



COPPE/UFRJ

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO TEMPO DE VIAGEM COMO FATOR DE
IMPACTO NOS CUSTOS LOGÍSTICOS DO TRANSPORTE DE CARGA**

José Luiz Lopes Teixeira Filho

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes.

Orientador: Hostílio Xavier Ratton Neto

Rio de Janeiro

Maio de 2009

ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO TEMPO DE VIAGEM COMO FATOR DE
IMPACTO NOS CUSTOS LOGÍSTICOS DO TRANSPORTE DE CARGA

José Luiz Lopes Teixeira Filho

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS
EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Aprovada por:

Prof. Hostílio Xavier Ratton Neto, Dr.

Prof. Rômulo Dante Orrico Filho, Dr.Ing

Prof. Márcio de Almeida D’Agosto, D.Sc.

Prof^a Yaeko Yamashita, Ph.D

Prof. Newton Rabello de Castro Júnior, Ph.D

RIO DE JANEIRO, RJ –BRASIL

MAIO DE 2009

Teixeira Filho, José Luiz Lopes

Análise da Variabilidade do Tempo de Viagem como Fator de Impacto nos Custos Logísticos do Transporte de Carga / José Luiz Lopes Teixeira Filho. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XII, 193 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Hostílio Xavier Ratton Neto

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2009.

Referencias Bibliográficas: p. 128-143.

1. Transporte de Cargas. 2. Funções de Impedância. 3. Confiabilidade do Tempo de Viagem. I. Ratton Neto, Hostílio Xavier. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

O que é espantoso na ciência é o contrário do que é espantoso na arte do prestidigitador. Pois este quer que vejamos uma causalidade bem simples onde atua, na realidade, uma causalidade bem complexa. Enquanto a ciência nos faz abandonar causalidades simples onde tudo parece facilmente compreensível e nós somos os bufões da aparência. As coisas “mais simples” são muito complicadas – não podemos nos maravilhar o bastante com isso!

Friedrich Nietzsche

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é um tributo à minha família, que é o motivo e a razão de minha existência. Minha mãe, Dirce, meu pai, José Luiz, que me deram exemplo vivo de superação, dedicação e fé. Márcia, Pedro e Ana Luíza a família que formei e que me ensina todo dia que o amor vale a pena.

Esta Tese de Doutorado não é resultado apenas de um desejo individual de formação e aperfeiçoamento, ela foi construída ao longo dos anos por uma série de encontros felizes que tive em minha vida profissional e acadêmica com muitas pessoas que me motivaram, me ensinaram e me orientaram.

Devo ao meu amigo Mauro os meus primeiros passos na vida acadêmica ao me convidar para ser instrutor na Escola Silva Freire. Ao Carlos Alceu, literalmente um companheiro cordial, agradeço o forte incentivo nos meus primeiros passos para o Mestrado no IME. Ao Professor Hostílio, muito mais que um orientador, pois construiu esta Tese ombro a ombro comigo. Ao Narciso pelo apoio na obtenção dos dados e a solidariedade nos momentos difíceis.

Ao Professor Newton pelas orientações na preparação da proposta de tese. Ao Professor Márcio Peixoto e ao Professor José Augusto pelas valiosas contribuições quando do Exame de Qualificação. Ao Professores Rômulo Orrico e Márcio D'Agosto pelas lições de metodologia científica, exemplos de pesquisadores. À professora Yaeko pelas orientações e indicações para melhorar o trabalho. Agradeço ainda à minha mestra e orientadora de mestrado a Professora Cristina.

Aos colegas da Escola Silva Freire, Padrão, Fernando, Almir, Seabra, Mayrink por demonstrarem um alto grau de seriedade e competência aliados a um coleguismo sadio e fraterno. Ao INPH, na pessoa do Domênico, pelo apoio no momento mais crítico da Tese. Aos colegas da CENTRAL e da CDRJ pelos ensinamentos profissionais e pela convivência com um forte espírito de defesa da coisa pública que encontrei em todas as áreas em que trabalhei.

Meus sinceros agradecimentos à TRANSNORTE nas pessoas do Sr. Henrique e Sr. Rômulo que viabilizaram a obtenção dos dados para a Pesquisa.

Agradeço a Deus, que permitiu esses encontros e esta Tese.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO TEMPO DE VIAGEM COMO FATOR DE IMPACTO NOS CUSTOS LOGÍSTICOS DO TRANSPORTE DE CARGA

José Luiz Lopes Teixeira Filho

Maio de 2009

Orientador: Hostílio Xavier Ratton Neto

Programa: Engenharia de Transportes

Este trabalho visa contribuir para um melhor entendimento das funções de impedância utilizadas no estudo dos fluxos de transporte de cargas, que de modo geral são realizados com modelos gravitacionais que consideram o tempo de viagem como fator de separação ou de impedância entre as interações. É apresentado o desenvolvimento de um procedimento para análise e validação dentro da realidade dos sistemas viários e de prestação de serviços de transporte brasileiros, de estimativas para a influência da variabilidade do tempo de viagem nas operações de transporte, a partir da relação entre a confiabilidade das operações e as características da infra-estrutura e das condições de operação. O procedimento desenvolvido foi aplicado na análise da influência da variação da distribuição do tempo de viagem e da confiabilidade do tempo de viagem em uma rodovia brasileira em um período de quatro anos.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

ANALYSIS OF TRAVEL TIME VARIABILITY AS AN IMPACT FACTOR OF
LOGISTICS COSTS IN FREIGHT TRANSPORTATION

José Luiz Lopes Teixeira Filho

May/2009

Advisor: Hostílio Xavier Ratton Neto

Department: Transportation Engineering

This work has the main purpose to contribute to a better understanding of deterrence functions in the analysis of intercity freight flows. In the mathematic models in use in this field of research, logistic or transportation costs are the deterrence or separation costs. It is showed the development of a procedure to estimate and to analyse the influence of the variability of transportation operations in logistic costs, in the basis of the reliability of travel time. It is presented an application in a Brazilian Roadway, with the results of running four years the model.

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	O Tema	1
1.2	Objetivo	3
1.3	Relevância.....	4
1.4	Metodologia.....	10
1.5	Estrutura da Tese	11
2.	VARIABILIDADE DO TEMPO DE VIAGEM.....	13
2.1	Introdução	13
2.2	Fontes de Variação do Tempo de Viagem.....	16
2.2.1	Operações	17
2.2.2	Infra-Estrutura Viária	21
2.3	Variáveis do Tráfego.....	24
2.4	O Método do Comprimento Virtual.....	28
2.5	Tempo de Viagem nos Modelos Gravitacionais.....	32
2.6	Funções de Impedância na Geografia e na Economia dos Transportes.....	35
2.7	Tempo de Viagem em Modelos de Equilíbrio Geral.....	39
2.8	Abordagem Probabilística do Tempo de Viagem.....	43
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	44
3.1	O Atraso na Operação de Transporte de Cargas.....	44
3.2	Confiabilidade de Sistemas de Transportes	46
3.2.1	Reações ao Risco e à Incerteza em Transportes	48
3.2.2	A Função de Utilidade e a Confiabilidade do Tempo de Viagem.....	50
3.3	Quantificando a Confiabilidade do Tempo de Viagem	59

3.3.1	Confiabilidade e Escolha de Rotas	61
3.3.2	Janelas de Tempo	61
3.3.3	Problemas de Caminho Mínimo	63
3.3.4	Confiabilidade no Planejamento de Transportes	66
3.3.5	O Usuário da Rede de Transportes e a Confiabilidade.....	71
3.3.6	A Confiabilidade e a Degradação da Rede Viária.....	78
3.3.7	Conectividade e Vulnerabilidade.....	82
3.4	A Distribuição do Tempo de Viagem	85
3.5	Consolidação do Referencial Teórico	88
4.	ESTRUTURA METODOLÓGICA	90
4.1	Introdução	90
4.2	Modelo de Análise Proposto	90
4.3	Dados de Entrada do Modelo.....	94
4.4	Modelagem da Confiabilidade do Tempo de Viagem	96
4.5	Os Efeitos da Confiabilidade do Tempo de Viagem	99
4.6	Aproximações para as Especificações da Função de Impedância	101
4.7	O Modelo	102
4.7.1	O Algoritmo de Simulação	102
4.7.2	O Cálculo do Tempo de Viagem Equivalente	103
3.7.3	Ajuste do Tempo de Viagem Equivalente.....	104
5	APLICAÇÃO	107
5.1	Introdução	107
5.2	A Base de Dados.....	107

5.2.1	Montes Claros.....	108
5.2.2	Características da Amostra	108
5.2.3	Tratamento dos Dados	109
5.3	A MODELAGEM.....	115
5.3.1	Distribuições do Tempo de Viagem	115
5.3.2	Definição dos Intervalos dos Limites de confiabilidade	116
5.4	Resultados da Simulação	117
5.5	ANÁLISE	121
6	CONCLUSÕES	125
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Comparação de alternativas com diferentes expectativas de atraso na chegada.....	2
Figura 2-1: Interação econômica e custos logísticos (Fonte:QUINET E., 2005).....	15
Figura 3-1: Características e definições de confiabilidade em transportes (fonte LAM ET AL, 2007).....	47
Figura 3-2: Inclinação da função de utilidade do horário de chegada (Fonte: adaptado de BATLEY, 2007).	54
Figura 3-3: Inclinação da função de utilidade do atraso (fonte: adaptado de BATES ET. AL. ,2001).	56
Figura 3-4: Distribuições do tempo de viagem variando com a confiabilidade do tempo de viagem (fonte UNO ET AL,2004).....	59
Figura 3-5: Estrutura de penalidades para “janela de tempo” (fonte, adaptado de TANIGUCHI ET AL ,2000).	62
Figura 3-6:Exemplo de <i>Buffer Index</i> (Fonte: Mobility Monitoring Program)	68
Figura 3-7: Exemplo de cálculo do tempo médio de viagem e do <i>buffer index</i> (Fonte: Mobility Monitoring Program).....	69
Figura 3-8:Resultados do <i>buffer index</i> de LYMAN(2007).	70
Figura 3-9: Variação da distribuição do tempo de viagem ao longo do dia (Fonte: LIN ET AL ,2008).....	77
Figura 4-1 Modelagem da função de utilidade.....	101
Figura 5-4-2: Evolução da confiabilidade esperada.	122
Figura 5-4-3: Evolução do <i>buffer index</i>	122
Figura 5-4-4: Evolução do tempo de viagem equivalente.....	123
Figura 5-4-5:Relação entre o tempo de viagem corrigido e a média do tempo de viagem observado.....	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 5-1: Precipitações pluviométricas médias.	113
Tabela 5-2 : Parâmetros das amostras e resultados da simulação.	120

1. INTRODUÇÃO

1.1 O Tema

Os custos diretos de transporte compõem a parcela mais significativa dos custos logísticos, no entanto os custos de estoque e armazenagem, que se constituem na segunda maior parcela, são também muito significativos e estão relacionados com o nível de serviço de serviço do transporte de cargas.

A disponibilidade de infra-estrutura viária em uma determinada rota, não é indicativo suficiente para se saber se essa rota está adequadamente suprida dos serviços de transporte de cargas. É necessário conhecer o serviço prestado em termos de capacidade, preço e qualidade. O tempo de viagem não está associado apenas à extensão do trajeto, depende de vários outros fatores relacionados às condições das vias e dos serviços de operação. Por sua vez, os custos de estoque e armazenagem são relacionados diretamente com o tempo de trânsito das mercadorias e com a confiabilidade desses serviços.

O tempo de viagem é uma variável aleatória e para cada conjunto de características viárias e de operação tem sua própria função densidade de probabilidade e a utilidade esperada também irá variar de acordo com as expectativas existentes de parte dos transportadores e embarcadores, no entanto os modelos de planejamento de transportes utilizam os valores médios do tempo de viagem, dando um tratamento determinístico a essa variável.

Essa variabilidade irá implicar, por exemplo, em expectativas diferentes com relação aos atrasos que podem ocorrer em diferentes condições de uma determinada rota ou em rotas diferentes, relativos aos requisitos específicos de cada operação de transporte de cargas. Essa questão pode ser exemplificada ao serem comparadas duas situações alternativas em que os valores esperados do tempo de viagem sejam iguais, mas suas variâncias sejam diferentes conforme a figura abaixo.

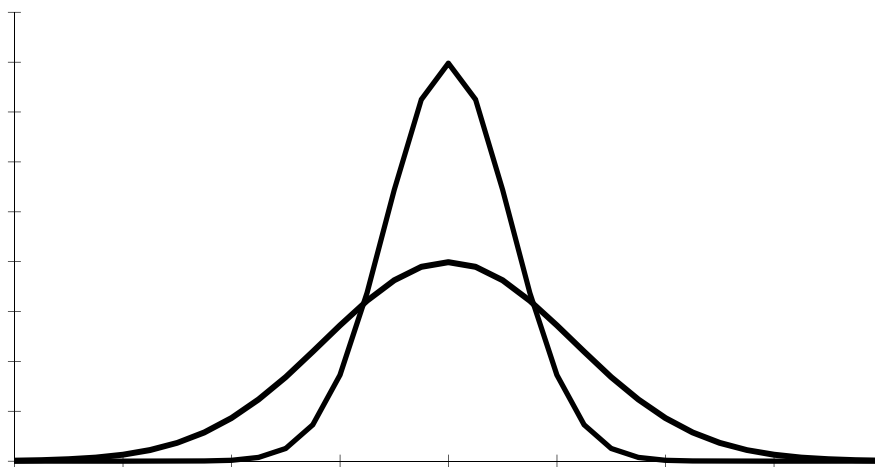


Figura 1-1 Comparação de alternativas com diferentes expectativas de atraso na chegada.

Observa-se que para a alternativa com maior dispersão a expectativa de atraso é maior, no entanto ao serem considerados os valores esperados do tempo de viagem de forma implícita os atrasos são compensados pelas chegadas adiantadas, o que nem sempre irá corresponder adequadamente aos requisitos das operações de transporte de cargas. Uma chegada adiantada de uma carga perecível não compensa uma chegada com atraso, que possa comprometer a integridade da mesma.

Para um melhor entendimento desse problema e para orientar as políticas públicas para o setor, bem como as estratégias das empresas que operam e utilizam o transporte de cargas, é importante entender o impacto que a variabilidade do tempo de viagem exerce sobre as operações logísticas.

Uma Pesquisa de Doutorado sobre esse tema, portanto, vem a ser oportuna para contribuir para um melhor conhecimento das condições pelas quais o transporte de cargas no Brasil se encontra no que diz respeito ao seu nível de serviço e sua importância atual e potencial para o desenvolvimento econômico regional.

1.2 Objetivo

O Tema desenvolvido é a análise dos custos logísticos generalizados considerando o impacto da variabilidade do tempo de viagem do transporte de carga nesses custos. O estudo visa contribuir para um melhor entendimento das funções de impedâncias utilizadas no estudo dos fluxos de trocas comerciais, que de modo geral são realizados com modelos que consideram os custos logísticos como fatores de separação ou de impedância entre as interações.

As perguntas que podem ser formuladas, então, na Pesquisa são:

- 1) Como os efeitos das variações das características da infra-estrutura viária e das operações de transporte de cargas existentes podem ser incorporados nas funções de impedância?
- 2) Como podem ser explicadas as diferenças entre as estimativas efetuadas considerando apenas os custos diretos de transporte?

A motivação do trabalho está centrada então na identificação de uma forma de considerar os efeitos que as características da infra-estrutura viária e a natureza dos fatores de produção exercem sobre as operações de transporte de cargas e a sua influência na variabilidade dos custos logísticos para o embarcador das mercadorias e em última análise para os agentes de produção dessas mercadorias.

Nesse sentido, a hipótese principal pode ser formulada da seguinte forma:

As impedâncias observadas podem ser mais bem explicadas com a utilização de funções de custos para o embarcador, que considerem a variabilidade do tempo de viagem em função das características da infra-estrutura viária e das operações de transporte de cargas, que afetem significativamente as expectativas sobre o tempo total da mercadoria em trânsito e a confiabilidade das operações de transporte.

Os objetivos da pesquisa podem então ser resumidos como o desenvolvimento de um procedimento para desenvolvimento, análise e validação dentro da realidade dos sistemas viários e de prestação de serviços de transporte brasileiros, de estimativas para a influência da variabilidade do tempo de viagem nas operações de transporte nos custos logísticos, a partir da relação entre a confiabilidade das operações e as características da infra-estrutura e das condições de operação.

1.3 Relevância

Os custos de transporte têm maior impacto sobre as mercadorias com menor valor agregado, ou seja um menor valor monetário por unidade de peso, e pode-se destacar nesse caso a produção agrícola. Esses produtos de modo geral são os mais importantes para a produção das regiões menos desenvolvidas economicamente, e assim os custos de transporte se constituem um fator muito relevante para possibilitar ou dificultar o seu processo de desenvolvimento. É importante ainda observar que para o Brasil, país de dimensões continentais, as trocas comerciais internas são tão importantes quanto as trocas internacionais.

O estudo, então, das relações do transporte de cargas com o desenvolvimento econômico merece uma crescente atenção por parte da comunidade acadêmica e o desenvolvimento de trabalhos dentro desse tema.

A produção agrícola, tomando como exemplo, tem uma relação muito forte com os níveis de serviço do transporte de cargas. Quanto menos confiáveis e quanto menos disponíveis em termos de frequência oferecida, e quanto maiores os tempos de mercadorias em trânsito, maiores as necessidades de armazenagem e manutenção de estoques. Considerando as margens muito estreitas com que opera esse mercado, a variação dos riscos do agronegócio tem forte dependência dos níveis de serviço de transporte.

Esse nível de serviço por sua vez está relacionado com duas fontes principais, a infra-estrutura viária e as operações de transporte. A infra-estrutura viária nas ligações em estudo irá contribuir para a variação do nível de serviço na medida em que variem as condições ou a natureza dos pavimentos, do traçado geométrico, das dimensões transversais, das rampas, do desnível a ser vencido, e ainda a densidade das vias locais (km de via por km²) e a sua própria extensão total. As condições da operação de transportes estão relacionadas com a capacidade instalada e com a produtividade e eficiência dos ofertantes desse serviço nas rotas desejadas.

Duas rodovias que tenham a mesma extensão não oferecem necessariamente as mesmas condições de tráfego, ainda que tivessem as mesmas características de pavimentação e de geometria do traçado. O seu estado de conservação é um fator fundamental na estimativa do tempo de viagem e do custo operacional.

Uma rodovia não pavimentada, além de proporcionar custos diretos mais elevados, tem forte influência na confiabilidade dos serviços de transporte se estiver sujeita a interrupções de tráfego em razão das condições meteorológicas.

O desempenho dos transportadores por sua vez também tem fortes variações. Se em uma região a oferta de serviços de transporte é constituída basicamente por carreteiros autônomos, o seu desempenho será muito diferente de uma região em que predominem empresas organizadas e com maior capital. Essas empresas têm maior capacidade de cobrir os riscos da operação por disporem de maior capital proporcionalmente à sua frota, operam com maior escala, e têm condições de oferecer maior confiabilidade nos serviços.

