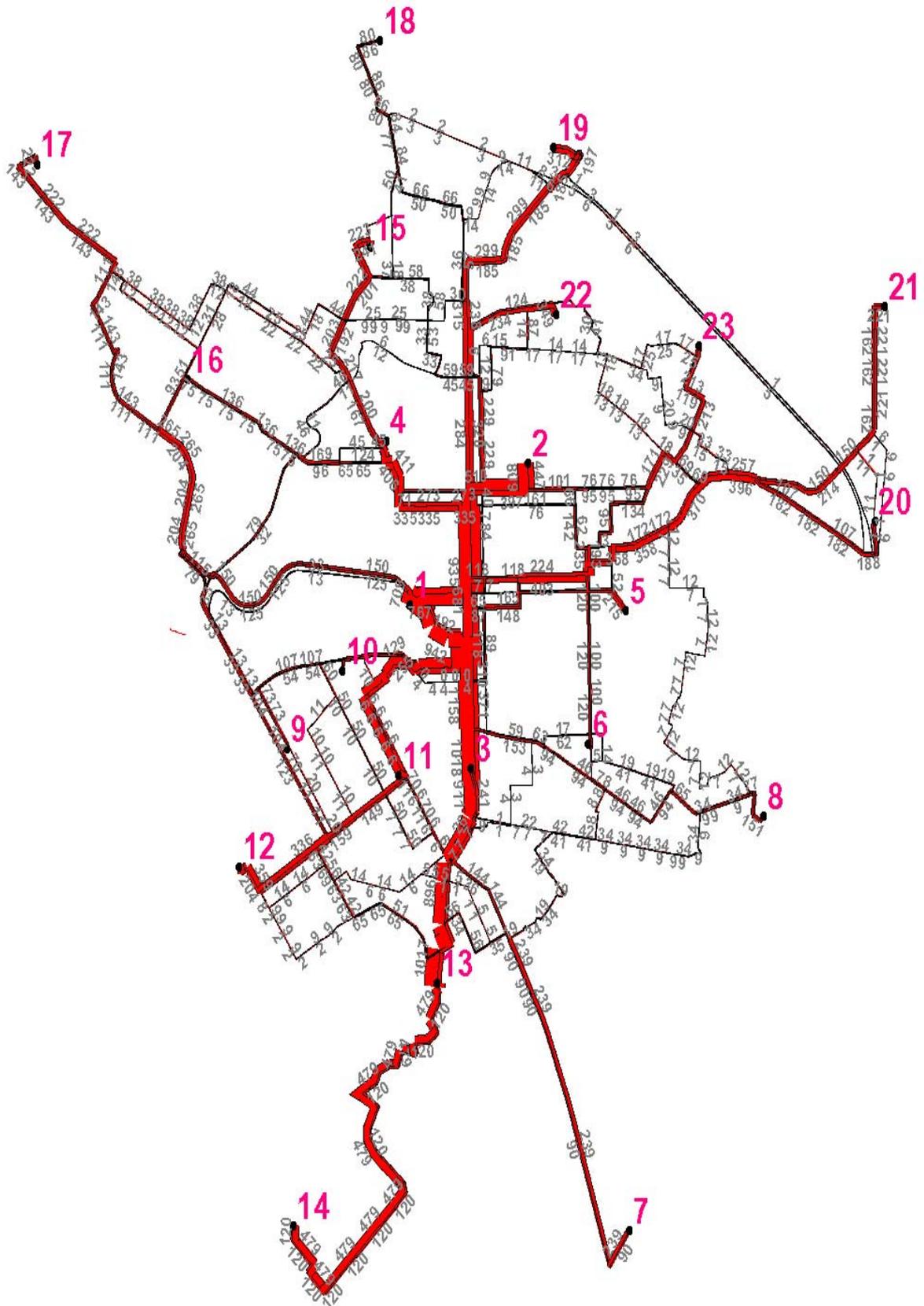


Figura 5.2 – Carregamento dos *links* simulados através do SIG

Caso houvesse uma demanda por embarques igual à observada em uma estação no centro da cidade, no corredor de ônibus (78 passageiros/hora ou 57 veículos/hora), a velocidade operacional obtida seria igual a 22,6 km/h, superior à velocidade operacional dos ônibus atualmente, que é de 18,0 km/h.