Uma avaliação dos investimentos em infra-estrutura de transportes em regiões menos desenvolvidas é apresentada em um estudo de MARTINS E MARTINS (2001), tendo como parâmetro a viabilidade da produção de soja e tendo esta como alavancadora do desenvolvimento daquelas regiões.

Nessa análise foi observado que o modo rodoviário de transporte de cargas tem vantagens competitivas importantes nessas regiões, quanto aos atributos capilaridade, regularidade, confiabilidade, operacionalidade nos terminais e não sofrer do problema do transbordo, presente em qualquer operação intermodal. Os outros modos de transporte de cargas têm portanto, segundo o estudo, que melhorar muito quanto a esses atributos para terem condições de competir, pois apesar de seus custos diretos de transporte serem menores que os do transporte rodoviário, a sua desvantagem nesse conjunto de atributos faz com que o custo logístico seja mais elevado.

O estudo conclui que de fato há evidências de que investimentos na infraestrutura de transportes nas regiões Centro-Oeste e Meio-Oeste (TO, MA e PA) estão contribuindo nessas regiões para a implementação de novas plantas industriais e para a realocação de empresas existentes associadas ao complexo soja.

A esse respeito CAMARGO E GONÇALVES (2001) apresentam um estudo dos principais atributos do transporte de cargas, considerados do ponto de vista dos embarcadores de soja no Paraná, utilizando técnicas de preferência declarada. Observou-se nesse estudo que de fato os custos considerados nas decisões de localização e de escolha de modo de transporte, envolvem além dos custos diretos de transferência também os custos com terminais, armazenagem, transbordo e carga e descarga.

Outro atributo considerado foi a frequência da oferta de transporte, ou seja a disponibilidade de caminhões ou de vagões ferroviários para atender a demanda. Esse atributo no transporte agrícola tem especial importância devido aos efeitos de sazonalidade ocasionados pelos períodos de safra, o que provoca uma grande concentração da demanda por transporte de cargas nesse período, o que, via de regra eleva os preços dos fretes. Observa-se ainda que no caso estudado o sistema ferroviário não tem capacidade instalada de atender a essa demanda, o que faz com que

embarcadores que tomariam a decisão de escolher o transporte ferroviário em razão do custo logístico, têm que utilizar obrigatoriamente o transporte rodoviário.

A confiabilidade é outro atributo relevante considerado no estudo e é considerado como a confiança que o sistema de transporte transmite quanto à entrega da carga no seu destino sem atrasos, perdas e danos. Foram detectados especificamente os problemas das estradas rurais, que não são pavimentadas e que nos períodos de chuvas mais fortes apresentam grandes dificuldades ao tráfego de caminhões carregados. Em consequência os tempos de viagem são muito afetados, ocorrendo atrasos consideráveis.

A acessibilidade também foi um atributo considerado, embora com pouca intensidade de variação no caso, uma vez que o transporte ferroviário tem um único acesso em Cascavel e quanto ao transporte rodoviário, a malha é bastante densa, não havendo elementos suficientes para medir a influência desse atributo nas tomadas de decisão de escolha modal.

Observa-se que as fontes de variação desses atributos estão relacionadas com as condições da infra-estrutura viária existente na ligação bem como as condições das operações de transporte de cargas. O trabalho apresenta recomendações quanto a medidas conjuntas dos embarcadores, transportadores e poder público municipal e estadual, quanto a ações voltadas para a melhoria das condições de manutenção e conservação das estradas rurais sob o aspecto da infra-estrutura viária. Quanto ao aspecto das operações de transporte, apresenta recomendações específicas ao transporte ferroviário quanto aos procedimentos de alocação e reserva de vagões, para proporcionar equilíbrio nas fases de pico da safra.

Outros fatores importantes a serem considerados são as possibilidades de substituição entre transporte, armazenagem e a utilização dos demais insumos de produção. Na agropecuária a forte dependência de fatores externos e mesmo internos, que não são passíveis de controle, como a disponibilidade de máquinas e equipamentos,

as condições meteorológicas, os preços dos insumos e produtos, faz com que ocorra uma interação muito forte entre o nível de serviço de transporte, a disponibilidade de armazenagem e o uso dos demais insumos e fatores de produção (CASTRO , 2003).

Sobre esses fatores LIMA E GONÇALVES (2001) analisam as possibilidades de substituição entre os atributos de tempo para os usuários de um corredor de transporte, a partir de um experimento de preferência declarada, com a utilização dos conceitos microeconômicos de taxa marginal de substituição e elasticidade cruzada. A aplicação foi desenvolvida no transporte do complexo soja no corredor de transporte de Rio Grande. Nos resultados encontrados foi observado que as Cooperativas e as Empresas Exportadoras estavam dispostas respectivamente a adicionar 1 dia e 1,26 dia no tempo para recolher a soja, para reduzir 1 dia no tempo de viagem.

Quanto ao tempo de atraso esperado as Cooperativas estavam dispostas a adicionar 1 dia e as Empresas Exportadoras 1,24 dia no tempo de recolhimento para reduzir em 1 dia o atraso esperado. Esses resultados dão indícios de que de fato esses fatores são representativos para o embarcador, e que vão corresponder a custos indiretos ocasionados pelas características do sistema de transportes de carga, encontrar esses valores e quais os custos dessa substituição é o que motiva a pesquisa. CASTRO et. al. (1999) colocam explicitamente que são desejáveis os desenvolvimentos de funções de custo mais elaboradas, especialmente no tocante aos custos de estoques determinados pelas características de transporte.

Na Comunidade Econômica Européia foi instituída a *European Conference of Ministers of Transport* – ECMT que é uma organização inter governamental, que atua como um fórum no qual os Ministros responsáveis pelo transporte e em especial os modos terrestres, atuam no desenvolvimento de políticas integradas e de cooperação. Em relatório elaborado pela ECMT (1998), os seus integrantes manifestam grande preocupação com o papel desempenhado pelo transporte ferroviário de cargas.

Consideram que a organização dos serviços de carga ferroviária, na Europa como um todo, não têm acompanhado as rápidas mudanças no perfil da demanda. Em muitos casos os serviços oferecidos não correspondem às necessidades do mercado, particularmente com o crescimento da demanda em operações em que o serviço é requisitado com muito pouca antecedência quando não para o mesmo dia, e ainda lotes de carregamento cada vez menores, que correspondem às características das práticas de *just-in-time*.

Em consequência o transporte ferroviário de cargas perdeu de maneira acentuada uma fatia muito grande desse mercado, e para os países europeus não é aceitável que toda essa capacidade instalada de transporte de cargas não seja utilizada adequadamente. Uma série de medidas têm sido propostas com o objetivo de reestruturar os sistemas ferroviários de carga da CEE, e permitir um melhor desempenho comercial e a retomada do seu desenvolvimento.

É importante, portanto, observar que a crise no transporte ferroviário não ocorre apenas na América Latina ou em países de terceiro mundo, mas que as soluções devem observar o contexto global da Economia em que esse sistema está incluído, sob o ponto de vista do seu valor na cadeia logística e dos investimentos que já foram realizados ao longo dos anos.

O tema tem sido objeto de estudos na Comunidade Européia em razão do renovado interesse naquele continente por estudos de interações espaciais e realocização das atividades de produção. Essa questão está em pauta porque a despeito dos grandes dispêndios efetuados em políticas regionais pela Comunidade Econômica Européia, as diferenças regionais não têm sido reduzidas de forma substancial, e em alguns indicadores até mesmo têm aumentado. Como por exemplo a renda, que embora entre os estados membros as diferenças tenham sido reduzidas, dentro de um mesmo estado têm aumentado.

A redução dos custos de transporte é vista nesse estudo e em outros no tema, como fundamental para promover a realocização e um melhor suprimento das regiões

menos desenvolvidas. Esse problema está associado à forte polarização das atividades econômicas que estão concentradas nas grandes aglomerações urbanas, em razão dos ganhos de escala e de suprimento.

Esse estudo preliminar do tema indica que a pesquisa irá contribuir para outros estudos em andamento, e ao mesmo tempo demonstra que há na comunidade acadêmica densidade de conhecimento sobre o tema.

1.4 Metodologia

O trabalho está delineado como uma pesquisa *Ex-post facto*, uma vez que não é possível a manipulação das variáveis independentes do problema formulado. Assim será de fundamental importância identificar as fontes de dados relativas a essas variáveis para possibilitar a obtenção da suas variações.

A confiabilidade das redes de transporte tem sido objeto de diversos estudos e pesquisas recentes, que enfatizam a necessidade de um aprofundamento no tema, em especial com relação ao transporte de cargas. A modelagem das funções de impedância requer que o tempo de viagem passe a ser considerado de uma forma mais objetiva como uma variável aleatória. As características e as considerações necessárias com relação às conseqüências dos atrasos nas operações de transporte interurbano de cargas devem ser incorporadas na sua modelagem.

É apresentada a revisão realizada na literatura com relação aos avanços observados na modelagem do tempo de viagem nas redes de transporte sob uma abordagem probabilística e da confiabilidade. A partir dessa revisão é construído um procedimento para avaliar os impactos da variabilidade do tempo de viagem nas funções de impedância associadas.

Foi desenvolvido um modelo para estimar uma ponderação para o tempo de viagem em função da variação dos fatores de fricção relacionados aos aspectos qualitativos, especificamente relativos à confiabilidade do transporte, e valor da utilidade do tempo de viagem. Valores esses que estão associados aos custos que o embarcador tem com armazenagem e manutenção de estoques, perdas, atrasos e outros associados à operação logística como um todo.

Esse modelo é utilizado para responder à pergunta principal da pesquisa que diz respeito a como obter estimativas das impedâncias observadas nos fluxos de mercadorias e de trocas comerciais entre os Estados e Regiões brasileiras, devidas às características da infra-estrutura viária e das operações de transporte de cargas existentes.

Para testar a hipótese apresentada na Tese o procedimento foi aplicado a uma situação real, em que foi possível observar os efeitos da variação das condições da infra-estrutura e das condições das operações de transporte no desempenho de um sistema de transportes.

1.5 Estrutura da Tese

Após o tratamento introdutório deste Capítulo 1 a estrutura da Tese tem mais cinco capítulos. O Capítulo 2 é dedicado a uma breve reflexão sobre a potencialidade e a aplicabilidade da estrutura teórica que suporta o desenvolvimento da Tese, assim como da contribuição que os resultados empíricos da pesquisa poderão ter em modelos para estudo de sistemas de transportes.

No Capítulo 3 apresenta-se um estudo dos conceitos, métodos e procedimentos encontrados na literatura, com relação à confiabilidade aplicada aos sistemas de transportes e os seus principais avanços e resultados encontrados recentemente.

A metodologia utilizada, e desenvolvida a partir dos conceitos e das formulações encontradas na pesquisa bibliográfica, apresentados no Capítulo 3, é detalhada no

Capítulo 4. Esse detalhamento permite identificar as hipóteses e premissas utilizadas na modelagem, com relação às suas extensões, restrições e delimitações.

O Capítulo 5 é dedicado a uma aplicação a um caso real, que permite testar a hipótese formulada na Tese, e propicia uma avaliação da ordem de grandeza dos efeitos da confiabilidade em um sistema de transportes. Finalmente no Capítulo 6 é realizada uma evidenciação das principais contribuições da Tese com relação aos tópicos da metodologia empregada, a literatura pesquisada e ao objeto empírico, bem como uma visão de desenvolvimentos potenciais de trabalhos técnicos e científicos a partir desses resultados.

2. VARIABILIDADE DO TEMPO DE VIAGEM

2.1 Introdução

O Custo Logístico Total refere-se a soma dos custos diretos da operação de transportes, com os custos das operações de movimentação e armazenagem, com os custos de processamento dos pedidos com os custos financeiros do estoque em trânsito, do estoque médio no destino e do estoque de segurança (Ballou, 2001 e Castro et. al., 1999).

O custo de transporte da matéria prima e dos insumos de um determinado produto, por exemplo, pode ter sido incluído no custo de aquisição, se o frete estiver incluso no fornecimento. No entanto as condições do nível de serviço logístico praticado tanto pelo fornecedor dos insumos ou da matéria-prima quanto do seu comprador, que irá se tornar o fabricante desse produto em estudo, irão influenciar no custo logístico total do mesmo.

O custo de armazenagem por sua vez está diretamente relacionado com a expectativa do volume de insumos e do produto final que irão permanecer em estoque. Essa expectativa é que orienta o dimensionamento das instalações, equipamentos e mão-de-obra alocados às atividades de armazenagem propriamente dita e de movimentação.

Assim quanto maiores as incertezas quanto aos níveis de estoque a serem praticados maiores serão esses custos e maior o nível de ociosidade dessas instalações e equipamentos, e esse nível de ociosidade pode ser entendido como um custo específico relacionado ao nível de serviço praticado. Os custos financeiros afetam sensivelmente o preço final pago pelos consumidores e têm uma relação muito estreita com as atividades logísticas e o seu nível de serviço.

A partir do momento que algum capital é imobilizado no financiamento da produção de qualquer bem industrializado, de um modo geral a maior parte do tempo que o mesmo permanece imobilizado, está relacionada com as atividades logísticas.

Pode-se inferir que o tempo que o produto permanece em processamento de produção propriamente dita somado aos prazos de pagamento após a entrega, é bastante inferior ao tempo que ele, seus insumos, sua matéria-prima e seus componentes estão sendo transportados ou estão estocados.

As fontes de variação desses custos então são aquelas que impõem tempos de imobilização a esse capital. As distâncias a serem vencidas e as tecnologias de transporte, movimentação, armazenagem e dos sistemas de informação e apoio à decisão utilizadas para tal, são bastante óbvias, assim como não oferecem muitas dificuldades para apuração. As outras grandes fontes de variação desses tempos de imobilização de capital são as incertezas da demanda, que geram atividades logísticas de armazenagem, e as próprias incertezas das operações logísticas.

As incertezas das operações logísticas são devidas às variabilidades dos seus processos, que ocorrem em razão da heterogeneidade da mão-de-obra e das tecnologias empregadas, da variabilidade da produtividade dessa mão-de-obra e das tecnologias, e por fatores exógenos tais como congestionamentos, acidentes e fenômenos meteorológicos no caso de transporte ou falta de energia elétrica, acidentes com as instalações fixas, acidentes de trabalho e outros nas atividades de movimentação e armazenagem.

Para efeito da análise a ser desenvolvida neste trabalho essas fontes de variação serão abordadas segundo o ponto de vista da Infra-Estrutura Rodoviária em uma determinada Cadeia de Suprimentos ou Rede Logística.

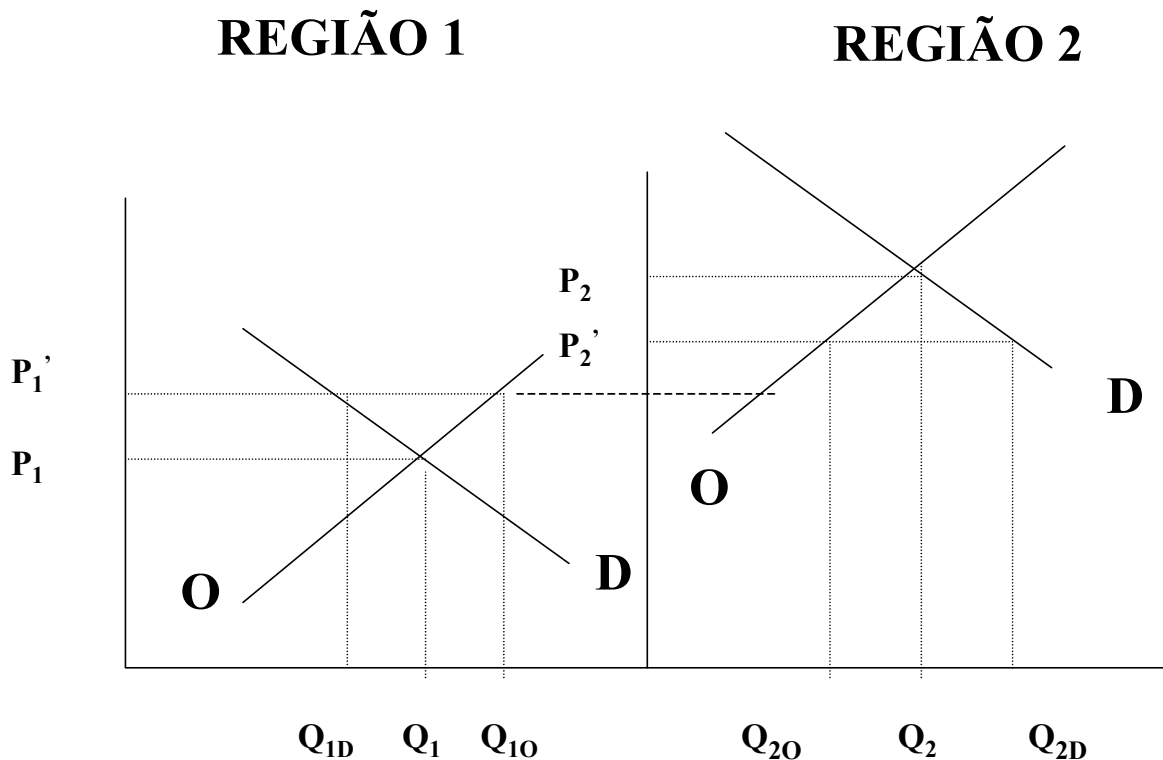


Figura 2-1: Interação econômica e custos logísticos (Fonte:QUINET E., 2005)

Na figura 2-1 apresenta-se um exemplo aplicado à interação entre duas regiões considerado um produto único. Sejam Q_1 e Q_2 as quantidades produzidas e D_1 e D_2 as demandas respectivamente nas regiões 1 e 2 no ponto de equilíbrio entre as curvas de Oferta e Demanda de cada região, considerando que não há interação entre as mesmas. Para essas condições, considerando que a região 1 é mais eficiente que a região 2, os preços de equilíbrio serão respectivamente P_1 e P_2 .

Supondo que são estabelecidas condições tais de infra-estrutura de transportes que permitam a interação entre as duas regiões, teremos agora P_1' como novo ponto de equilíbrio na região 1 e P_2' na região 2, com a diferença $P_1' - P_2'$ correspondendo ao custo logístico que exerce impedância para o fluxo comercial entre as duas regiões.

A questão que está formulada no estudo consiste então em buscar os fatores que contribuem para gerar essa impedância ao fluxo entre regiões, bem como a análise das restrições de ordem prática para obtenção das informações necessárias à caracterização desses fatores como variáveis a serem utilizadas em uma modelagem de custos.

2.2 Fontes de Variação do Tempo de Viagem

O tempo de viagem é impactado pela intensidade e pelas variações no volume de tráfego em uma rede de transporte devido à diversidade dos operadores, dos veículos e dos modos de transporte e das necessidades e restrições envolvidas no negócio de transportes, características essas que estão associadas às condições de operação.