Como se pode observar, até o fluxo de 1200 veículos/hora na via principal, a velocidade operacional não sofre decréscimos significativos, comparando-se o aumento do de fluxo de veículos. A partir do fluxo de 1300 veículos/horas na via principal, a velocidade operacional diminui consideravelmente, isto se deve ao fato de que o fluxo na via aproxima-se do fluxo de saturação, que é estimado em 1380 veículos/hora. Portanto para estimativa máxima de capacidade, será adotado o valor de 1200 veículos/hora, que é a estimativa feita pelo projeto ULTra.

5.2.3. Avaliação do tempo de viagem por passageiro

A coleta de dados durante a viagem apresentou o resultado da tabela 5.11 enquanto a tabela 5.12 demonstra o resultado obtido pela simulação. Como observado, o tempo de viagem obtido para o TPI é inferior ao tempo de viagem observado para as viagens através do ônibus. Mesmo em situação onde as vias do TPI possuem um grande volume de tráfego, a velocidade operacional é praticamente 50% maior que a velocidade operacional do ônibus. A velocidade sofre pouca influência de incremento do tráfego. Convém lembrar que as vias do TPI não possuem cruzamento em nível, o que favorece amplamente as viagens feitas em TPI e que as viagens são feitas de forma direta, entre a origem e destino.

Tabela 5.11 – Características da viagem por ônibus coletados

Período	Pass. N°	Dist. média (m)	Tempo médio (s)	Tempo médio (min)	Vel. média (km/h)
Manhã	65	6728	1183	19:43	20,5
Tarde	77	7843	1379	22:59	20,5

Tabela 5.12 – Características da viagem simulada por TPI

Baixo (veíc/h)	Médio (veíc/h)	Alto (veíc/h)	Veíc/km (km)	Veíc/h (h)	Exten. (km)	Tempo (min)	Vel. Média (km/h)
0	0	0	119,6	3,5	7,97	14,00	34,2
100	250	600	119,6	3,5	7,97	14,00	34,2
150	375	900	119,6	3,5	7,97	14,00	34,2
200	500	1200	119,6	3,7	7,97	14,80	32,3
250	625	1500	119,6	3,7	7,97	14,80	32,3
300	750	1800	119,6	3,8	7,97	15,20	31,5
400	1000	2400	119,6	4,1	7,97	16,40	29,2
500	1250	3000	119,6	4,0	7,97	16,00	29,9

5.2.4. Avaliação do tempo de viagem de todos os passageiros

Atualmente a operação das 56 linhas percorre 622 km por hora e consomem 34,5 horas. A velocidade média é de 18,0 km.

A simulação demonstrou que os veículos do TPI percorreriam 37438 km e consumiriam 1144 horas, resultando em uma velocidade média de 32,7km. Apesar da velocidade do TPI ser 80% maior que a velocidade do ônibus, a simulação mostra que se houvesse interseções em nível do tipo rotatória o fluxo de veículos apresentaria congestionamentos nas aproximações das interseções.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e aplicar uma metodologia para selecionar e avaliar tecnologias mais adequadas para o transporte público urbano. O uso de AHP mostrou-se eficaz para este propósito, uma vez que foi possível comparar atributos de diversas naturezas entre si. O uso da simulação em computadores tornou possível avaliar e comparar a operação entre o ônibus e o TPI.

O resultado desta comparação mostrou que tanto para os pesquisadores quanto para os usuários, o aspecto *econômico* é o mais importante. Para os pesquisadores, no entanto, este é muito mais importante que os outros, uma vez que a experiência deste grupo aponta para a necessidade de equilíbrio financeiro para a gestão do sistema. O aspecto *ambiental* também toma uma importância relativa grande. A questão ambiental tornou-se foco de discussão nas últimas décadas e muitos destes pesquisadores têm desenvolvido trabalhos na área de transporte sustentável. O aspecto *social* tem importância menor que os outros dois na visão dos pesquisadores. Esta avaliação reflete uma visão de que o TPU só pode oferecer um serviço de baixa qualidade.