A infra-estrutura caracterizada pelas condições do leito da estrada nos transportes terrestres, pavimento ou via permanente, e por seu traçado geométrico irá impactar na variabilidade da velocidade com a qual os veículos podem trafegar e em consequência na variabilidade do tempo de viagem. Os fatores que contribuem para a variabilidade do tempo de viagem podem ser encontrados em vários artigos que abordam os impactos econômicos de redes viárias, e artigos sobre detalhes técnicos das operações de transporte e da infra-estrutura viária.

Meng e Yang (2002) examinam a distribuição de benefícios entre os usuários de uma rede viária e a equidade dessa distribuição, associados ao *Continuous Network Design Problem – CNDP*, em termos de alteração de equilíbrio dos custos de viagem entre um par de origem e destino. O CNDP determina a otimização das melhorias de capacidade em uma rede viária existente. Chopra (2003) descreve uma estrutura para o projeto de uma rede de distribuição na Cadeia de Suprimentos. Faz uma descrição dos vários fatores que influenciam na escolha de rede, discute os seus pontos fortes e pontos fracos e conclui com a indicação de quais redes de distribuição dão mais adequadas para dadas características dos consumidores e dos produtos.

As travessias urbanas são abordadas por Trinta e Ribeiro (2003) em um artigo no qual os autores identificam os conflitos gerados pelos impactos do trânsito à mobilidade, à acessibilidade, à segurança do trânsito e ao meio ambiente, apontando soluções individualizadas para corrigir esses conflitos. Ainda sobre travessias urbanas Cubells et. al. (2002) abordam os seus custos econômicos e os seus principais problemas.

As condições meteorológicas têm influência expressiva sobre a confiabilidade do tempo de viagem e têm sido objeto de alguns trabalhos como WAKABAYASHI(2000) e LAM ET AL (2008) que tratam da modelagem do impacto de condições adversas de tempo no desempenho das redes de transporte. Suárez (2002) faz uma análise das condições e dos fatores determinantes da implementação de Estações Meteorológicas como um equipamento auxiliar adicional nas principais rodovias e aborda as condições meteorológicas e sua influência sobre a circulação e a segurança viária.

2.2.1 Operações

Os recursos de transporte são tanto melhor utilizados quanto maior o aproveitamento da capacidade útil de cada veículo. Para isso os operadores de transporte buscam a consolidação das cargas, que é a reunião de uma quantidade o mais próxima possível da capacidade útil do veículo a ser utilizado. A consolidação pode ocorrer quando um veículo vai buscar as cargas em diversas origens, ou vai levar a carga a vários destinos ou de apenas uma origem para um destino (CETINKAYA e BOOKBINDER, 2003). Nos dois primeiros casos variam as quantidades de carga por origem ou por destino, e no terceiro varia a velocidade com que a carga fica pronta para despacho ao destino.

Em todos os casos, no entanto, podem ocorrer variações no tempo de espera para a consolidação, mesmo nos casos em que são impostas restrições de tempo pois essas restrições referem-se a um tempo máximo e não a um tempo mínimo. CETINKAYA e BOOKBINDER (2003), por exemplo, desenvolvem uma modelagem que otimiza a compensação entre os custos de transporte e os custos de estoque para estratégias de restrição de quantidades mínimas ou de tempo máximo, utilizando uma abordagem probabilística.

As políticas de consolidação de cargas, portanto, se constituem em um importante fator de incerteza no planejamento dos custos logísticos em qualquer modo de transporte utilizado. No transporte ferroviário esse problema é bastante evidente, pois a capacidade de tração de uma locomotiva de um modo geral é para dezenas de vagões, e pelo capital imobilizado nesse equipamento os custos de transporte por unidade de

produto em um trem com uma pequena quantidade de vagões seriam muito elevados. Por isso a atividade de formação dos trens é vital para garantir a economicidade desse modo de transporte.

A disponibilidade de veículos para atender uma determinada ligação de uma Cadeia de Suprimentos é outro fator importante. Se não há veículos suficientes para atender os embarques existe incerteza quanto ao tempo de espera de um produto para ser embarcado. Se uma ferrovia não tem Locomotivas suficientes para atender o fluxo em uma época de safra, por exemplo, muitos vagões ficarão aguardando carregados em pátios ou se o problema forem vagões a carga terá uma incerteza quanto ao tempo de espera nos armazéns.

Outro fator que contribui para essa incerteza é o nível de serviço das intervenções de manutenção dos veículos. Mesmo considerando que as empresas vão procurar atuar de forma eficiente quanto aos procedimentos de manutenção, as condições de suprimento de peças e assistência técnica em determinadas regiões podem gerar maiores incertezas quanto aos tempos de imobilização de veículos em manutenção.

O gerenciamento exercido pelos operadores de transporte nas chamadas cargas de retorno é outra questão importante, PEDERSEN (2001) faz uma análise muito interessante do problema nos países africanos, que importam produtos conteneirizados da Europa e não têm um volume de exportação de produtos conteneirizáveis que viabilize o retorno dos mesmos carregados. Isso gera uma maior incerteza na consolidação de cargas dos navios de containeres. Em um caso mais simples a retenção de um caminhão aguardando a carga de retorno pode vir a gerar incerteza quando o mesmo estará disponível na origem, influenciando em todo o processo logístico.

A estrutura dos operadores de transporte também contribui para as incertezas do processo. Um mercado em que os transportadores autônomos sejam predominantes em razão de sua menor capacidade financeira em comparação com empresas transportadoras de maior porte irá gerar provavelmente maiores incertezas quanto aos tempos de imobilização por intervenções de manutenção, maiores incertezas com relação ao gerenciamento das cargas de retorno e outros problemas advindos dos riscos maiores que um transportador autônomo corre.

DANOLEVICZ ET. AL.(2003) analisam os problemas associados aos transportadores de cargas autônomos e constataam que para os mesmos as questões mais importantes são o preço dos combustíveis, o preço dos pneus e peças de reposição dos veículos, o preço dos pedágios e o retorno financeiro por carregamento, ou seja aqueles relacionados aos custos diretos de operação e as questões financeiras de curto prazo. Pode-se inferir que essa preocupação é proporcional aos riscos e riscos do curto prazo, ou seja riscos para a confiabilidade da operação de transportes.

Os operadores ferroviários em geral são empresas estruturadas e de grande porte, assim os seus problemas estão mais associados às economias de escala necessárias a esse modo de transporte por imobilizações vultuosas de capital. Nesse sentido os operadores menos capitalizados podem a vir apresentar certa similaridade com os problemas enfrentados pelos transportadores autônomos e pelas empresas de pequeno porte do modo rodoviário.

A recuperação de uma Locomotiva, por exemplo, pode ter um valor baixo proporcionalmente ao capital empregado, no entanto pode vir a ser um montante financeiro bastante relevante em uma negociação, o que com irá gerar uma maior aleatoriedade no tempo total que a mesma permanece indisponível para o tráfego.

Nas operações de distribuição para o varejo e executadas pelo modo rodoviário, existe a questão do transporte de cargas em áreas urbanas. Nesse contexto a operação de transporte torna-se bastante complexa em função dos congestionamentos e das restrições viárias e de estacionamento nas zonas centrais. Embora a incerteza aqui esteja a princípio limitada a questões de horas ou minutos, em função das limitações de horários comerciais ela pode vir a se caracterizar como de um dia ou um final de semana, quando, por exemplo, existe a possibilidade de uma entrega não ser concretizada até o final do horário útil. DUTRA ET. AL. (2003) fazem uma análise bastante interessante dos problemas e das práticas adotadas no transporte urbano de cargas e PEREIRA e RATTON NETO (2003) apresentam um diagnóstico da influência da regulamentação nos custos de distribuição de produtos em centros urbanos

Com relação aos pontos de transbordo e aos terminais, os mesmos têm também forte influência na geração ou não de incertezas no processo. Os terminais ferroviários particularmente em razão de suas dimensões e dos equipamentos necessários, se não estiverem dimensionados adequadamente serão fontes geradoras de muita incerteza. Sendo em geral intermodais necessitam de espaço e equipamentos adequados para a carga e descarga dos vagões e dos caminhões, quando não estão dimensionados corretamente, provocarão longos e aleatórios períodos de espera, tanto para a formação dos trens quanto para os caminhões que estão carregando ou descarregando.

Finalmente a questão das tomadas de decisão do ponto de vista do operador de transporte. Para um determinado nível de produção de transporte, o operador tem que tomar decisões relativas ao número de veículos e terminais de transbordo a serem utilizados e as suas capacidades. Deve tomar decisões ainda sobre as regras da sua operação tais como velocidades a serem adotadas, frequências das viagens e tamanhos dos carregamentos.

SHINGAL e FOWKES (2002) apresentam um experimento empírico sobre escolha modal no transporte de cargas na Índia, considerando entre outros fatores a confiabilidade dos serviços, medida como a porcentagem de cargas entregues dentro do prazo acordado. LU (2003) faz um estudo sobre o impacto dos atributos de qualidade do serviço do operador de transporte nas relações de parceria com o embarcador, sob o ponto de vista desse último.

Como as operações de transporte ocorrem em uma rede, têm que decidir também que estrutura de serviço adotar, ou seja quais veículos vão visitar cada um dos nós da rede onde ocorra demanda e em que sequência (JARA-DÍAZ e BASSO, 2003). Assim a forma com que essas decisões serão tomadas irá afetar as incertezas com relação aos tempos necessários para as ligações entre os diversos pares de origem e destino.

A integração dos chamados *Warehouse Management Systems* –WMS com *Transportation Management Systems* – TMS leva ao conceito de visibilidade global do estoque, conforme MASON ET. AL.(2003). No seu trabalho os autores examinam as relações de custo benefício totais que podem ser atingidas com essa integração, que é uma forma de diminuir o risco e a incerteza nos processos logísticos.

2.2.2 Infra-Estrutura Viária

A influência da qualidade da infra-estrutura viária na Cadeia de Suprimentos se dá a partir de duas fontes principais, as características geométricas e de pavimentação (já considerada a sua adequação ao terreno e às condições meteorológicas) e as suas condições quanto à operação (serviços de segurança e manutenção).

De qualquer forma dois tipos de incertezas são advindos da infra-estrutura (CHEN ET. AL., 2002) resultante da confiabilidade da conectividade e resultante de confiabilidade do tempo de viagem. O primeiro se refere à probabilidade que os nós de uma rede de transporte permaneçam conectados, não importando se ocorra por arcos alternativos. Esse tipo de análise da confiabilidade do sistema é próprio para avaliar situações anormais, ocasionadas por fenômenos da natureza, e embora tenha influência na Cadeia de Suprimentos não deve ser considerada quando do dimensionamento da Rede Logística.

Quanto à confiabilidade do tempo de viagem refere-se à probabilidade de que uma viagem entre dois nós de uma rede de transporte ocorra dentro de um determinado intervalo de tempo, essa medida é útil na avaliação do desempenho dessa rede de transporte dentro das flutuações normais do fluxo de tráfego diário. ASAKURA (1996) utilizou esse conceito para avaliar a degradação da capacidade de uma rodovia em razão da sua deterioração. Ele definiu a confiabilidade do tempo de viagem como uma função da taxa de variação dos tempos de viagem entre rodovias degradadas e rodovias não degradadas.

O tempo de viagem para uma dada capacidade de tração é função das características do traçado geométrico da via, tais como inclinação das rampas, extensão em rampa, raio das curvas, extensão em curva, largura das pistas de rolamento, existência ou não de divisão entre as pistas, existência de canteiro central, largura do acostamento, existência de faixas adicionais de subida e outras. Essas características

afetam a velocidade média em função do esforço trator, mas também a variação das reações dos condutores dos veículos.

Um motorista experimentado e que conheça bem uma determinada rodovia que, por exemplo, seja bastante sinuosa em pista simples, terá tempos de resposta às necessidades de frenagem ou aceleração menores que os de um motorista que não conheça essa rodovia. As próprias reações desse motorista não muito experiente podem afetar o tempo de viagem do motorista experiente, pois irão implicar em maiores dificuldades nas ultrapassagens e formação dos pelotões de veículos.

A verificação da porcentagem de veículos em pelotões é uma boa medida de desempenho das rodovias, pois quanto menor for, maiores serão as oportunidades de ultrapassagens e dispersão dos veículos. A respeito da implementação de faixas adicionais em subidas com esse propósito ver MELO ET. AL. (2003), PECKER ET. AL. (2003) e MON-MA e SETTI (2003).

O estado de conservação e as condições de manutenção também vêm a ser fontes de variação do tempo de viagem. No caso rodoviário os defeitos que surgem na pista de rolamento e os defeitos nas sinalizações verticais e horizontais afetam os tempos de reação dos motoristas de acordo com a sua experiência e conhecimento da rota. Isso faz com que haja uma maior aleatoriedade, dadas as condições particulares dos condutores, e poderá afetar a variabilidade do tempo de viagem.

As interrupções para intervenções de manutenção também são fontes de aumento da variabilidade do tempo de viagem, uma vez que tanto o surgimento de defeitos que requeiram intervenções quanto as próprias intervenções, têm caráter aleatório, pois em uma determinada viagem pode haver retenções ou até mesmo interrupções de tráfego enquanto que em outras viagens isso pode não ocorrer. Nas ferrovias o estado de conservação implica em restrições de velocidade, o que não levaria a uma maior variabilidade, no entanto a ocorrência aleatória de defeitos que impliquem em restrições temporárias e localizadas deverá implicar em maior variabilidade do tempo de viagem.

As variações do fluxo de tráfego também podem vir a ser fontes de aumento da variabilidade do tempo de viagem. Alterações que ocorram no fluxo ao longo do dia podem alterar o tempo de viagem em função do horário em que as viagens ocorram, e essas alterações de fluxo ocorrem em razão do tráfego local dos veículos das cidades que ficam ao lado de uma rodovia, oscilando juntamente com os horários de trabalho. Podem ainda ocorrer alterações em dias diferentes, como por exemplo, o aumento de fluxo em razão de viagens de lazer nos finais de semana.

Essas alterações serão ainda função do número de travessias urbanas a que uma rodovia está sujeita e que implicam em um maior tráfego local e em um maior número de interseções nas vias principais. CUBELLS ET. AL. (2002) apresentam uma descrição da problemática típica de uma travessia urbana e suas relações com os custos econômicos de uma rodovia.

Nas ferrovias a velocidade nas travessias urbanas poderá ser menor, e a sua variabilidade estará relacionada às passagens de nível urbanas existentes e ao fluxo rodoviário dessas passagens. Essas passagens de nível proporcionam a ocorrência de muitos acidentes e nesses casos sempre há interrupção do tráfego até o restabelecimento das condições operacionais, e isso é uma fonte de variação do tempo de viagem pois para cada acidente em função de seus efeitos nas vias terá um tempo de restabelecimento diferente.

Outra fonte de variação para o tempo de viagem no caso ferroviário pode ser exemplificado na travessia da cidade de São Paulo nas ligações do interior ao Porto de Santos e ao Rio de Janeiro e Minas Gerais em bitola larga em que os trens de carga circulam nas linhas de subúrbio, “tráfego local”, e estão sujeitos a restrições de horário aleatórias, o que aumenta a incerteza quanto ao tempo necessário para essa travessia.

Outro fator importante como fonte de variação do tempo de viagem é a meteorologia, ou as condições meteorológicas a que está sujeita uma determinada ligação viária. Existem condições climatológicas e de meio-ambiente que geram estados degradados da visibilidade ou das condições de tráfego, nos quais a circulação se vê afetada tornando-se lenta e insegura. É ainda causa de acidentes que por sua vez promovem retenções e interrupções de tráfego contribuindo ainda mais para o aumento

da variabilidade do tempo de viagem. As ferrovias também são afetadas por condições meteorológicas porém de uma forma bem menos intensa que as rodovias.

Com o objetivo de reduzir os acidentes e os seus efeitos, uma gama de novas tecnologias vem sendo desenvolvida e implementada nas rodovias de todo o mundo. As ferramentas ITS se baseiam em três características fundamentais a informação, a comunicação e a integração (MOSQUERA, 2003), que auxiliam os operadores das rodovias e os motoristas a tomarem as decisões mais adequadas.

Os equipamentos e sistemas de segurança facilitam portanto a condução dos veículos ao propiciarem a melhora das informações aos condutores e permitem aos operadores atuar com maior rapidez quando da ocorrência de incidentes que provoquem retenções ou interrupções do tráfego. A intensidade com que essas tecnologias estão implementadas em uma determinada rodovia deverá ter influência direta na variabilidade do tempo de viagem.

No caso ferroviário pode-se considerar como equivalente à tecnologia de segurança viária, a tecnologia de sinalização e controle de tráfego, quanto mais avançadas maiores as velocidades médias e menores os tempos de espera em cruzamentos e mesmo as variações desses tempos de espera, assim contribuem para uma maior certeza quanto aos tempos de viagem.

Os acidentes em rodovias têm como suas causas os fatores veículo, via e condutor e com relação à via os fatores que contribuem para os mesmos de certa forma já foram abordados neste trabalho. No entanto é interessante observar que como podem surgir de uma conjugação de vários fatores aleatórios, o índice de acidentes por si pode ser um indicador a ser utilizado na análise da variabilidade do tempo de viagem em uma determinada rota, valendo o mesmo raciocínio para as ferrovias.

2.3 Variáveis do Tráfego

Os estudos de capacidade abordam as principais características das redes viárias que influenciam na variação da quantidade de veículos e que podem trafegar em uma

determinada ligação ou trecho. De um modo geral são as mesmas fontes de variação que influenciam e que representam as impedâncias em uma rede logística com relação ao transporte.

O conceito de velocidade diretriz é relevante neste estudo pois é o ponto de partida para o estudo das principais características de uma via (CARVALHO,1967), tais como curvas de concordância, superelevação, transição e visibilidade. A velocidade diretriz é o valor máximo utilizado em projeto para que sejam estabelecidas as características geométricas da via de forma a que os obstáculos do terreno possam ser ultrapassados com segurança e economicidade. Assim a velocidade diretriz representa as características do traçado geométrico de projeto e pode ainda ser utilizada como parâmetro de comparação entre as condições de projeto e as condições operacionais, ao ser comparada com a velocidade média real praticada em uma rodovia ou ferrovia.

O *Highway Capacity Manual – HCM* (2000) desenvolvido pelo *Transportation Research Board-TRB* uma unidade do *National Research Council* dos Estados Unidos, é uma coleção de técnicas para estimar a capacidade e determinar o nível de serviço de rodovias.

O HCM utiliza a definição de capacidade de uma via como a taxa máxima horária na qual pode ser esperado que os veículos percorram um ponto ou uma seção uniforme de uma faixa ou uma rodovia durante um determinado período de tempo para determinadas condições físicas e operacionais.

As condições físicas podem ser classificadas como:

- Largura da via ou da faixa de rolamento;
- Existência do acostamento;
- Visibilidade;
- Alinhamento.

E as condições operacionais:

- Presença de veículos pesados;

- Interrupções no tráfego (ex: semáforos);
- Número de acessos.

O volume e a taxa de fluxo são duas medidas que quantificam o tráfego que está passando em um ponto em uma faixa ou em uma rodovia durante um intervalo de tempo. Esses termos são definidos segundo o HCM da seguinte forma:

- Volume – o número total de veículos que passam em um determinado ponto ou seção de uma faixa ou de uma rodovia em um intervalo de tempo. Os volumes podem ser expressos como anuais, mensais, diários, horários etc.
- Taxa de Fluxo – a taxa horária equivalente na qual os veículos passam em um determinado ponto ou seção de uma faixa ou de uma rodovia em um intervalo inferior a uma hora, em geral 15 min.

O volume e o fluxo são variáveis que quantificam a demanda, isto é, o número de veículos ou motoristas, que desejam utilizar uma determinada rodovia durante um específico período de tempo. O congestionamento do tráfego pode influenciar a demanda, e os volumes observados muitas vezes refletem muito mais as restrições de capacidade do que propriamente a demanda.

Embora os volumes de tráfego possam proporcionar um método para quantificar os valores de capacidade, a velocidade ou o tempo de viagem é que fornecem uma medida da qualidade do serviço de tráfego oferecido ao motorista/veículo. É uma medida importante da efetividade definindo os níveis de serviço para diversos tipos de rodovias.

Outra variável importante é a densidade de tráfego, considerada no HCM como o número de veículos ocupando um determinado comprimento de pista ou de rodovia em um determinado instante. Uma medida de campo direta para a densidade é muito difícil, necessitando pontos privilegiados para fotografar ou filmar uma grande quantidade de trechos rodoviários. A densidade pode ser então obtida a partir da velocidade média de viagem e da taxa de fluxo, que podem ser obtidas mais facilmente conforme a seguinte expressão.

A qualidade de serviço requer medidas para caracterizar as condições operacionais em um fluxo de tráfego. O nível de serviço segundo o HCM é uma medida de qualidade que descreve essas condições operacionais, geralmente em função de variáveis como velocidade ou tempo de viagem, liberdade de manobras, interrupções de tráfego, e conforto e conveniência.

São definidos seis Níveis de Serviço para cada tipo de rodovia em que o HCM dispõe de procedimentos de análise. Esses Níveis de Serviço são designados por letras de A a F, em que o nível A representa as melhores condições de operação e o F as piores. Cada Nível de Serviço representa uma faixa de condições operacionais e a percepção dos motoristas dessas condições. A segurança não está incluída nas medidas que estabelecem esses Níveis de Serviço.

CHEN ET AL (2000) fazem uma abordagem relativa às considerações da natureza probabilística das variáveis envolvidas com a capacidade de uma rede viária. A adequação da capacidade à demanda em uma avaliação tradicional é obtida com base em valores calculados por técnicas determinísticas. Se uma capacidade g é maior que um determinado nível de demanda h , então a rede viária é considerada adequada à demanda ou confiável. Essa rede viária será deficiente ou não confiável se a capacidade g for menor que a demanda h . Um coeficiente de segurança (g/h) ou uma margem de segurança ($g-h$) podem ser determinados para satisfazer o problema da adequabilidade ou confiabilidade.

Embora os métodos determinísticos reconheçam a existência da variabilidade na capacidade e na demanda, eles não consideram as distribuições de probabilidade de suas variações que podem levar a coeficientes de segurança muito elevados se as dispersões das duas variáveis forem pequenas e insuficiente ou inadequado se as dispersões forem muito elevadas, considerando que os valores médios das funções g e h permanecem as mesmas. Utilizando a teoria das probabilidades a abordagem permite que as variações probabilísticas sejam consideradas conforme ilustrado na figura 2-2.

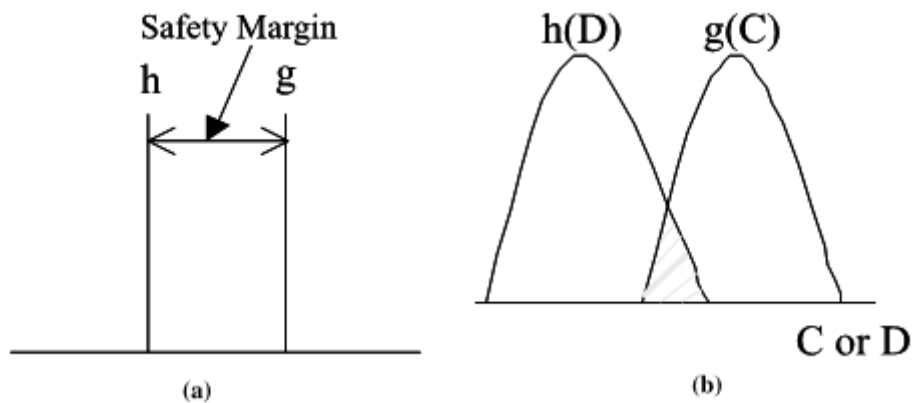


Figura 2-2: Confiabilidade

A confiabilidade do tempo de viagem por sua vez pode ser definida como a probabilidade de que uma viagem entre um determinado par de Origem e Destino ocorra com sucesso relativamente a um tempo de viagem especificado. A incerteza do tempo de viagem pode ter origem em duas fontes principais, as variações nos fluxos de demanda e as variações nas capacidades dos arcos da rede utilizada.

Dessa forma existem dois modos de se abordar essa incerteza, a primeira se refere às variações ao longo do dia ou do período em análise do fluxo de veículos e é mais adequada para a avaliação da performance de uma rede viária sob condições normais de tráfego. A segunda considera as variações na capacidade devidas à degradação das condições da infra-estrutura e é a mais adequada para avaliar a performance em tanto em condições normais quanto anormais de tráfego.

2.4 O Método do Comprimento Virtual

O Manual de Custo de Operação do extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER apresenta uma metodologia desenvolvida pelo Professor Fernando Mac Dowell para analisar os custos operacionais considerando as condições específicas de uma rodovia, que tem uma abordagem de decomposição das variáveis envolvidas em que se realiza uma equivalência entre as variações das condições e uma variação virtual no comprimento da rodovia.

Os conceitos utilizados no método podem ser resumidos conforme apresentado em MATTAR et al (1997):

- Rodovia ideal - Rodovia em nível, tangente e pavimentada, em boas condições de conservação;
- Comprimento Virtual - Extensão de rodovia ideal que equivale, em termos de custos operacionais, a um trecho de rodovia sob determinadas características condicionantes;
- Características Condicionantes de uma Rodovia –
 - o Velocidade operacional no trecho;
 - o Rampas ou aclives;
 - o Contra-rampas ou aclives;
 - o Tipo de superfície de rolamento –
 - Pavimentada;
 - Revestimento;
 - Terra.
 - o Estado de conservação da pista de rolamento:
 - Bom;
 - Regular;
 - Ruim.
 - o Curvas horizontais com raio inferior a 100m;
 - o Lombadas e depressões;
 - o Resistência lateral:
 - Leve;
 - Média;
 - Pesada.
 - o Pontes com largura inferior a 5m.
- Fatores Virtuais – São coeficientes que representam a extensão de rodovia padrão que é equivalente, em termos de custos operacionais, a uma unidade da característica condicionante da rodovia.

O método transforma os acréscimos esperados de custos operacionais em comprimentos virtuais de uma rodovia ideal. Além do comprimento virtual o método

incorpora uma caracterização do grau de dificuldade com que são vencidas as diferenças de cotas que se verificam ao longo da rodovia, tendo como base os desníveis acumulados.

$$D_h = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \times l_i}{2L}$$

Onde:

x_i = inclinação da rampa i (%);

l_i = extensão da rampa i (rampas e contra-rampas);

n = número de rampas;

L = extensão total da rodovia;

Pode ser esperado que essas mesmas variáveis utilizadas para caracterizar a rodovia possam também ser utilizadas para caracterizar a variabilidade do tempo de viagem e/ou da velocidade em um determinado trecho ou rodovia.

No caso ferroviário o estudo da variação do tempo de viagem e da velocidade média comercial também deve ser realizado a partir da análise de como é desenvolvido o seu projeto geométrico e como é desenvolvido o seu planejamento operacional.

As ferrovias para efeito da incerteza das viagens podem ser divididas em dois casos principais, as linhas singelas e as linhas duplas. No caso das linhas singelas a questão está relacionada às distâncias existentes entre os pátios de cruzamento e no caso das linhas duplas aos intervalos de licenciamento ou de circuitos de via quando sinalizadas.

A velocidade média e em consequência o tempo médio de viagem em uma linha ferroviária estão relacionados não apenas com a velocidade diretriz e as condições

geométricas da via mas também com os tempos de espera nos cruzamentos ou limites de circuitos de via.

A variabilidade, no entanto, será devida às variações dos intervalos de tempo entre seções de bloqueio. Esses intervalos, da mesma forma que no caso rodoviário, se relacionam com a velocidade diretriz e com as condições de conservação e manutenção da via.

De forma semelhante ao modo rodoviário foi desenvolvido um método para correlacionar o trabalho mecânico de tração ferroviária às características geométricas da via, extensão, curvas e rampas, levando ao estabelecimento de um comprimento virtual conforme descrito em RATTON FILHO (1979).

Esse comprimento virtual é a extensão imaginada em nível e tangente (sem curvas), que possua resistência normal total igual ao somatório das resistências normais de rampa e de curvas do traçado real. Observe-se que no caso do método para o modo rodoviário a equivalência foi obtida a partir de dados de custos financeiros necessários para vencer as distâncias rodoviárias e no caso ferroviário a correspondência é o trabalho equivalente.

Por essa definição, supondo o deslocamento de uma tonelada de trem, que apresente uma determinada resistência R_v média, em um comprimento virtual L_v , tem-se um trabalho $L_v \times R_v$. Esse trabalho é equivalente ao trabalho necessário para deslocar uma tonelada de trem em diversos trechos l sucessivos, de resistência r .

$$L_v R_v = \sum (l \times r)$$

Separando-se em extensões em nível, em curva e em rampa, tem-se:

$$L_v R_v = L_0 R + \sum l_c \times r_c + \sum l_r \times r_r$$

$$L_v = L_0 + \frac{\sum l_c \times r_c}{R_v} + \frac{\sum l_r \times r_r}{R_v}$$

Assim o comprimento virtual é igual ao comprimento real mais os acréscimos devidos às curvas, e os acréscimos devidos às rampas. RATTON FILHO (1969) descreve ainda os métodos para cálculo do comprimento virtual de Baum e de Stevenson em que os autores calculam os parâmetros de fórmulas para esse cálculo.

2.5 Tempo de Viagem nos Modelos Gravitacionais

Em 1955 A.M. Voorhees introduziu a utilização do modelo gravitacional no estudos de tráfego dos Estados Unidos, e esse tem sido o mais utilizado para a análise da distribuição de viagens. O termo gravitacional advém da suposição de que o número de viagens entre um determinado par de origem e destino é diretamente proporcional à atração relativa entre essas zonas, e inversamente proporcional a alguma função representativa da separação espacial entre elas (VOORHEES , 1954 apud PATRIKSSON, 1994).

O modelo gravitacional trata do problema de encontrar uma matriz não negativa representativa do número de viagens t_{ij} , entre as origens $i \in \mathcal{I} = \{1,2,3, \dots I\}$, e os destinos $j \in \mathcal{J} = \{1,2,3, \dots J\}$ satisfazendo certas restrições marginais e outras condições. A área geográfica em estudo é dividida em I zonas onde as viagens têm origem e J zonas de destino dessas viagens. Os tipos de restrições marginais podem ser representadas na seguinte forma:

$$\sum_j t_{ij} = a_i, i \in \mathcal{I}$$

e

$$\sum_i t_{ij} = b_j, j \in \mathcal{J}$$

Onde a_i e b_j são constantes positivas que representam as proporções de viagens que se iniciam em i e terminam em j e ainda:

$$\sum_i a_i = \sum_j b_j = 1$$

Normalmente existe um grande número de soluções viáveis para a matriz de origem e destino para um determinado conjunto de a_i e b_j , uma vez que existem $I \times J$ elementos na matriz e $I + J$ restrições. A escolha da solução viável se dará então pelo estabelecimento de um determinado critério, e no caso de transportes em geral trata-se de escolher t_{ij} que minimize o custo total dado por $\sum_{ij} c_{ij} t_{ij}$ onde os coeficientes c_{ij} representam os custos de uma viagem entre i e j .

Utilizando uma abordagem intuitiva e considerando que a solução t_{ij}^* é obtida a partir de alguma função monotônica decrescente da distância ou do tempo c_{ij} entre i e j a forma dessa solução pode ser dada por:

$$t_{ij} = r_i f(c_{ij}) s_j$$

Os fatores r_i e s_j são denominados fatores de balanceamento e f é chamada de função de impedância.

O problema da distribuição está relacionado de forma muito próxima aos conceitos de acessibilidade e de interatividade. O número relativo de oportunidades que pode ser alcançado em uma determinada zona pode ser utilizado como uma medida de acessibilidade para essa zona. O mais comum é uma medida de acessibilidade do tipo Hansen (ERLANDER e STEWART, 1988):

$$\sum_j b_j f(c_{ij})$$

Onde b_j é o número relativo de viagens chegando na zona j , e onde a função de impedância f é introduzida para levar em consideração o fato de que a acessibilidade de uma oportunidade decresce na medida em que o custo ou a separação (distância ou

tempo) aumentam. Essa soma é uma medida da acessibilidade de oportunidades em todas as outras zonas para uma viagem individualizada se originando na zona i .

Uma medida geral da acessibilidade para a área em estudo pode ser obtida pela soma da multiplicação do número relativo a_i de viagens com origem na zona i para todas as zonas que dão origem a viagens:

$$\sum_{ij} a_i b_j f(c_{ij})$$

Essa medida está relacionada com as oportunidades oferecidas para a geração de viagens, e não está diretamente relacionada com o número total de viagens efetivamente realizadas, porém essa informação geralmente é utilizada para calibrar a função de impedância f (ERLANDER e STEWART, 1988).

Como medida de interatividade ERLANDER e STEWART (1988) introduzem a entropia da matriz de viagens:

$$H = \sum_{ij} t_{ij} (\ln(t_{ij}) - 1) - 1$$

Tanto as medidas de acessibilidade quanto de interatividade podem ser utilizadas para avaliar sistemas de transportes futuros, mas necessitam de informações diferentes para sua utilização. A forma de Hansen trata somente as oportunidades oferecidas e requer o conhecimento de c_{ij} e f , enquanto que as medidas de interatividade requerem o conhecimento do número relativo de viagens t_{ij} . Essas medidas são então semelhantes, se for adotada a suposição de que t_{ij} são distribuídas de acordo com um modelo gravitacional.

$$t_{ij} = r_i f(c_{ij}) s_j$$

Onde

$$\sum_j t_{ij} = a_i \quad \text{e} \quad \sum_i t_{ij} = b_j$$

A acessibilidade e a interatividade são objetivos de longo prazo a serem buscados nos sistemas de transporte, outro objetivo é a eficiência, e a sua medida mais comum é o custo médio que é definido por:

$$C = \sum_{ij} c_{ij} t_{ij}$$

O estudo das características de c_{ij} e das formas com que se apresenta $f(c_{ij})$ é uma parte muito importante na modelagem dos sistemas de transporte. Muito se tem estudado sobre os critérios para o estabelecimento da solução t_{ij}^* , e embora o tema nunca possa ser considerado como esgotado, já dispõe de um arcabouço teórico e conceitual muito robusto para disponibilizar as soluções necessárias aos problemas de transporte. Quanto às funções de impedância utilizadas, torna-se necessário um aprofundamento na sua análise e modelagem.

Pode-se observar que a abordagem adotada no estudo dessas funções tem sido de uma forma generalizada como determinístico. Ocorre que por envolver diretamente o tempo de viagem na maioria das vezes, é necessária uma abordagem probabilística, que incorpore a influência das variáveis aleatórias envolvidas.

2.6 Funções de Impedância na Geografia e na Economia dos Transportes

A Teoria da Localização tem como preocupação, basicamente dois tipos de problemas: (a) em que lugar localizar uma determinada atividade econômica para maximizar os seus lucros considerando os mercados consumidores como fixos (b) em quais locais é mais vantajoso para uma determinada atividade econômica desenvolver o mercado para seus produtos. Nos dois tipos de problema desenvolvem-se análises de minimização de custos, e os custos de transporte se constituem em um dos mais importantes itens na sua composição.

Os estudos de von Thunen para a agricultura e de Alfred Weber para a indústria, são considerados como os clássicos na teoria da localização considerando os mercados

como fixos. Frank A. Fetter e August Losch elaboraram estudos também clássicos, considerando como fixos os locais de produção.

O trabalho de von Thunen, foi um dos pioneiros em relacionar custos de transporte com aspectos de localização, e foi baseado em sua experiência de 40 anos em gerenciamento na área de agricultura na Alemanha do século XIX. Esses estudos viabilizaram o estabelecimento de uma base para a metodologia de custos para a produção de uma safra e o seu transporte, e para os preços praticados no mercado de consumo. Apesar da análise de von Thunen ser considerada como muito formal e suas premissas muito restritivas, foi uma contribuição muito importante e pioneira, no estabelecimento do valor de lugar ao transporte.

Em 1909 Alfred Weber, um economista alemão publicou a sua Teoria da Localização Industrial. Ele focalizou o seu trabalho na manufatura e na operação de processos industriais. Assim como a análise de von Thunen, a de Weber também foi muito formal e sujeita às limitações de muitas restrições assumidas. Essas premissas eram no entanto, menos restritivas que as de von Thunen.

Os estudos de Weber, chamam a atenção por demonstrar a influencia dos custos de transporte, na definição da localização das atividades econômicas. Auxiliaram também, na compreensão do porquê determinados tipos de produção serem denominadas orientadas para o mercado, algumas orientadas para os insumos, e porquê a maior parte das atividades mais rentáveis se encontra em algum ponto, entre as fontes de insumos e os mercados consumidores.

A questão dos pontos de produção fixos e identificação da localização dos mercados de consumo mais vantajosos a serem atingidos, é o segundo maior tópico da teoria da localização tradicional. Frank Fetter, um economista americano e August Losch, um economista alemão, entre outros, tiveram notáveis contribuições a essa teoria.

O papel das infra-estruturas públicas de transporte tem sido muito debatido junto com as novas teorias de localização e das integrações econômicas internacionais e interregionais. Uma das preocupações mais importantes no desenvolvimento de

políticas de transporte é que as infra-estruturas se constituem em um benefício para a sociedade. A importância da modelagem dos custos de transporte é evidenciada em estudos recentes de geografia e economia dos transportes como MARTIN e ROGERS (1995), PUGA(1999), RICCI (1999), BRATHEN (2001), PUGA(2002), ROMAIN et al (2003), HIMANEN et al, 2005, PÁEZ (2006).