Para os usuários o aspecto *social* é tão importante quanto o aspecto econômico. Esta importância é dada pelo fato da qualidade do TPU oferecido estar aquém das expectativas deste grupo. O aspecto *ambiental* tem um peso relativo inferior aos outros, mesmo assim tem um peso superior ao avaliado pelos pesquisadores. Uma explicação é que os usuários também têm a preocupação com a questão ambiental, assim como a sociedade em geral. Outra explicação para a avaliação é que parte dos usuários entrevistados era de estudantes do nível superior, provavelmente mais conscientes da questão ambiental que a média dos usuários.

Dentre os atributos econômicos, a *tarifa* é a mais importante para a determinação da tecnologia. Como dito no início deste trabalho, o transporte público é o modo mais democrático e, na visão das pessoas consultadas, existe a necessidade de assegurar a tarifa mais acessível quanto possível como forma de manter a acessibilidade ao meio. Os outros atributos têm importâncias relativas semelhantes para ambos os grupos. Uma dificuldade encontrada para avaliação, por parte dos usuários, foi a falta de conhecimento para considerar os custos relativos ao TPU.

Dentre os atributos ambientais, houve diferenças significativas entre os pesquisadores e os usuários. Para os pesquisadores, a *adequação à estrutura urbana* tem sido uma preocupação constante, já que as cidades estão se tornando ambientes insustentáveis. O *consumo de energia* também tornou-se um grave problema, uma vez que o transporte público urbano em cidades médias brasileiras é, em grande parte, dependente de petróleo, fonte não renovável e poluidor, que reflete

também na importância relativa do atributo *poluição atmosférica*. Os outros dois atributos (*poluição sonora* e *intrusão visual*) têm importância bem menor.

Para os usuários, os atributos mais importantes são a *poluição atmosférica*, talvez por ser mais amplamente debatido pela sociedade, e a *poluição sonora*, problema que os usuários têm maior percepção. Os problemas do consumo de energia e a dependência do combustível fóssil também estão claros para os usuários. Os demais atributos obtiveram menor importância, uma vez que os usuários não visualizam uma paisagem urbana diferente da que existe atualmente e não consideram a possibilidade de mudanças nesta.

Para os atributos sociais, novamente houve diferença significativa na avaliação. Para os pesquisadores, existem dois grupos distintos: um mais ligado às características operacionais (*segurança, tempo de viagem, acessibilidade, frequência* e *confiabilidade*), que são os mais importantes na visão dos pesquisadores, e outro ligado ao conforto do usuário (*lotação, transbordabilidade, tecnologia do veículo, condição da via, sistema de informações, características da parada* e *comportamento do operador*). Como citado no início do capítulo, a qualidade, em termos de conforto para o usuário, fica em segundo plano.

Para os usuários, o *tempo de viagem* e a *transbordabilidade* são os atributos mais importantes. Isso pode ser explicado pelo fato de que o tempo de viagem é longo se comparado ao tamanho da cidade e a transbordabilidade é um incômodo aos usuários na cidade de São Carlos, que não estão acostumados e o sistema não propicia transbordos de modo adequado. Os usuários também avaliam que os

atributos ligados ao conforto são tão importantes quanto às características operacionais, o que demonstra que o usuário busca um transporte de qualidade tanto de ponto de vista operacional como em termos de conforto.

O resultado final apontou que, para os dois grupos, o atributo mais importante é a *tarifa*. Para os pesquisadores, os atributos econômicos são os mais importantes, em seguida os atributos ambientais e por último, os atributos sociais, refletindo a avaliação inicial. Para os usuários, depois da *tarifa*, os atributos econômicos e ambientais intercalaram-se em importância. E os atributos sociais ficaram em posição de menor importância.

Pode-se avaliar que, dada a quantidade de atributos sociais, estes tiveram menor importância relativa. Esta é uma falha desta avaliação. Uma pesquisa com menor quantidade de atributos sociais poderia apontar para um outro resultado.

Os dois grupos avaliaram de forma semelhante as duas tecnologias. A única diferença ficou por conta do atributo *adequação à estrutura urbana*, em que os pesquisadores avaliaram que o TPI seria mais adequado à cidade do que o ônibus. Os usuários avaliam que a implantação do TPI traria modificações e isso torna o sistema um tanto quanto indesejado. Os usuários ainda não vêem a cidade como um ambiente insustentável.