Especificamente no Brasil estudos têm sido desenvolvidos com utilização de modelos gravitacionais, CASTILHO (2001) faz uma análise das dificuldades encontradas para o acesso das exportações do Mercosul ao mercado europeu, KUME et al (2004) avaliam o impacto das ofertas de liberalização comercial recíproca entre o MERCOSUL e a União Européia, (FONSECA et al, 2004) mostram que a formação da ALCA vem gerando grandes expectativas nos exportadores de produtos agrícolas brasileiros, ALVIM e WAQUIL (2003) identificam os efeitos dos acordos de livre comércio de âmbito multilateral sobre os produtores de arroz no Brasil, ARAÚJO e PIANTO (2005) constroem uma categorização das firmas industriais brasileiras de acordo com o seu potencial exportador. Em CASTRO et al (1999) os autores apresentam a estimativa de um modelo de comércio interestadual como base para quantificar a demanda por transporte de cargas e avaliar o impacto dos custos logísticos de abastecimento e distribuição na estrutura espacial do comércio interestadual brasileiro. Verificou-se que os fluxos mais afetados pelos custos logísticos são aqueles entre os estados com maior proporção de produção agrícola e os de comércio que percorrem distâncias mais longas.

O modelo utiliza os custos rodoviários como uma aproximação dos custos logísticos totais, dada a sua predominância no total de mercadorias transacionadas no país. Observa no entanto que os custos logísticos devem levar em consideração necessariamente os custos financeiros de estoque. Faz referência à suposição de BAUMOL e VINOD(1970) de que os custos de estoque podem ser estimados como uma função do desvio-padrão do tempo de trânsito, observação que se mostrou muito importante no desenvolvimento desta pesquisa.

Essa suposição é importante na medida em que aponta para uma forma de analisar como a qualidade das infraestruturas de transporte é utilizada nas decisões de localização que precedem a efetivação das trocas comerciais. Dessa forma nas suas

conclusões os autores apontam que são desejáveis desenvolvimentos de estudos de funções de custo que possam incorporar os custos de estoque decorrentes das características do transporte, que causam um forte impacto sobre as decisões de compra e venda de produtos e acrescentamos sobre as decisões de localização das atividades econômicas.

O impacto dos custos de transporte na produção agrícola brasileira nas décadas de 70, 80 e 90 é avaliado em CASTRO (2001). Para tanto, é desenvolvido um modelo econométrico de função produção cuja especificação incorpora os insumos agrícolas clássicos e modernos, bem como variáveis indicadoras dos custos de transporte inter e intrarregional. Os resultados alcançados permitiram quantificar espacialmente a interdependência entre os transportes e a produção agropecuária, e os mecanismos pelos quais as reduções de custo de transporte se traduzem no aumento da produtividade agrícola.

No artigo, focaliza-se o papel específico desempenhado pela expansão e pela pavimentação da malha de transporte rodoviário e sua relação com o aumento da produtividade agrícola, com especial atenção para a região do cerrado brasileiro, uma vez que foi essa região que apresentou a maior dinâmica de crescimento do setor agropecuário no período considerado.

Um importante exemplo da demanda por uma melhor avaliação das infraestruturas de transporte considerando o comportamento espacial da rede viária pode ser encontrado em MAGALHÃES et al (2004). Os autores se utilizam do conceito de área de cobertura espacial, semelhante à de área de influência para desenvolver uma proposta de um Indicador de Cobertura Espacial da Malha Rodoviária que pode indicar quais as soluções mais eficientes no sentido da expansão da área do território atendida.

Em VALLIM FILHO e GUALDA (2004) é apresentada uma aplicação de técnicas de Pesquisa Operacional a um caso real com mais de duzentos pontos de demanda distribuídos sobre os três estados da região sul do país. Foram modelados os custos de armazenagem e movimentação de materiais, estoque e vendas perdidas. Estes modelos tratados de forma exógena ao modelo de otimização da primeira fase puderam

representar sem a restrição de linearidade o comportamento de outros componentes de custo.

Os autores fazem uma revisão bibliográfica do assunto e verificam que a literatura é escassa em termos de tratar as questões que a pesquisa procura abordar. Uma dessas questões é a modelagem dos custos de estoque, que a maioria dos trabalhos não trata de forma explícita e outra, já apontada em CASTRO et al (1999), refere-se à necessidade de desenvolver melhor as funções de custo logístico para incorporar os efeitos da nível de serviço dos transportes nos custos de estoques.

MAGALHÃES e YAMASHITA (2005) apresentam uma metodologia de desenvolvimento de sistemas de indicadores que incorporando o processo estratégico de planejamento e gestão voltada para resultados, busca inseri-los adequadamente no processo de tomada de decisão. Essa metodologia foi aplicada no desenvolvimento de um sistema de indicadores para o planejamento e gestão da estrutura de circulação viária. Nesses indicadores foi incorporado o conceito de Índice de Cobertura Espacial (MAGALHÃES et al, 2004). Essa aplicação é uma indicação de que é possível que esteja se iniciando uma tendência para uma maior utilização de ponderações relativas aos aspectos espaciais aplicadas em problemas envolvendo transporte (PAEZ, 2006).

2.7 Tempo de Viagem em Modelos de Equilíbrio Geral

Os modelos de equilíbrio geral aplicado (EGA) – às vezes chamados de computáveis – servem para efetuar a análise dos processos de ajuste estrutural, levando em conta, na modelagem, uma estrutura de interdependências do sistema econômico, em que todos os mercados estão relacionados, gerando efeitos retro-alimentadores entre si.

Quando, nos modelos EGA, foi incorporada a dimensão regional, estes passaram a ser um instrumento para investigar questões tais como localização, migrações, o uso da terra e outros assuntos regionais. No momento em que à dimensão regional somou-se um tratamento explícito dos custos de transportes, deu-se origem a modelos de equilíbrio geral aplicados espaciais (EGAE). Em comparação aos modelos EGA, o

desenvolvimento desse tipo de modelo é mais recente: a maioria deles surgiu nos anos 90.

É possível fornecer duas explicações para esse desenvolvimento recente. Em primeiro lugar, os modelos EGAE exigem, para a sua implementação, uma copiosa quantidade de dados, compartilhando da mesma dificuldade encontrada em modelos multirregionais. Em segundo lugar, há a necessidade de elevados esforços computacionais, que começou a ser superada apenas recentemente, com o desenvolvimento da informática.

Embora esta pesquisa não tenha por objeto teórico essa modelagem como os seus resultados visam a aplicação em modelagens espaciais de transportes, e considerando a importância crescente desses modelos, foi realizada uma busca na Literatura mais recente para um melhor entendimento de sua aplicabilidade e importância.

Em uma contradição com o parágrafo anterior está o trabalho de HARKER (1987), que embora não possa ser considerado recente é uma aplicação muito importante, na medida em que apresenta uma modelagem de equilíbrio geral aplicada ao transporte de cargas. Nesse estudo as funções de custo utilizavam os preços dos fretes, que à época eram acessíveis em parte aos estudos teóricos, porém já era apontada como uma restrição o fato de que esses dados se tornariam cada vez mais difíceis de serem obtidos, dada a reserva com que os transportadores tratam as informações sobre os seus preços.

KILKENNY(1998) explora uma relação que a princípio parecia negativa mas que veio a ser tornar positiva, entre a redução nos custos de transporte e o desenvolvimento de regiões rurais. Foi desenvolvido um modelo de equilíbrio geral para duas regiões com mobilidade para os trabalhadores e para as firmas, e evidenciou as implicações dos custos dos serviços de transporte utilizados para a indústria e para a agricultura nas decisões de localização das firmas e de moradia, em um contexto de economias de escala e diferenciação de produtos.

BRÖCKER e SCHNEIDER (2002) desenvolvem um modelo de Equilíbrio Geral Computável dividindo a Áustria em nove regiões com fluxos comerciais ligados a seus

quatro vizinhos do Leste e ao resto do mundo. Os custos de transporte este caso foram modelados com representados pelas distâncias entre os pares de origem e destino.

Uma modelagem de equilíbrio geral computável aplicada a múltiplas regiões é encontrada em LOFGREN e ROBINSON (2002). Implementada em uma base de dados não real, porém inspirada em um país africano de economia pobre e em desenvolvimento (Moçambique) com regiões rurais conectadas a regiões urbanas que fazem o comércio com o mundo exterior.

Os autores mostram que o modelo propicia uma boa estrutura para analisar o impacto de aumento dos preços internacionais e redução nos custos de transporte domésticos, e verificam que a incorporação explícita de considerações espaciais tem um forte impacto nas simulações desenvolvidas. Neste caso por se tratar de um experimento teórico de simulação de variações os custos de transporte foram considerados em seus valores relativos.

Com o objetivo analisar o impacto econômico da deterioração da malha rodoviária do Estado de Minas Gerais e utilizando um modelo de equilíbrio geral aplicado computável espacial, ALMEIDA (2003) simula a deterioração da malha rodoviária daquele estado envolvendo efeitos sobre o tempo de viagem e sobre os fretes. As principais descobertas revelam grandes perdas de bem-estar social, redução do nível de produção das firmas e da da demanda final, bem como a elevação no índice de preços. Verifica-se que as regiões mais pobres são mais afetadas do que as ricas em termos de perdas regionais de bem estar social.

Os fretes agrícolas e industriais são utilizados explicitamente por intermédio de uma estimativa econométrica em que os seus valores são obtidos em função da distância entre pares de origem e destino. A fonte de dados para a estimação do modelo para produtos agropecuários e para alguns produtos industrializados vem da pesquisa de acompanhamento do mercado de fretes em rotas de transporte cargas (principalmente agrícolas) do Sistema de Informações sobre Fretes de Cargas Agrícolas, SIFRECA (www.sifreca.esalq.usp.br).

A simulação de elevação dos custos decorrentes da deterioração da malha viária é realizada com uma elevação artificial nas distâncias entre pares de origem e destino. Essa mesma forma é adotada em *The Transport-Regional Equity Issue Revisited* (ALMEIDA et al, 2003) com o mesmo modelo para o Estado de Minas Gerais porém os autores desenvolvem nesse caso quatro experimentos baseados em diminuições dos custos de transportes utilizando o “encurtamento de distâncias”. Os principais achados testemunham que se a melhoria da infraestrutura de transporte é somente entre as regiões pobres, a promoção da equidade regional é insignificante. Se as ligações da infraestrutura de transporte são somente entre regiões ricas, há um acirramento das desigualdades regionais. Se a melhoria ocorre nas estradas ligando regiões pobres e ricas, há uma promoção de equidade regional.

Esse modelo volta a ser utilizado no trabalho *A Duplicação da Rodovia Fernão Dias : Uma Análise de Equilíbrio Geral* (ALMEIDA, 2004) para quantificar os ganhos de bem estar agregados e regionais da duplicação da rodovia BR-381 que faz a ligação de Belo Horizonte a São Paulo. Mais uma vez os custos de transporte são considerados como uma estimativa do frete em função da distância e/ou tempo de viagem.

Utilizando uma base de dados do estado do Texas nos Estados Unidos, um modelo de KOCKELMAN et AL (2005) simula os padrões de emprego e produtos em zonas referentes a demandas diferenciadas de exportação, modos de transporte e opções de redes de transporte. Uma variedade de aplicações que explora decisões de localização, produção, e padrões de fluxos de comércio em função de diferentes demandas por exportação e custos de transporte.

Como na maioria dos modelos os custos de transporte foram representados pelas distâncias entre os pares de origem e destino, e os efeitos do tráfego por exemplo também foram convertidos em penalidades de distância mas apenas como uma simulação. Não foram considerados de uma forma explícita, da mesma forma que em outros estudos de localização referenciados anteriormente, considerações a respeito de mudanças no nível de serviço.

2.8 Abordagem Probabilística do Tempo de Viagem

A análise das metodologias de avaliação da capacidade de redes viárias e de seus projetos proporciona uma base conceitual, para buscar nas principais variáveis utilizadas nesses métodos um referencial para testar as hipóteses levantadas. Indicam que de fato é possível buscar uma relação entre o nível de serviço praticado em uma rede viária, podendo ser representado por medidas da confiabilidade com que se realizam as viagens entre origens e destinos, e as características de qualidade do projeto e seu estado de deterioração. Os métodos de comprimento virtual podem inspirar uma metodologia de análise em que a incerteza pode ser considerada também como uma fonte de aumento virtual da impedância.

Para avaliar o impacto da variabilidade do tempo de viagem nas funções de impedância deve ser utilizada uma modelagem que incorpore nas medidas utilizadas para a impedância uma ponderação relativa aos efeitos dessa variabilidade. A monetarização desses efeitos pode ser um caminho, outra forma é estudar a utilidade relativa do tempo de viagem em problemas de alocação e distribuição de viagens, buscando obter uma forma de medir os efeitos de variações nas distribuições de probabilidades do tempo de viagem.

Uma busca na literatura com relação às abordagens probabilísticas para o tempo de viagem mostra os estudos de confiabilidade do tempo de viagem têm avançado no desenvolvimento de modelos de análise das condições e da forma de se obter medidas de variabilidade do tempo de viagem. No capítulo 3 é apresentada essa revisão bibliográfica com o objetivo de proporcionar uma fundamentação teórica para o desenvolvimento de um modelo que considere essa abordagem probabilística.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 O Atraso na Operação de Transporte de Cargas

O transporte de cargas é uma atividade que impacta diretamente a configuração da estrutura econômica de uma região, tendo grande importância na determinação das decisões de produção, comércio e de consumo dos agentes envolvidos. A qualidade da infra-estrutura necessária a essa atividade aliada às condições tecnológicas das empresas que atuam diretamente no setor irão determinar o alcance e as restrições a que está sujeito o comércio entre diferentes regiões.

O transporte de cargas afeta a disponibilidade dos bens e mercadorias nos mercados consumidores, compondo uma fração decisiva dos seus custos, aquela que é determinante dos preços de equilíbrio e da sua viabilidade econômica.

Os modelos necessários ao estudo do transporte de cargas, no entanto, são de natureza bastante complexa dada a quantidade de variáveis envolvidas com relação às possibilidades e às combinações de origem e destino, mercadorias, modos de transporte e rotas e ainda às restrições que a necessidade de sigilo no âmbito de um mercado competitivo impõem à disponibilização de informações.

Talvez por não estarem sujeitos a essas restrições, os estudos do transporte de passageiros em áreas urbanas puderam dar maior atenção aos efeitos que a confiabilidade, ou a falta dela, têm nos sistemas de transporte, buscando desenvolver modelos que possam representar a variabilidade do tempo de viagem e da capacidade das vias de transporte. Um forte estímulo no caso do transporte de passageiros em áreas urbanas é que as viagens estão sujeitas a restrições relativas ao tempo disponível para a sua realização e essa restrição condiciona o ciclo diário de todas as atividades humanas.

Outra fonte de motivação para estudos da confiabilidade de sistemas de transportes foram os efeitos de desastres naturais e as suas conseqüências para a conectividade entre as regiões e cidades atendidas pela rede viária.

O transporte de cargas, entretanto, também sofre um impacto relevante da variabilidade das condições em que se dão suas viagens. Os diversos recursos envolvidos nessas operações tais como veículos, terminais, sistemas, locais de armazenagem e ainda as necessárias interações entre o transportador e o embarcador da

carga, o receptor seja o cliente final ou um agente de distribuição, e ainda as restrições a que as operações de transporte de cargas estão sujeitas nos grandes centros, são motivações importantes para que maior atenção seja dada à modelagem que considere os efeitos do risco e da incerteza envolvidos.

Os custos finais das operações, e que irão impactar diretamente no custo final dos bens comercializados, e as condições de interação entre todos os envolvidos nessas operações são afetados pelo tempo total de viagem e pela distribuição do tempo de viagem. Para uma determinada rede viária que conecta um par de origem e destino existe um intervalo de tempos de viagem possíveis, que irá abranger as operações de trocas comerciais viáveis. A cada operação corresponde também um intervalo de tempos de viagem em que ela própria é viável, mantidas as condições de equilíbrio, e em geral o limite superior desse intervalo é que se torna crítico para a tomada de decisão.

A utilização do valor médio do tempo de viagem, tanto no transporte de cargas quanto no transporte de passageiros, tem o sério inconveniente de que uma operação que exceda o limite de viabilidade não pode ser “compensada” por uma operação que ocorra em um tempo de viagem proporcionalmente inferior ao tempo médio. Assim como não é razoável supor que um trabalhador que chega uma hora antes do início do expediente poderá compensar uma hora de atraso em outra ocasião, também não é razoável supor que uma operação de transporte de carga que supere o seu limite tempo de viagem, possa ser compensada por uma operação proporcionalmente “adiantada”. Muitas vezes a própria operação “adiantada” também irá gerar inconveniências na medida em que pode entrar em conflito com as demais operações e interações programadas em uma determinada cadeia logística.

A variabilidade no tempo de viagem introduz a incerteza no planejamento das viagens, seja no caso do transporte de passageiros seja no transporte de cargas, uma vez que o horário de chegada ao destino não pode ser tratado de forma determinística. Isso pode ser considerado um risco para a operação de transporte e em consequência um custo adicional (RECKER ET AL., 2005).

Tendo em vista esses aspectos a literatura recente na engenharia de transportes tem revelado maior preocupação com o estudo da confiabilidade das redes de transportes, suas causas e seus efeitos. Neste capítulo é apresentada uma revisão na

literatura relativa à confiabilidade das redes de transporte, de forma a estruturar a teoria necessária ao trabalho de pesquisa.

3.2 Confiabilidade de Sistemas de Transportes

Embora se constitua em um fator fundamental para o planejamento, projeto e gerenciamento das redes transporte, a incerteza não tem sido contemplada adequadamente nas ferramentas de análise e previsão que são utilizadas de forma rotineira, tais como modelos de alocação de viagens e simuladores de tráfego (BELL e CASSIR, 2000). Essas ferramentas fornecem previsões de valores médios para os fluxos de tráfego e para os tempos de viagem em uma rede viária.

Esses valores médios não são suficientes, no entanto, para que os modelos possam ter plena utilização, uma vez que não representam adequadamente a extensão da variabilidade desses valores e o comportamento das redes viárias com relação à sua capacidade de suportar essa variabilidade.

O tratamento probabilístico das redes viárias não é considerado trivial pelas dificuldades na determinação das medidas de variabilidade de confiabilidade a serem utilizadas. Os objetivos dos agentes envolvidos no planejamento podem ser diferentes assim como as funções utilizadas, que podem ser relativas ao tempo de viagem, capacidade, acessibilidade, conectividade, e outras e que irão levar a diferentes indicadores de performance da rede.

A literatura em engenharia de transportes tem dado especial atenção à confiabilidade da rede viária, entendida como uma medida da estabilidade do nível de serviço que essa rede oferece aos seus usuários. De um modo geral a confiabilidade de um sistema pode ser entendida como a probabilidade de que o mesmo desempenhe sua função esperada dentro de um intervalo de valores considerados adequados, em um determinado intervalo de tempo (BELL & CASSIR, 2000). Assim a confiabilidade de uma locomotiva pode ser medida pela quilometragem esperada, ou pela sua distribuição de probabilidades, entre duas falhas sucessivas. A falha neste caso é considerada como um defeito que impossibilita a que a mesma circule dentro de sua capacidade de tração e velocidade de percurso comercial.

Para uma rede viária, no entanto, é mais difícil o estabelecimento de sua função esperada, assim como os intervalos de valores que correspondem ao desempenho

esperado. O grau de estabilidade de um sistema de transportes pode ser entendido como a sua capacidade de atender a objetivos esperados sob diferentes circunstâncias (SUMALEE & WATLING, 2003), e dois elementos podem ser considerados como determinantes desse nível de serviço, a demanda pelos fluxos de tráfego e a infraestrutura viária.