A avaliação final deu ao TPI uma ligeira vantagem no conceito dos dois grupos. Isso torna claro que existe uma necessidade de se modificar o conceito de transporte público urbano. A vantagem na avaliação do TPI deu-se no aspecto

ambiental e social, uma vez que as características do TPI são amplamente favoráveis nos aspectos citados. Ainda o grande entrave à implantação do TPI é o aspecto econômico, uma vez que possui um custo relativamente alto e que, como outras tecnologias sobre trilhos, não pode ser construída por etapas. Um exame mais amplo nos custos, envolvendo infra e superestrutura viária, veículos, centro de controle e operação, redução em tempo de viagem, acidentes, espaço urbano consumido para circulação e estacionamento, podem tornar o TPI mais atraente em termos econômicos para a sociedade.

A operação do TPI apresentou um desempenho igual ou superior ao ônibus nos itens avaliados. No primeiro item avaliado, que foi o tempo de atendimento, o TPI apresentou um desempenho satisfatório. Para o fluxo estimado no corredor de ônibus, o TPI atendeu de forma superior ao ônibus, porém com um *headway* abaixo do recomendado para o ULTra, que adota um *headway* de 3 segundos. Convém lembrar que o fluxo estimado para o atendimento nesta primeira fase foi superior ao estimado pelo *TransCAD*, situação em que o TPI atenderia a demanda com um *headway* superior ao recomendado para o ULTra.

Para determinar a capacidade máxima, foram realizadas simulações que apontaram que a capacidade máxima seria igual a 1200 veículos/hora. Esta capacidade está de acordo com o projeto ULTra, que restringe a capacidade pelo *headway* mínimo de 3 segundos. Este fluxo disponibilizaria 4800 assentos/hora, que é superior ao número de assentos disponibilizados pelo ônibus (3150 assentos/hora), para operação realizada atualmente, lembrando-se que este valor não corresponde à capacidade máxima.

Utilizando a lotação de 1,4 passageiro/veículo, a capacidade do TPI seria igual a 680 passageiros, que é 45 % superior à demanda estimada pelo SIG, que foi de 1158 passageiros. Apesar de ser um valor inferior ao número de assentos disponibilizados pelo ônibus, pode-se afirmar, com base na demanda estimada pelo SIG, que parte dos passageiros que passam pelo corredor de ônibus não teria necessidade de atravessar este trecho, caso houvesse viagens perimetrais.

Pode-se concluir que existe ainda uma margem para crescimento da demanda. Parte da demanda em alguns trechos corresponde ao tráfego de passagem, daí pode-se programar para desviar este tráfego para outras vias do TPI, desde que houvesse mais opções de vias, como forma de atingir a capacidade. Outra opção seria a construção de duas ou mais vias do TPI em determinados corredores e estações com mais de um berço para aumentar a sua capacidade de atendimento.

Na simulação do tempo de viagem em que o desempenho do TPI é bem superior ao ônibus, este desempenho deve-se ao fato do TPI fazer viagens diretas da origem ao destino, sem paradas intermediárias. As vias propostas para esta atividade tinham como características operarem sem interseção com outras vias, o que também contribuiu para o reduzido tempo de viagem. Outro fato observado é que a velocidade sofre pouca influência do tráfego.

A última atividade executada teve resultados contraditórios, pois apesar da velocidade operacional mostrar-se superior ao ônibus, a evolução do tráfego mostra que nas interseções do tipo rotatória ocorrem congestionamentos. Isso demonstra que as interseções também são pontos críticos para os veículos do TPI, assim como no tráfego de automóveis. Isso aponta para a necessidade de serem construídas interseções em desnível ou semaforizadas para o TPI. Este tipo de solução acaba encarecendo a construção da estrutura do TPI. Isso explica, em parte, o alto custo de construção, que é de aproximadamente 15 milhões de Reais/km.

Este trabalho aponta para a necessidade de buscar alternativas tecnológicas inovadoras como forma de prover um transporte de melhor qualidade para as pessoas. O resultado obtido na avaliação mostra que o TPI é uma alternativa interessante de TPU e as atividades aqui desenvolvidas demonstraram que o TPI tem desempenho superior ao ônibus, ainda que as avaliações não tenham partido de uma simulação do sistema em sua totalidade. Isso dá novo alento a prosseguir com pesquisas em soluções tecnológicas diversas ao que existe atualmente, o que contribui para a busca por um transporte público de qualidade.

Este trabalho indica que o TPI pode ser uma alternativa viável para a substituição do ônibus. Como sugestões, ficam a comparação do TPI com o automóvel, o desenvolvimento de um programa para simular o funcionamento do sistema e análise mais amplo dos custos envolvendo o TPI e o sistema existente.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADVANCED TRANSPORT SYSTEMS LTD. Summary report on ULTra passenger trials. Bristol, 2003. 6 p

ADVANCED TRANSPORT SYSTEMS LTD. ULTra Summary. Bristol, 2005. 16 p

ARIAS, Z. P. **Transporte coletivo público urbano: seleção de alternativas**. 2001. 179 p. Dissertação – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2001

BELL, J. Morgantown, West Virginia - Personal Rapid Transit (PRT). Disponível em <<http://web.presby.edu/~jtbell/transit/Morgantown>>. Acesso em 17 ago. 2006

BLY, P. H., TEYCHENNE, R. Three financial and socio-economic assessments of a personal rapid transit system. Disponível em:

<http://www.jpods.com/downloads/JPodsDetails/economic_assessments.pdf>.

Acesso em: 12 abr. 2006

BRANCO, A.; BRANCO, G.M., SCHETINI, M. Energia e poluição no transporte público. **Revista dos Transportes Públicos**. São Paulo, nº 104. 2004

BUCOLO, S.; GINN, S.; GILBERT, D. Using virtual reality models to better communicate how transport infrastructure can interface and interact with the built urban environment. Cairns, PROCEEDINGS OF THE 21st ARRB AND 11th REAAA CONFERENCE, 2003

COSTA, M. S. **Mobilidade urbana sustentável: um estudo comparativo e as bases de um sistema de gestão para Brasil e Portugal**. 2003. 182 p. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003

DEFNEYES, K. S. Hubbert's peak: the impending world oil shortage. Princeton: University Press. 2001

DEMARCHI, S. H., **Influência dos veículos pesados na capacidade e nível de serviço de rodovias de pista dupla**. 2000. 166 p. Tese – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2000

FERRAZ, A. C. P.; TORRES, I. G. E.. Transporte Público Urbano. 1^a Ed. São Carlos: Editora RiMa. 2001

FERREIRA, A. C. S.; GOMES, L. F. (1994) Critérios de Decisão em Transportes – Uma análise comparativa de dois métodos analíticos para a redução de

interdependência. CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 8º, 1994, Recife. Anais, 1994 volume 2, p 143-152

FURTADO, N. **Uma nova abordagem na avaliação de projetos de transporte: o uso das redes neurais artificiais como técnica para avaliar e ordenar alternativas**. 1998. 249 p. Tese – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1998

FURTADO, N; KAWAMOTO, E. **Avaliação de Projetos de Transporte**. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos. Apostila. 2002

GILLET, D.; CHEVROULET T. BURST: Bright Urban System for Transportation, PROCEEDINGS OF THE 2ND INTERNATIONAL WORKSHOP ON EUROPEAN SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL COLLABORATION, Newport, 1999

GARÇONI, I. Selvageria Tupiniquim. **Revista Movimento, Mobilidade & Cidadania**. Riode Janeiro, nº 1, p. 20-23, 2004

GOLD, P. A. Segurança no trânsito: Aplicações de engenharia para reduzir acidentes. Washgton: Banco Interamericano de Desenvolvimento. 1998

GOMIDE, A. A. Transporte Urbano e Inclusão Social. **Revista dos Transporte Públicos**. São Paulo, nº 103, p. 15-48, 2004

GREIVING, S.; WEGENER, M. Integration of transport and land use planning: state of the art. PROCEEDINGS OF THE 9TH WORLD CONFERENCE ON TRANSPORT RESEARCH, Seoul, 2001

HOTTA, L. H.; SILVA, A. N. R. The use of simulation to asses PRT viability as a public transportion alternative. INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF TRANSPORT SIMULATION, Lausanne, 2006