Na literatura são encontradas diversas abordagens para a análise da confiabilidade de redes viárias, e em geral elas são caracterizadas por formas diferentes de modelar distúrbios e incertezas na demanda e na capacidade viária, ocasionando variações no comportamento e na confiabilidade do tempo de viagem (LAM ET AL., 2007). No quadro a seguir apresenta-se um resumo das principais características e das definições encontradas na literatura para a confiabilidade de uma rede viária.

Confiabilidade	Indicador	Incerteza	Restrições	Definição de Probabilidade
Conectividade (Iida e Wakayabashi, 1989)	Conectado ou desconectado	Interrupção do fluxo nos links	Não incluídas	Rede conectada ou desconectada
Tempo de Viagem (I) (Asakura e Kashiwadani, 1991)	Um específico tempo de viagem (T)	Flutuação do fluxo diário de tráfego	Demanda constante e não considera capacidade do arco	Tempo de viagem – T
Tempo de Viagem (II) (Asakura, 1998)	Um específico nível de serviço (L)	Capacidade do link degradado	Função de demanda constante ou elástica e restrição de capacidade do arco	Nível de serviço – L
Sistema e Sub-sistema OD (Du e Nicholson, 1997)	Nível mínimo da taxa de redução do fluxo entre OD (E)	Capacidade do link degradado	Função de demanda elástica e restrição de capacidade do arco	Taxa de redução do fluxo – E
Capacidade (Chen et al., 1999, 2002)	Um determinado nível exigido para a demanda (Q)	Capacidade do link degradado	Distribuição proporcional de viagens OD e restrição de capacidade do arco	Capacidade reserva da rede maior que Q
“Provisão” de tempo de viagem (Lo e Tung, 2003 ; Lo et al., 2006)	“Provisão” de tempo de viagem para chegadas pontuais	Capacidade do link degradado	Demanda total constante	Confiabilidade do tempo de viagem dentro dos limites provisionados
Atendimento à demanda de viagens (Zhang e Lam, 2001)	Taxa de atendimento da demanda (S)	Demanda e capacidade do link degradado	Função de demanda elástica	Taxa de atendimento à demanda – S
Vulnerabilidade da Via (Berdica, 2000, 2002)	Tempo de viagem e utilidade	Flutuações da demanda e incidentes	Consequências dos incidentes	Probabilidade de ocorrência de um incidente

Figura 3-1: Características e definições de confiabilidade em transportes (fonte LAM ET AL, 2007)

Em SUMALEE e WATLING (2003) pode ser encontrada uma proposta de estrutura para análise de uma rede de transportes, onde a mesma é vista como um sistema no qual a interação entre oferta e demanda é o próprio mecanismo que define o estado da rede como, por exemplo, os volumes de tráfego nos arcos da rede. Existem nesse sistema várias fontes de variação e que podem se constituir em elementos tanto do lado da oferta quanto da demanda, podem se originar em um incidente previsto quanto imprevisto e seu impacto pode ser permanente ou temporário.

O sistema de transportes interage com diversos fatores externos tais como condições climáticas ou acidentes naturais que causam variações na capacidade da rede viária, e por outro lado existem flutuações na demanda durante o dia ou entre dias diferentes, como dias de semana e finais de semana. Essas variações causam então mudanças no nível de serviço do próprio sistema ou rede de transportes.

3.2.1 Reações ao Risco e à Incerteza em Transportes

Uma interessante discussão sobre incerteza com uma abordagem psicológica, para além de um conceito puramente estatístico é desenvolvida em BONSALL (2000). Incerteza, imprevisibilidade e falta de confiabilidade (em inglês *unreliability*) são apresentados como conceitos relacionados porém diferentes entre si. O argumento é o de que embora sejam resultantes da variabilidade que afeta a maioria dos sistemas, essa variabilidade não necessariamente leva a incerteza, imprevisibilidade e à falta de confiabilidade. Se a variabilidade contém um elemento sistemático ela pode, por extensão, ser previsível e então não conduzirá nem à incerteza nem à falta de confiabilidade.

Confiabilidade implica em um determinado grau de previsibilidade mas não necessariamente nenhuma variação ou estabilidade total, o autor argumenta que para compreender as reações à incerteza é necessário reconhecer que correspondem a um determinado estado da mente além de simplesmente um conceito estatístico. Se o condutor de um veículo não tem consciência de algo, em um sentido estatístico, certo, irá reagir de forma incerta.

As teorias de Von Neumann e Morgenstern têm predominado na literatura sobre o comportamento e reação sob incerteza, e sugere que esse comportamento pode ser

explicado como resultado da escolha por parte dos tomadores de decisão de ações que irão maximizar a utilidade total esperada.

No caso de transportes as estratégias alternativas para o condutor de um veículo sob incerteza sobre o tempo de viagem são vistas por BONSALL (2000) como:

I) Buscar a minimização da variabilidade

- Escolhendo rotas nas quais as condições são relativamente estáveis;
- Viajando em horários em que as condições são relativamente estáveis;
- Variando a velocidade inversamente às condições do ambiente, ou

II) Fazendo o máximo uso da informação existente:

- Se fixando em rotas mais bem conhecidas;
- Viajando em seus horários “usuais” do dia;

III) Procurando aumentar o seu nível de informação:

- Experimentando desenvolver seu nível de informação;
- Fazendo uso de fontes de informação disponíveis.

IV) Buscando minimizar as conseqüências da falta de confiabilidade:

- Inserindo margens de segurança em suas programações;
- Se comunicando com o destino para informar quanto ao novo provável horário de chegada.

V) Capitalizando sobre a incerteza como aproveitamento de uma oportunidade de jogo:

- Contra o sistema;
- Contra outros motoristas;
- Contra “eles mesmos em outros dias”.

Esse comportamento está mais de acordo com decisões de viagens individuais no âmbito urbano. Com relação às viagens interurbanas e especialmente de transporte de cargas algumas considerações adicionais têm que ser feitas. Existe um determinado limite para o tempo de viagem acima do qual se tornam inviáveis os esforços para sincronismo com as demais diversas operações logísticas em que uma determinada viagem está associada.

Se uma viagem que deveria se iniciar às 9:00 h da manhã e em que a necessidade de chegada ao seu destino, por exemplo, é pelo menos até as 18:00, por restrições na estrutura de recebimento, tem uma expectativa de 12 horas de tempo de viagem, o veículo irá ficar imobilizado e carregado até o dia seguinte, no destino ou na origem, o que implica em uma aumento nos custos totais da operação. A frequência com que irá ocorrer esse custo adicional corresponde ao custo do nível de confiabilidade ou da variabilidade do tempo de viagem dessa operação, e poderá no longo prazo torná-la inviável, seja pela questão financeira, seja pela questão técnica e operacional.

Para o transporte de cargas, então, o nível de confiabilidade que as rotas alternativas, que em geral não são muitas, entre um determinado par de origem e destino oferecem, é um componente indispensável para a determinação da viabilidade da operação comercial de transporte de determinado bem.

3.2.2 A Função de Utilidade e a Confiabilidade do Tempo de Viagem

BATLEY (2007) levanta uma hipótese de que o horário de partida de uma viagem é selecionado com base na distribuição dos conseqüentes horários de chegada, considerando que a teoria microeconômica da escolha individual sob incerteza, está fundamentada na proposição de que existe uma relação entre essas escolhas e a distribuição de suas conseqüências.

Para estudar a natureza dessa relação entre as escolhas individuais sob incerteza e a distribuição de suas conseqüências, BATLEY (2007) formula a sua proposição nos seguintes termos:

Seja E um conjunto de eventos mutuamente excludentes:

$$E = \{e_1, \dots, e_k\}$$

Seja E associado com o vetor w , que se refere a uma expectativa, e dá a probabilidade p_k de que cada evento $e_k \in E$ irá ocorrer junto com um prêmio w_k para o indivíduo para o qual o evento de fato ocorrer, assim:

$$\mathbf{w} = \{w_1, \dots, w_k; p_1, \dots, p_k\}$$

Com:

$$\sum_{k=1}^K p_k = 1 \stackrel{\Delta}{\rightarrow} 0 \leq p_k \leq 1$$

Seja S o conjunto finito dessas expectativas, a partir das quais o indivíduo é instado a fazer sua escolha por uma dessas expectativas:

$$S = \{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_n\}$$

Para quaisquer pares de expectativas $\mathbf{w}_q, \mathbf{w}_r, \in S$:

$$\mathbf{w}_q \succcurlyeq \mathbf{w}_r, \text{ se } Y(\mathbf{w}_q) \geq Y(\mathbf{w}_r)$$

Onde $Y(\mathbf{w}_{qn})$ é a utilidade esperada da expectativa $\mathbf{w}_n$, e é dada por:

$$Y(\mathbf{w}_n) = \sum_{k=1}^n p_{kn} U(\mathbf{w}_{kn}) \quad \text{para todo } \mathbf{w}_{kn} \in S$$

Onde $U(\mathbf{w}_{kn})$ é a utilidade derivada do prêmio pago.

Aplicando então essa forma à programação de viagens, seria razoável representar essa escolha em termos de horários de partida e os eventos em termos dos horários de chegada. Seja então A o conjunto dos horários de chegada:

$$A = \{a_1, \dots, a_k\}$$

Seja D o conjunto dos horários de partida:

$$D = \{d_1, \dots, d_n\}$$

E por último seja S o conjunto de escolhas:

$$S = \{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_N\}$$

Seja a utilidade esperada Y_n de qualquer expectativa $\mathbf{w}_n \in S$ dada por:

$$Y_n = \sum_{k=1}^K p_{kn} U_{kn}$$

Onde U_{kn} é a utilidade derivada do horário de chegada a_k , para o horário de partida d_n , e p_{kn} é a probabilidade do evento associado.

A função de utilidade adotada segue o modelo de SMALL (1982) assim definida:

$$U_{kn} = \alpha T_{kn} + \beta SDE_k + \gamma SDL_k + \delta L_k$$

Onde T é o tempo de viagem, SDE é uma chegada adiantada, SDL é uma chegada com atraso e L é uma variável dummy igual a 1 no caso de chegada com atraso e zero para qualquer outro caso.

Dessa forma:

$$T_{kn} = a_k - d_n$$

$$SDE_k = \max\{(PAT - a_k), 0\}$$

$$SDL_k = \max\{(a_k - PAT), 0\}$$

$$L_k = 1 \text{ se } (a_k - PAT) > 0 \text{ senão } L_k = 0$$

O vetor de expectativas fica definido então como:

$$w_n = [(T_{1n}, SDE_1, SDL_1, L_1), \dots, (T_{Kn}, SDE_K, SDL_K, L_K); p_{1n}, \dots, p_{Kn}]$$

Observa-se então que nesse caso os prêmios estão todos expressos em unidades de tempo, e considerando-se inicialmente uma representação esquemática da função utilidade para um horário qualquer de partida $d_n \in D$ considerando um específico par de horários de chegada a_i e a_j atendendo às seguintes relações: $a_{min} < a_i < PAT < a_j$. Onde a_{min} é o horário de chegada mais cedo possível (em condições de fluxo livre), a_i e a_j dois horários de chegada definidos arbitrariamente, considerando porém as relações estabelecidas. Na figura 3-2 essa situação está ilustrada com o horário de chegada representado no eixo horizontal e a função utilidade representada no eixo vertical.

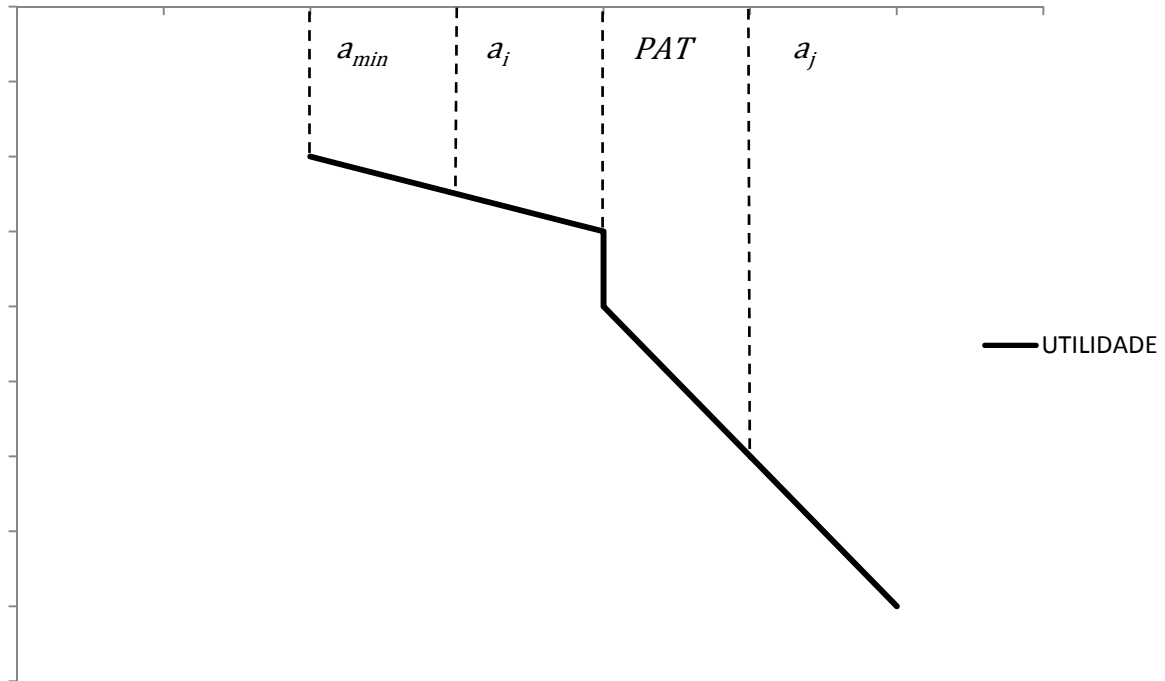


Figura 3-2: Inclinação da função de utilidade do horário de chegada (Fonte: adaptado de BATLEY, 2007).

Observa-se que todos os atributos da função utilidade são “ruins”, alguns autores chegam a considerar “desutilidade”, ou seja α, β, γ e $\delta < 0$. A função utilidade calculada nos pontos a_i e a_j é então:

Em $a = a_i$:

$$U = \alpha (a_i - d) + \beta (PAT - a_i)$$

Em $a = a_j$:

$$U = \alpha (a_j - d) + \gamma (a_j - PAT) + \delta$$

Quando $(PAT - a_i) \rightarrow 0$

$$U \rightarrow \alpha (PAT - d) \rightarrow \alpha (a_i - d) + \alpha(PAT - a_i)$$

Quando $(a_j - PAT) \rightarrow 0$:

$$U \rightarrow \alpha (PAT - d) + \delta \rightarrow \alpha (a_j - d) - \alpha(a_j - PAT) + \delta$$

A inclinação da função de utilidade para os horários de chegada antes de PAT será $(\alpha - \beta)$, e para horários de chegada depois de PAT será $(\alpha + \gamma)$. Essa composição em que $(\alpha < \beta)$ conforme a figura 3-2, corresponde a que a “desutilidade” do tempo de viagem é maior do que a de uma chegada adiantada, e que U é estritamente decrescente na utilidade, e que a sua inclinação é maior para os horários de chegada após PAT do que para os horários de chegada anteriores a PAT .

BATES et al (2001) fazem uma abordagem semelhante no entanto utilizam diretamente o tempo de viagem no mesmo modelo de SMALL (1982) o que permite visualizar o comportamento da função de utilidade sob um diferente ângulo. A função de utilidade formulada é apresentada como:

$$U(t_h) = \alpha T + \beta SDE + \gamma SDL + \theta . DL$$

Onde T é o tempo de viagem e t_h o horário de partida. O mesmo gráfico da figura 3-2 pode então ser visto de outra forma na figura 3-3.

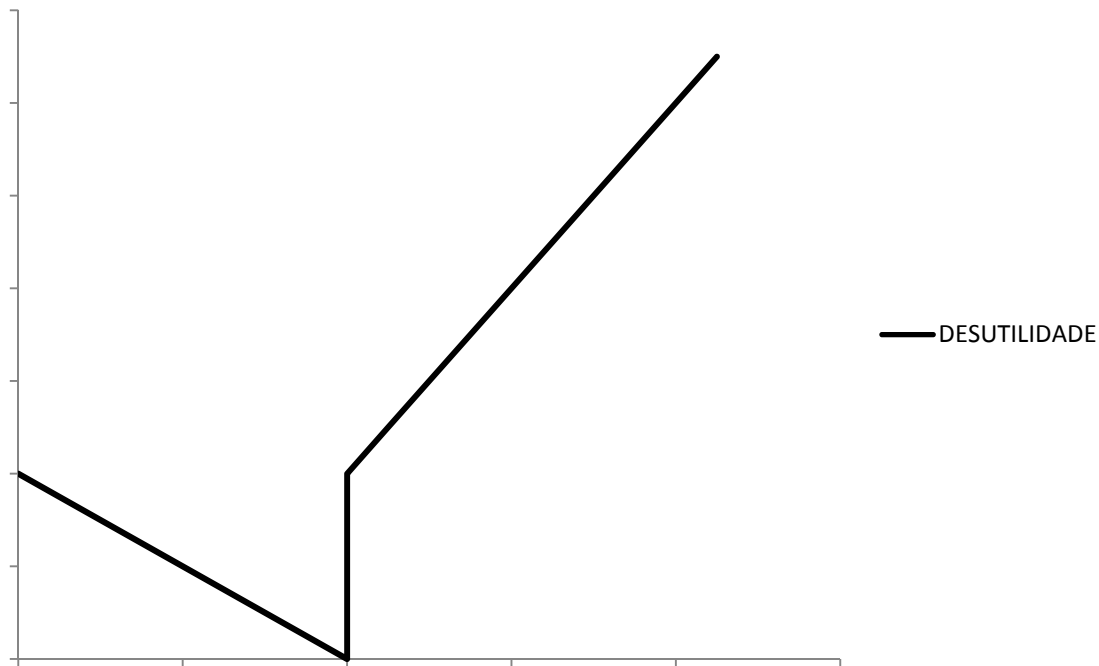


Figura 3-3: Inclinação da função de utilidade do atraso (fonte: adaptado de BATES ET. AL. ,2001).

Enquanto as chegadas ocorrem antes de PAT o usuário sofre com a *desutilidade* do tempo de espera. Na medida em que se aproximam de PAT a *desutilidade* decresce, até o ponto em que a chegada ocorre exatamente em PAT . Na modelagem de BATES et al. (2001) imediatamente a *desutilidade* tem um degrau igual a θ , porque a partir desse ponto estará caracterizado um atraso. A partir desse horário de chegada BATES et al. (2001) também consideram que é esperado um coeficiente γ maior do que o coeficiente β porque é preferível, na maioria dos casos, chegar cedo do que chegar tarde.