HOTTA, L. H; SAUNDERS, M. J.; SILVA, A. N. R. Transporte público individualizado: sonho intangível ou necessidade urgente? XIII CONGRESSO LATINOAMERICANO DE TRANSPORTE PÚBLICO Y URBANO , 13°. Lima, 2005

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Impactos Sociais e econômicos dos acidentes de trânsito nas aglomerações urbanas brasileiras, Brasília: ANTP. 2003

JOHANSSON B.; MARTENSSON, A. Energy and environmental costs for electric vehicles using CO₂ – neutral electricity in Sweden. Department of Environmental and Energy Systems Studies, Lund, 1999

KERR, A. D.; JAMES, P.A., CRAIG, A.P. UK Department for Transport and by the EDICT project of the EC City of Tomorrow Programme. Disponível em: <www.edict.info>. Acesso em: 07 ago. 2005

KIEFFER, J. Minimum Essential Features of PRT. **Journal of Advanced Transportation**. Volume 2, No. 3, p. 192-214, 1988

KOZERSKI, G. R.; HESS, S.C. Estimativa dos poluentes emitidos pelos ônibus e microônibus de Campo Grande/MS, empregando como combustível diesel, biodiesel ou gás natural. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**. vol.11, nº 2, p. 113-117, abr/jun 2006

LEITE, J. A Liberdade Custa Duas Passagens de Ônibus. **Revista dos Transporte Públicos**. São Paulo, nº 103, p. 101-110. 2004

LOWSON, M. A new approach to effective and sustainable urban transport, paper 03-2140, PROCEEDINGS OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Washington,D.C. 2003

MASCARÓ, J. L. Desenho Urbano e Custos de Urbanização. 2ª ed. Porto Alegre: D.C. Luzzato Editores Ltda. 1989

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Política Nacional de Mobilidade Urbana Sustentável. Disponível em: <www.cidades.gov.br>. Acesso em: 21 set. 2005

PARENT, M.; DAVIET, P. Automated urban vehicles: towards a dual mode PRT. PROCEEDINGS OF THE IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION. Minneapolis, 1996

PEREIRA FILHO, R. V. P. Proposições Decorrentes das Teorias da Segurança no Trânsito e Alternativas Possíveis. **Revista dos Transportes Públicos**. São Paulo, nº 103. 2004

POMERANZ, L. Elaboração e análise de projetos São Paulo: Ed. Hucitec Ltda. 1985

PORTUGAL, L. S. Simulação de Tráfego: Conceitos e Técnicas de Modelagem. Rio de Janeiro: Ed. Interciência. 2005

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS. Reorganização do Transporte Coletivo da Cidade de São Carlos. Relatório. São Carlos, 2001

RABBANI, S. J. R.; RABBANI, S. R. Decisions in Transportation with the Analytic Hierarchy Process. Campina Grande: UFPB/CCT.1996

RAT, H. A visão da UITP. **Revista dos Transportes Públicos**. São Paulo, nº 94. 2000

ROBERTO FILHO, V. P. (2004) Proposições Decorrentes das Teorias da Segurança no Trânsito e Alternativas Possíveis. **Revista dos Transportes Públicos**. São Paulo, nº 103, p. 49-72,.2004

RODRIGUES, M. O. **Avaliação da qualidade do transporte coletivo da cidade de São Carlos**. 2006. 74 p. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos. 2006

SANTOS, V. S. **Modelagem da geração e distribuição para escolas utilizando *Cellular Automata* e avaliação multicritério**. 2005. 104 p. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2005

SCHNEIDER, J. B. Morgantown group rapid transit (GRT) system. Disponível em: <<http://faculty.washington.edu/jbs/itrans/morg.htm>>. Acesso em: 12 abr. 2005

SILVA, A. N. R.; BRONDINO, N. C. M., AVALOS, M. S., COSTA, G. C. F. Urban Sprawl and Energy Use for Transportation in the Largest Brazilian Cities, PROCEEDINGS OF COMPUTERS IN URBAN PLANNING AND URBAN MANAGEMENT: AN URBAN SPACE ODYSSEY (CUPUM). Manoa, 2001

SUSTAINABLE HABITAT. Light Electric Vehicles. Disponível em: <<http://www.electric-bikes.com/prt>>. Acesso em: 12 fev. 2005

SZILLAT, M. T. **A Low-level PRT Microsimulation**. 2001. 209 p. Tese – University of Bristol. 2001

TAXI 2000 CORPORATION, The SkyWeb Express. Disponível em: <<http://www.skywebexpress.com>>. Acesso em: 21 mar. 2005

TÈGNER, G. Comparison of costs between bus, PRT, LRT and metro/rail. Disponível em: <<http://faculty.washington.edu/jbs/itrans/gorancomp.htm>> Acesso em: 06 out. 2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – Disponível em <www.ufmg.br>.

Acesso em 07 mar. 2007

VAN AERDE, M. (2004) – Integration release 2.30: User's Guide. Vol. I, II, III. Kingston: M. Van Aerde & Assoc. Ltd. 2004

VUCHIC, V. R. Urban Public Transportation: Systems and Technology. New Jersey: Ed. Prentice-Hill. 1981

WILDE, W. A. The simple compelling case for PRT. **Journal of Advanced Transportation**. Durham, v. 32. 1998

WYATT, R. Is Personal rapid transit inevitable? INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTERS IN URBAN PLANNING AND URBAN MANAGEMENT, 10º, FOZ DO IGUAÇU, 2007

XAVIER, J. C. Mobilidade urbana e desenvolvimento. Disponível em: <www.cidades.gov.br>. Acesso em: 16/01/2005

YODER, S. L., WESEMAN, S.E., DELAURENTIS, J. Capital costs and ridership estimates of personal rapid transit. **Transport Research Record**. Washington, volume 1704, p 58-67. 2000

ZARATTINI, C. Circular (ou não) em São Paulo. **Revista dos Transportes Públicos.**

São Paulo, nº 101, p. 47-64. 2003

ZIONI, S., 1994 – EIA/RIMA, Evoé, evoé!!! A contribuição dos estudos ambientais ao planejamento de transportes urbanos CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 8º, 1994, Recife. Anais, 1994 volume 2, p 173-180

ZUYLEN, H. V.; OUWCHAND, A. The innovation process for Personal Rapid Transit in Eindhoven. Delft: University of Technology. 2004

APÊNDICES

Apêndice A

Qual a importância relativa dos aspectos abaixo para escolha de uma tecnologia para transporte público urbano no Brasil?

Somente os campos em amarelo devem ser preenchidos.
Instruções detalhadas podem ser encontradas na planilha "Instruções".

MATRIZ PRINCIPAL

	Econômico	Ambiental	Social
Econômico	1	1	1
Ambiental	1	1	1
Social	1	1	1

Grau de Consistência

0,000000

Julgamentos consistentes!

Escala Numérica

1 - Igual importância

- 3 - Linha pouco mais importante que Coluna
- 5 - Linha muito mais importante que Coluna
- 7 - Linha bastante mais importante que Coluna
- 9 - Linha extremamente mais importante que Coluna
- 1/3 - Coluna pouco mais importante que Linha
- 1/5 - Coluna muito mais importante que Linha
- 1/7 - Coluna bastante mais importante que Linha
- 1/9 - Coluna extremamente mais importante que Linha

[PRÓXIMO PASSO](#)

Apêndice B

Qual a importância relativa dos aspectos abaixo dentro do Aspecto Econômico?

Somente os campos em amarelo devem ser preenchidos.
Instruções detalhadas podem ser encontradas na planilha "Instruções".

ASPECTO ECONÔMICO				
	Tarifa	Subsídio	Implant	Oper/Manut
Tarifa	1	1	1	1
Subsídio	1	1	1	1
Implant	1	1	1	1
Oper/Manut	1	1	1	1
<i>Grau de Consistência</i>	0,000000			

Julgamentos consistentes!

Escala Numérica

1 - Igual importância

- | | |
|---|---|
| 3 - Linha pouco mais importante que Coluna | 1/3 - Coluna pouco mais importante que Linha |
| 5 - Linha muito mais importante que Coluna | 1/5 - Coluna muito mais importante que Linha |
| 7 - Linha bastante mais importante que Coluna | 1/7 - Coluna bastante mais importante que Linha |
| 9 - Linha extremamente mais importante que Coluna | 1/9 - Coluna extremamente mais importante que Linha |

[PRÓXIMO PASSO](#)

Apêndice C

Qual a importância relativa dos aspectos abaixo dentro do Aspecto Ambiental?