Embora existam outras possibilidades de combinações de relações para os coeficientes, essa configuração está bastante adequada para as viagens de transporte de cargas. É esperado que a partir de uma expectativa de horário de chegada que atenda às condições de viabilidade de uma determinada operação, a sua utilidade decresça a uma taxa superior do que a referente aos horários de chegada inferiores a esse horário limite.

Nessa modelagem é importante observar que do mesmo modo que é considerado um horário mínimo de chegada ao destino que é considerado viável, do ponto de vista prático também pode ser estimado, ou estabelecido, um horário máximo viável,

considerando os intervalos possíveis dentro da tecnologia adotada pelo mercado. Não é razoável supor que se considere, por exemplo, em um percurso que é percorrido habitualmente em 2 horas, a possibilidade do mesmo ser percorrido em 10 horas. Essa condição, se ocorrer, será devida a fatores absolutamente excepcionais, e para efeitos de planejamento de operações de transporte de cargas no longo prazo não pode ser considerada.

Se *PAT* é considerado o limite de viabilidade de uma viagem qualquer, se a decisão se refere a uma viagem específica e única, e a expectativa nesse instante é de que o horário de chegada irá superar esse limite, fica claro que a decisão no caso do transporte de cargas é pela não realização da operação. Se, no entanto, trata-se de uma situação de planejamento, em que essa viagem será repetida muitas vezes, o tomador de decisão irá analisar a probabilidade da repetição dessa situação ao longo do tempo, ou seja sua decisão será baseada na confiabilidade do horário de chegada *a* ser inferior a *PAT*. Uma viagem individual apenas entre várias, não será motivo para o planejador considerar que a operação de transporte de um determinado produto entre um determinado par de origem e destino não é viável.

Deve ser considerado ainda um determinado limite superior na medida em que para uma expectativa razoável de tempo de viagem em um percurso, a partir desse tempo de viagem além de não propiciar viabilidade à operação, na prática pode torná-la inexecutável. Se for considerado, por exemplo, um percurso em que o tempo de viagem em condições razoáveis é de 2 horas, não se pode esperar que para esse percurso exista alguma operação com uma expectativa de 10 horas.

Essa situação corresponde a uma ruptura nas condições de conectividade da rede viária, assim pode-se considerar que ao ser retomada a viagem não será a mesma, pois ocorrerá em condições absolutamente diferentes, ou se a condição persistir, o que não pode ser considerado razoável, a operação comercial que envolve o transporte terá forte propensão a se tornar inviável, ou pelo menos as condições de planejamento deverão ser totalmente revistas.

Esse limite irá corresponder então ao valor máximo da “*desutilidade*” que será admitido (ou valor mínimo de U), e mais adiante irá compor a modelagem proposta neste trabalho.

A Teoria dos Jogos tem sido utilizada em alguns trabalhos encontrados na literatura para abordar o comportamento dos sistemas de transportes em que os usuários buscam minimizar os seus tempos de viagem. Essa abordagem pode então fornecer subsídios à modelagem do planejamento de viagens de transporte de cargas sujeitas a variações da confiabilidade do tempo de viagem.

A avaliação da confiabilidade em uma rede de transportes é uma tarefa complexa uma vez que envolve a infra-estrutura viária, constituída pelo leito estradal, pavimentação, obras de arte especiais, sistema de drenagem e etc., mas também as reações e o comportamento dos seus usuários. Se ocorrer uma falha em um componente do sistema viário, então o impacto nos seus usuários irá depender da sua capacidade de adaptação à nova situação (BELL, 2000).

Uma rede de transportes consiste em um conjunto de nós e um conjunto de arcos que juntos representam a infra-estrutura viária. As propriedades dos arcos e/ou dos nós podem estar sujeitas a variações que irão afetar os custos de uma viagem para os seus usuários. A confiabilidade na percepção desses usuários é uma função da confiabilidade dos componentes dessa infra-estrutura, da topologia da rede e do comportamento dos usuários (BELL & CASSIR, 2000).

A alocação de tráfego pode ser vista como um jogo não cooperativo com n participantes, no qual cada usuário se empenha em atingir o seu destino utilizando a melhor rota possível. De acordo com a Teoria dos Jogos este é um jogo com n participantes porque o prêmio de cada participante depende da ação dos demais participantes.

Essas abordagens e as pesquisas efetuadas na literatura indicam então que a taxa de variação constante, a inclinação, da função de utilidade do tempo de viagem com relação ao tempo de viagem esperado, a média, é um caso particular. No caso geral é esperada uma variação dessa inclinação que é função das expectativas e das necessidades que são impostas pelas características das cargas e das operações comerciais de transporte, com relação aos atrasos e às chegadas adiantadas.

3.3 Quantificando a Confiabilidade do Tempo de Viagem

Embora a confiabilidade do tempo de viagem tenha muita relevância no comportamento dos condutores de veículos com relação à escolha das rotas, não existem muitos trabalhos de pesquisa direcionados ao entendimento dos efeitos da confiabilidade nessa tomada de decisão de escolha de rotas (RECKER et al., 2005).

A confiabilidade R_{OD} do tempo de viagem t em um determinado par de origem e destino OD é definida em UNO et al. (2004) como a probabilidade do tempo de viagem ser inferior a um determinado tempo padrão t^* , assim:

$$R_{od} = P(t \leq t^*)$$

A figura 3-4 apresenta a distribuição do tempo de viagem de uma rede de transportes hipotética composta de duas rotas alternativas conectando um par de origem e destino O-D.

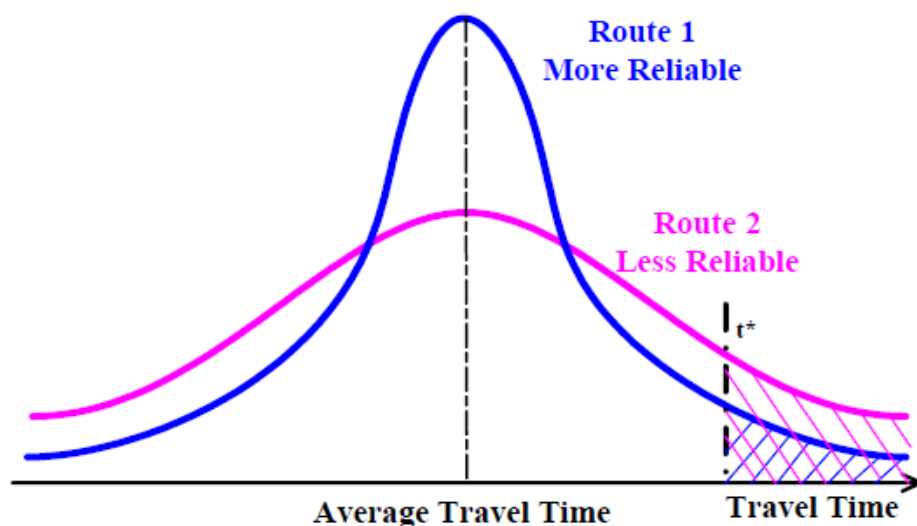


Figura 3-4: Distribuições do tempo de viagem variando com a confiabilidade do tempo de viagem (fonte UNO ET AL,2004).

Observa-se que a média do tempo de viagem é a mesma nas duas rotas, entretanto em termos de confiabilidade do tempo de viagem a Rota 1 é superior à Rota 2 porque $P(t_1 \leq t^*) > P(t_2 \leq t^*)$, t_1 e t_2 correspondem respectivamente aos tempos de viagem na Rota 1 e na Rota 2. A Rota 1 é considerada, dessa forma, com melhor confiabilidade¹ do que a Rota 2.

UNO et al. (2004) desenvolvem uma abordagem prática para corrigir o tempo de viagem com o objetivo de desenvolver uma metodologia para avaliar a confiabilidade do tempo de viagem em uma rede de transporte. Como parte do desenvolvimento de tecnologias de ITS (Intelligent Transportation Systems) vários tipos de veículos têm sido utilizados como pilotos para testar essas tecnologias no Japão. A maioria desses veículos piloto têm instaladas a bordo unidades GPS (Global Position System) que permitem a localização em tempo real dos veículos por suas longitude e latitude.

O Ministério dos Transportes e da Infra-Estrutura do Japão MLIT² vem desenvolvendo um projeto de pesquisa denominado “*Bus Probe Survey*” em que vários ônibus têm sido utilizados como veículos experimentais e de coleta de dados e o foco do estudo de UNO ET AL. (2004) foi essa base de dados cujas características foram assim resumidas:

- a) Como os ônibus trafegam em rotas pré-determinadas, foi possível para os autores combinar a localização desses veículos com as bases digitais das redes viárias com maior acurácia do que a utilização dos dados de carros de passeio ou táxis;
- b) Como as viagens por ônibus são repetitivas em uma determinada rota, foi possível obter os dados das flutuações do tempo de viagem com maior facilidade;
- c) Os autores fazem ressalva de que os tempos de viagem totais podem estar superestimados devido às paradas que os ônibus realizam ao longo de seus trajetos.

¹ A tradução literal do inglês “more reliable” corresponderia a “mais confiável”, que em português tem uma conotação um tanto quanto qualitativa, e no caso visamos uma avaliação quantitativa da confiabilidade.

² Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

O procedimento de estabelecimento de uma rota entre uma determinada origem e um determinado destino é considerado um processo com múltiplos estágios de decisão. Em cada estágio irá considerar o estado físico e o estado da informação. A decisão ótima para o processo remanescente nesses estados no estágio corrente. Diferentemente dos processos determinísticos, uma estratégia ótima não pode ser definida a priori em razão da aleatoriedade envolvida nas transições entre os diversos estágios.

3.3.1 Confiabilidade e Escolha de Rotas

Encontrar uma estratégia ótima para a escolha de uma rota sob incerteza é uma importante questão em diversos campos da ciência, especialmente nas ações para atendimento de situações emergenciais, como desastres naturais, catástrofes, acidentes, incêndios, etc.

TANIGUCHI ET AL. (2000) apresentam um modelo probabilístico para programação e roteamento de veículos considerando a variabilidade do tempo de viagem. Esse modelo é aplicado ao transporte de carga em áreas urbanas.

Existem diversos problemas que são inerentes a esse tipo de operação, os embarcadores e os transportadores estão sujeitos a severas restrições características desse mercado associadas a urgência e prazo reduzido para a realização das operações, alterações freqüentes nos pontos de destino (desaparecimento e surgimento), alterações na rede viária, variabilidade das condições de operação na rede viária (congestionamentos, acidentes, incidentes, etc.), restrições legais aos horários de operação de carga e descarga, restrições legais às dimensões dos veículos de carga urbana, congestionamento de entregas nos locais de destino, limites legais para jornada de trabalho, e etc.

3.3.2 Janelas de Tempo

O modelo de TANIGUCHI ET AL. (2000) considera então uma “janela de tempo” para realização das operações de transporte de carga em áreas urbanas, um modelo VRP-TW³, que minimiza o custo total de distribuição de carga urbana, com

³ Um modelo VRP-TW *Vehicle Routing and Scheduling with Time Windows*.

restrições de capacidade dos veículos e restrições de tempo. O custo total nessa modelagem tem três componentes, o custo fixo dos veículos, o custo operacional, que é proporcional ao tempo de viagem e o tempo de espera no local de destino e uma penalidade por descumprimento da janela de tempo determinada para cada ponto.

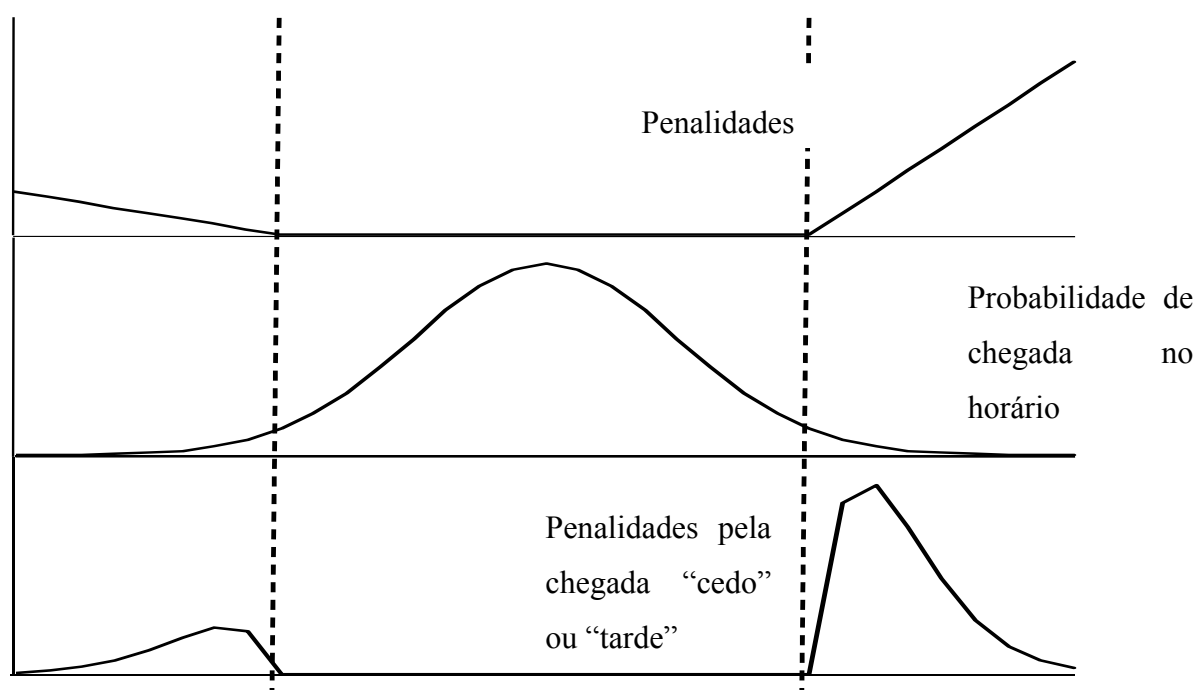


Figura 3-5: Estrutura de penalidades para "janela de tempo" (fonte, adaptado de TANIGUCHI ET AL ,2000).

Na figura 3-5 é apresentada a estrutura de penalidades proposta. O valor da multiplicação da função de penalização pela probabilidade de chegada corresponde à penalidade a ser computada para a chegada antecipada ou atrasada com relação ao horário programado. Esse tipo de penalização é utilizado na distribuição de cargas urbanas em lojas e supermercados. Essas funções de penalização são diferentes, podendo ser observado que nessa modelagem o custo por minuto de atraso é superior ao custo por minuto de chegada antecipada, o que é razoável na medida em que as consequências de um atraso são muito mais prejudiciais à operação como um todo do que as de uma chegada muito cedo.

Essa é uma indicação do tratamento que é dado à confiabilidade ou à falta dela nas operações de transporte, no entanto a modelagem de uma penalização é uma tarefa difícil, que irá requerer a inferência das consequências de um atraso ou chegada cedo no custo generalizado de uma operação de transporte de cargas. Pode-se esperar que no caso do transporte interurbano dificilmente será considerada a penalidade pela chegada antecipada, pois o próprio condutor do veículo tem controle relativo sobre essa situação, na medida em que pode até mesmo reduzir a marcha no seu percurso para buscar chegar em uma determinada “janela de tempo”, se for o caso.

Com relação ao atraso já se torna mais difícil, porque existem os limites de velocidade legais, e o próprio tráfego ou as condições da infra-estrutura viária podem ser o motivo do atraso e persistir impedindo um aumento de velocidade.

3.3.3 Problemas de Caminho Mínimo

FAN ET AL. (2005) desenvolveram um algoritmo para caminho alternativo ótimo baseado em programação dinâmica para o caso em que a otimização é definida como a maximização da confiabilidade do tempo de viagem, denominado “*stochastic on-time arrival algorithm (SOTA)*”.

Os estudos do problema de caminho mínimo incluem uma variedade de abordagens tanto determinísticas quanto probabilísticas. De uma forma geral os estudos probabilísticos têm tratado o problema como a identificação do caminho com o menor tempo de viagem esperado, e essa abordagem é em termos computacionais equivalente ao problema determinístico. De fato no Brasil os trabalhos recentes encontrados na literatura de engenharia de transportes dão esse tipo de abordagem como HALLAL &

PUREZA (2004), NINCI ET AL. (2005), LEAL ET AL. (2005) ou BONASSER & GUALDA (2006).

FAN ET AL. (2005) argumentam que essa abordagem da estratégia ótima pode ter uma variância muito elevada. Dessa forma essa estratégia pode ser uma escolha sub-ótima para uma viagem que tem restrições mais rigorosas quanto a um atraso, como no exemplo já citado em que no planejamento de operações de transporte de cargas buscase o menor tempo de viagem, no entanto pode haver um horário de chegada limite que irá impor um tempo de viagem máximo aceitável. LEE ET AL. (2000) argumentam que essa escolha nem sempre se restringe ao menor tempo de viagem, e que os motoristas têm a tendência de escolher a rota em que a variação do tempo de viagem é minimizada.

Não é trivial portanto a extensão do problema de caminho mínimo sob abordagem determinística para o contexto probabilístico. Nesse caso devem ser consideradas as definições do tempo esperado e da confiabilidade do tempo de viagem. A definição do caminho ótimo pode ser por exemplo a maximização da probabilidade de realizar um tempo de viagem inferior a um determinado tempo limite, ou a maior probabilidade de realizar a viagem com o menor tempo.

No problema determinístico o conhecimento do nó corrente e da topologia da rede de transporte fornece todas as condições de informações necessárias para a tomada de decisão quanto ao próximo nó a ser atingido. Essas informações são suficientes não apenas para identificar o nó subsequente, como também para identificar o caminho ótimo. Introduzindo a restrição de tempo, a necessidade de atingir o destino em um determinado intervalo de tempo, traz a chance de condicionar a escolha do nó sucessor dentro do tempo disponível remanescente.

Na abordagem probabilística então o estado resultante da escolha do próximo nó não é definido totalmente até que o arco que leva a esse nó sucessor seja percorrido. Diferentemente do problema determinístico, o caminho ótimo não pode ser identificado *a priori* porque o problema muda com as alterações no tempo aleatório disponível para chegar no destino no tempo determinado⁴. O que é necessário então é uma sequência de decisões que incorporem as informações dos condicionantes de forma ótima, na medida em que essas informações vão sendo disponibilizadas.

⁴ Em FAN ET AL.(2005) “on-time”.

Dada uma função densidade de probabilidade conhecida, $p_{ij}(t)$ estacionária e independente, para o tempo de viagem em qualquer arco ij , e seja um veículo localizado no nó i , deseja-se conhecer então qual o próximo nó a ser atingido para maximizar a probabilidade de atingir o nó de destino N dentro do tempo t . Chegar ao destino em qualquer tempo inferior a t é um evento com sucesso, caso contrário irá se constituir em uma falha. Nessa modelagem não são consideradas penalidades para chegadas cedo. O objetivo é escolher um nó sucessor que maximize a probabilidade de sucesso, a partir de sua localização no momento e o tempo remanescente disponível. Esse problema é típico do transporte de cargas, especialmente quando a mercadoria transportada é perecível.