Somente os campos em amarelo devem ser preenchidos.
Instruções detalhadas podem ser encontradas na planilha "Instruções".

ASPECTO AMBIENTAL

	IntrVisual	EstrUrb	ConsEnergia	PoAtmosférica	PoSonora
IntrVisual	1	1	1	1	1
EstrUrb	1	1	1	1	1
ConsEnergia	1	1	1	1	1
PoAtmosférica	1	1	1	1	1
PoSonora	1	1	1	1	1

Grau de Consistência	0,000000
-----------------------------	-----------------

Julgamentos consistentes!

Escala Numérica

1 - Igual importância

- | | |
|---|---|
| 3 - Linha pouco mais importante que Coluna | 1/3 - Coluna pouco mais importante que Linha |
| 5 - Linha muito mais importante que Coluna | 1/5 - Coluna muito mais importante que Linha |
| 7 - Linha bastante mais importante que Coluna | 1/7 - Coluna bastante mais importante que Linha |
| 9 - Linha extremamente mais importante que Coluna | 1/9 - Coluna extremamente mais importante que Linha |

[PRÓXIMO PASSO](#)

Apêndice D

Qual a importância relativa dos aspectos abaixo dentro do Aspecto Social?

Somente os campos em amarelo devem ser preenchidos.
Instruções detalhadas podem ser encontradas na planilha "Instruções".

ASPECTO SOCIAL

	Acessib	Freq	Tempo	Lotação	Confiab	Segur	Veículo	Parada	Inform	Transb	Operador	Via
Acessib	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Freq	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tempo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Lotação	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Confiab	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Segur	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Veículo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Parada	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Inform	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Transb.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Operador	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Via	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Grau de Consistência

0,000000

Julgamentos consistentes!

Escala Numérica

1 - Igual importância

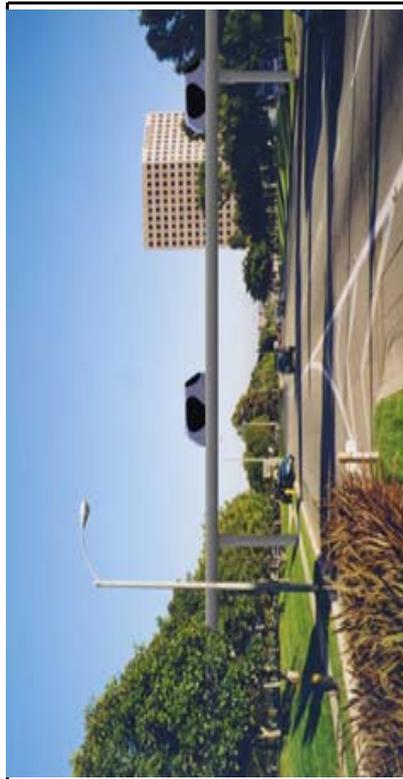
- 3 - Linha pouco mais importante que Coluna
- 5 - Linha muito mais importante que Coluna
- 7 - Linha bastante mais importante que Coluna
- 9 - Linha extremamente mais importante que Coluna

- 1/3 - Coluna pouco mais importante que Linha
- 1/5 - Coluna muito mais importante que Linha
- 1/7 - Coluna bastante mais importante que Linha
- 1/9 - Coluna extremamente mais importante que Linha

Apêndice E

Em relação à intrusão visual, quanto a alternativa Ônibus é superior à alternativa PRT?

Intrusão Visual: Impacto visual da alternativa no meio urbano



Ônibus

PRT

Somente os campos em amarelo devem ser preenchidos.

	Ônibus	PRT
Ônibus	1	1
PRT	1	1

Escala Numérica

1 - Igual importância

3 - Linha ligeiramente superior à Coluna
 5 - Linha superior à Coluna
 7 - Linha bem superior à Coluna
 9 - Linha extremamente superior à Coluna

1/3 - Coluna ligeiramente superior à Linha
 1/5 - Coluna superior à Linha
 1/7 - Coluna bem superior à Linha
 1/9 - Coluna extremamente superior à Linha