Na sua modelagem FAN ET AL. (2005) tratam esse problema como um processo de decisão em múltiplos estágios e formulam a solução com base no princípio de Bellman de otimalidade, segundo o qual uma seqüência ótima de decisões tem a propriedade de que quaisquer que sejam o estado e a decisão iniciais, as decisões subseqüentes deverão ser ótimas com relação ao estado resultante da decisão inicial.

O método de Picard de sucessivas aproximações é utilizado então para resolver um sistema de equações não lineares, e utilizando o teorema da convolução para as transformadas de Laplace, os tempos de processamento para calcular essas integrais são substancialmente reduzidos.

Em uma extensão desse estudo FAN & NIE (2006) desenvolvem uma análise da convergência desse algoritmo, introduzindo duas seqüências especiais de aproximações sucessivas e abordam a conexão entre o problema de maximização da confiabilidade e o problema de caminho mínimo.

Essa modelagem trata então da escolha de uma rota em uma rede de transporte, considerando a confiabilidade associada ao tempo de viagem em cada arco, e considera que o tempo de viagem está sujeito a um limite superior. A confiabilidade estará então definida ao ser identificado esse limite superior, no entanto a modelagem desse limite estará relacionada, da forma como foi abordado o problema, a situações particulares.

Ao considerarmos o transporte de carga, para cada combinação de mercadoria, destinatário, destino, origem, transportador, etc. haverá uma definição ou requisitos diferentes para o estabelecimento desse limite máximo.

3.3.4 Confiabilidade no Planejamento de Transportes

As abordagens de planejamento de longo prazo de redes de transporte buscam modelagens da confiabilidade do tempo de viagem e de seus efeitos que possam ser mais abrangentes. Esses estudos buscam associar as condições da infra-estrutura viária com os indicadores e as medidas de variabilidade e confiabilidade do tempo de viagem.

Em LINT ET AL. (2008) essa discussão é tomada com relação de que forma pode ser definida a confiabilidade do tempo de viagem sob diferentes perspectivas, do usuário de uma rede de transporte, do controle de tráfego, do planejamento de transportes, etc. Outro ponto importante e que é do interesse desta pesquisa é com relação a que medidas, padrões e indicadores podem ser definidos para quantificar a confiabilidade do tempo de viagem, e como eles podem ser monitorados.

De acordo com o trabalho de pesquisa de LINT ET AL. (2008) a maioria das medidas de confiabilidade do tempo de viagem é obtida a partir de distribuições dos tempos de viagem diários em uma rota ou via em particular, ou seja a variabilidade do tempo de viagem em um determinado horário do dia (TOD)⁵, e determinado dia da semana (DOW)⁶, e coletadas ao longo de um período relativamente extenso (por exemplo um ano).

Em TEXAS TRANSPORTATION INSTITUTE (2006) a Federal Highway Administration do Department of Transportation – DOT dos Estados Unidos apresenta um Relatório sobre a confiabilidade do tempo de viagem no qual demonstra sua preocupação com um melhor entendimento sobre suas características, causas e conseqüências. Nesse estudo são recomendadas quatro diferentes formas de quantificar a confiabilidade de tempo de viagem:

- a) O 90^o e 95^o percentis dos tempos de viagem

Uma das formas mais simples de medir a confiabilidade e que consiste em obter esses percentis para rotas ou viagens específicas, e que indica o quanto de atraso será esperado nos dias com as piores condições relativas ao tempo de viagem. O 90^o e o 95^o percentis dos tempos de viagem são medidos em minutos e segundos e, de acordo com o estudo, podem ser mais facilmente compreendidos pelos condutores de veículos

⁵ TOD time-of-day (LINT ET AL.,2008)

⁶ DOW Day-of-week (LINT ET AL.,2008)

de passeio, e por essa razão é considerado o indicador mais adequado para esse tipo de usuário. Essa medida tem o inconveniente de que não permite a comparação entre rodovias com diferentes características como por exemplo diferentes extensões. Também dificulta a análise de rotas combinadas, ou tempo de viagem em uma determinada região ou ainda um indicador médio para a rede viária total;

b) O “*Buffer Index*”;⁷

Representa uma espécie de margem de segurança que a maioria dos usuários adiciona ao tempo de viagem esperado no planejamento de suas viagens, buscando garantir a chegada dentro do horário requerido. O *Buffer Index* é expresso como percentagem, e o seu valor aumenta na medida em que a confiabilidade diminui. Um *buffer index* de 40% por exemplo, significa que para um tempo de viagem esperado de 20 minutos deve ser acrescentado um tempo adicional de 8 minutos ($20 \times 0,4$) para garantir a chegada dentro do horário requerido. Nesse caso o tempo adicional de 8 minutos é denominado *buffer time*. O *buffer index* é calculado como a diferença entre o 95º percentil do tempo de viagem e o tempo de viagem esperado, a média, dividido pelo tempo de viagem esperado;

c) Índice de Tempo de Planejamento⁸

Representa o tempo total de viagem que deve ser planejado quando um *buffer time* adequado. O Tempo índice de planejamento difere do *buffer index* porque inclui tanto os atrasos típicos quanto os inesperados. Dessa forma o índice de tempo de planejamento os casos de tempo de viagem próximos das piores condições com os tempos de viagem em condições de volume de tráfego muito leve ou de fluxo livre. Por exemplo, uma índice de tempo de planejamento de 1,60 significa que para uma viagem de 15 minutos em condições de fluxo livre, o tempo total deve ser planejado para 24 minutos ($1,6 \times 15$). O índice de tempo de planejamento é útil porque pode ser comparado diretamente com o índice de tempo de viagem (uma medida do congestionamento médio) em uma escala numérica similar. O índice de tempo de planejamento é calculado pelo 95º percentil dividido pelo tempo de viagem em condições de fluxo livre.

d) A frequência com que o tempo de viagem excede um limite esperado.

⁷ No caso *buffer* ou *cushion* (travesseiro) são expressões utilizadas para representar uma quantidade extra de tempo para “amortecer” os possíveis efeitos do atraso possível, optou-se neste trabalho por não efetuar sua tradução.

⁸ Do original em inglês *planning time index* (TEXAS TRANSPORTATION INSTITUTE, 2006).

É tipicamente expressa como uma porcentagem dos dias ou o do tempo em que o tempo de viagem excede um determinado limite ou a velocidade no trajeto é inferior a um determinado limite. A frequência da medida de congestionamento é calculada com relativa facilidade se houver disponibilidade de dados referentes ao tráfego, e em geral é apresentada com relação a dias da semana durante o horário de pico.

A figura 3-6 ilustra a relação entre o índice de tempo de viagem, o *buffer index* e o índice de tempo de planejamento. O índice de tempo de viagem representa o tempo adicional esperado (médio) durante o horário de pico, comparado com o tempo de viagem em condições de tráfego leve ou de fluxo livre. O *buffer index* representa o tempo adicional que é necessário acima do tempo de viagem esperado no horário de pico, enquanto o índice de tempo de planejamento representa o tempo de viagem total necessário.

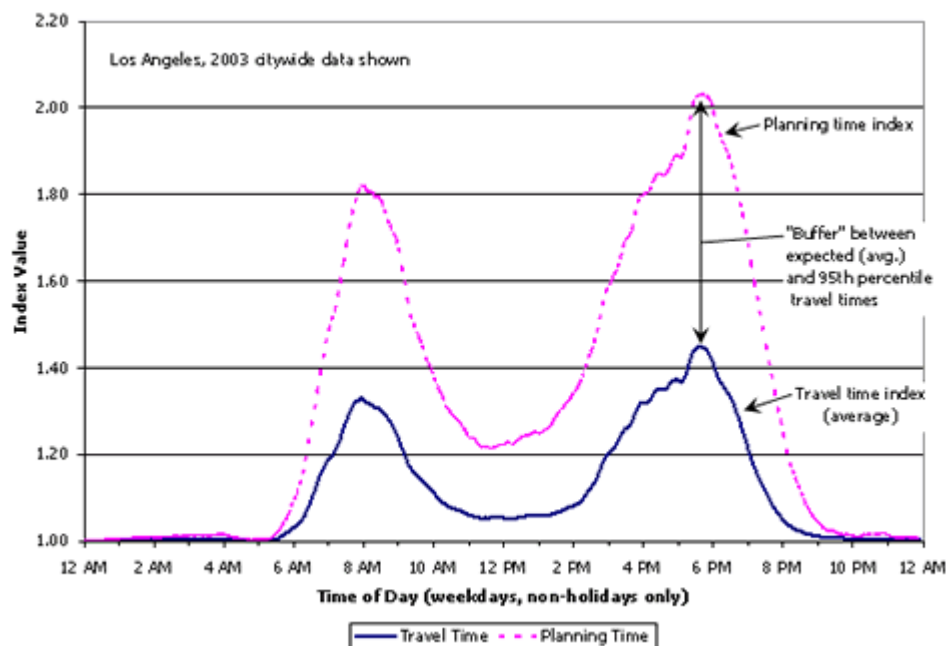


Figura 3-6: Exemplo de *Buffer Index* (Fonte: Mobility Monitoring Program)

A figura-3-7 apresenta uma relação semelhante na forma da distribuição de frequência dos tempos de viagem. Pode ser visto um exemplo do cálculo do tempo médio de viagem e o tamanho do *buffer*, que ajuda a ilustrar a variedade de medidas da

confiabilidade do tempo de viagem.

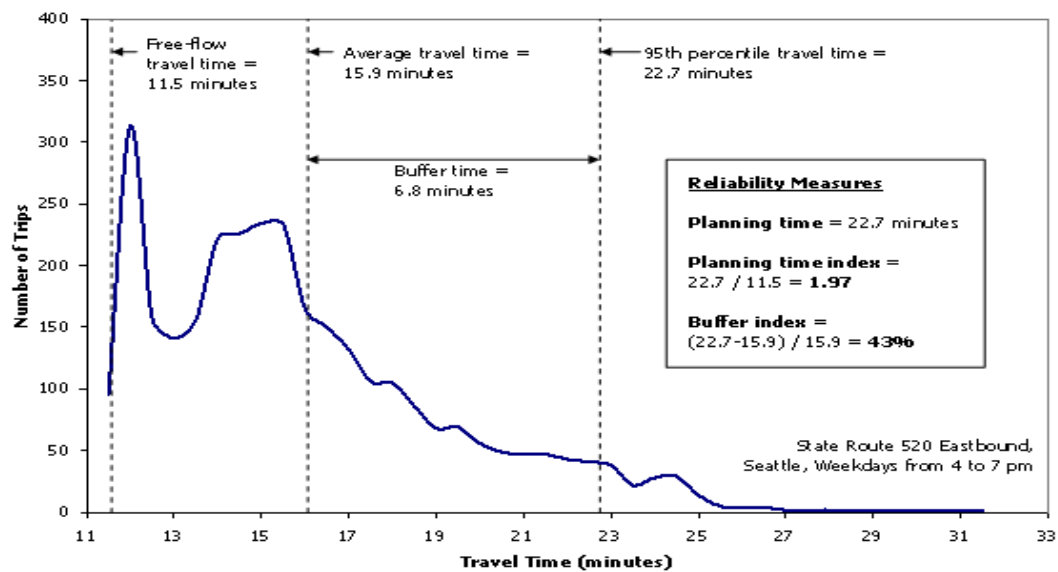


Figura 3-7: Exemplo de cálculo do tempo médio de viagem e do *buffer index* (Fonte: Mobility Monitoring Program).

Embora os índices utilizados sejam referentes ao 95º percentil do tempo de viagem, não é trivial estabelecer um procedimento com suficiente base científica que justifique essa escolha, que nessa metodologia deve ser realizada com suporte na experiência dos tomadores de decisão, e tomando em conta as características da rede de transporte em estudo e dos objetivos desejados da projeção de confiabilidade. O próprio estudo referencia que outros percentis podem utilizados dependendo do nível desejado de confiabilidade.

Em LYMAN (2007) é feita uma aplicação desses indicadores na avaliação de diversos segmentos nas principais rodovias metropolitanas da cidade de Portland no Estado do Oregon entre os anos de 2004 e 2007. O *buffer index* foi selecionado como a medida principal da confiabilidade do tempo de viagem, e foi calculado sobre o 95º percentil.

Essa trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar a utilização de medidas de confiabilidade do tempo de viagem no desenvolvimento do Planejamento de Transportes Regional. Uma avaliação de 20 Planos de Transporte nos Estados Unidos é realizada, e pode ser constatado que os mesmos não contemplavam adequadamente a confiabilidade do tempo de viagem na avaliação do congestionamento do tráfego.

O *buffer index* é calculado na base de suas médias anuais a partir de dados coletados em sensores de laços de indução, medidos a cada 5 minutos, o que permite uma visão do comportamento do tráfego durante todo o dia, conforme pode ser verificado na figura 3-8.

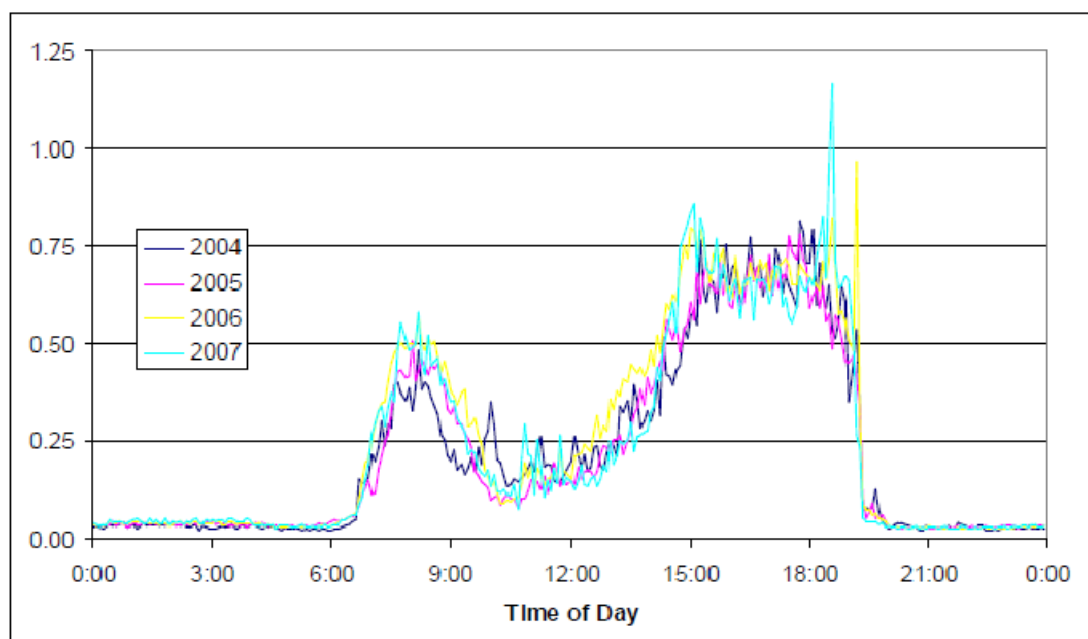


Figura 3-8: Resultados do *buffer index* de LYMAN(2007).

Nessa figura são apresentados os resultados de uma rodovia, e pode-se então observar a variação da confiabilidade de acordo com o horário, e nesse caso ainda se observa que nos anos de 2006 e 2007 têm picos bem mais acentuados do que os anos de 2004 e 2005.

Esses índices irão representar as condições da confiabilidade do tempo de viagem, e os condutores dos veículos e os responsáveis pelo planejamento de transportes processam essas informações para suas tomadas de decisão, valorando de forma relativa as condições de tempo de viagem e de confiabilidade do tempo de viagem.

As reações dos usuários das redes viárias irão ainda influenciar as decisões dos responsáveis pelo planejamento de transportes, na medida que esses esperam poder prever o comportamento do tráfego como um todo para estruturar seus modelos. Essas

reações podem ser analisadas por métodos diretos ou indiretos. Os métodos diretos referem-se a técnicas de preferência declarada ou preferência revelada, e os métodos indiretos envolvem inferir as reações dos usuários a partir de dados de fluxos de tráfego observados em rotas alternativas conectando pares de origem e destino.

3.3.5 O Usuário da Rede de Transportes e a Confiabilidade

BATES ET AL. (2001) apresenta uma visão geral da teoria que suporta a valoração da confiabilidade do tempo de viagem, e apresenta uma aplicação de preferência declarada em um estudo da valoração da confiabilidade em serviços de transporte ferroviário de passageiros.

A utilização de técnicas de preferência declarada propicia a obtenção de informações bastante detalhadas em entrevistas individuais com os usuários de uma rede de transportes, permitindo um grau de precisão bastante elevado para subsidiar o planejamento e análise do comportamento do tráfego com relação às variações da confiabilidade do tempo de viagem. Tendo em vista no entanto, que essas técnicas requerem uma grande quantidade de dados, a sua coleta, o seu tratamento e a sua coleta e a sua análise exigem muito tempo e têm custos elevados.

Os avanços na tecnologia de monitoramento do tráfego com a utilização de informações em tempo real a partir de laços de indução⁹, pode fornecer informações valiosas, na medida em que ao invés de entrevistar motoristas pelo método direto, é possível inferir as suas escolhas reais a partir das medições dessa tecnologia. LIU ET AL. (2004) se utilizam dessa abordagem no desenvolvimento de um modelo para estimar o valor do tempo (VOT), o valor da confiabilidade (VOR) e o valor da aversão ao risco (DORA), em uma estrada da Califórnia a Route 91 (SR91).

A monetarização se tornou possível em razão da oportunidade surgida pela opção que foi dada aos usuários daquela rodovia de viajarem gratuitamente utilizando a pistas regulares à direita ou viagens expressas, em pistas situadas no meio da rodovia. Com base nas decisões dos usuários de pagar para utilizar uma via sem congestionamento, LIU ET AL. (2004) analisaram os resultados das probabilidades de escolha entre as duas rotas paralelas. Os autores demonstram que nesse caso a

⁹ Sensores localizados no pavimento que monitoram a passagem de veículos e sua velocidade.

confiabilidade do tempo de viagem teve grande importância na tomada de decisão dos usuários.

Em sua modelagem os autores consideram que a escolha dos usuários com relação à rota irá refletir sua percepção com relação aos custos e benefícios associados a cada opção. Se esses custos e benefícios são incertos, a escolha será influenciada pela atitude dos usuários perante o risco. A aleatoriedade do tempo de viagem em cada rota como a medida do risco associado à sua escolha. A partir da distribuição dos tempos de viagem percebidos nas duas rotas, supõe-se que os usuários irão reagir de forma diferenciada quando consideram opções de rotas em que o seu tempo de viagem percebido tem componentes probabilísticos.

Na modelagem desse comportamento foi considerado que cada usuário tem uma percepção subjetiva da distribuição de probabilidades de cada rota. Foi considerada ainda a distribuição de probabilidades obtida na medição dos tempos de viagem a partir dos arcos de indução. A utilidade foi considerada como uma função do tempo de viagem, da variabilidade do tempo de viagem, do custo monetário e da atitude individual de cada usuário diante dessas três variáveis em cada momento. Na modelagem utilizada cada usuário se defronta entre P_{rs} rotas alternativas entre uma rampa de acesso de origem, r , e uma rampa de saída de destino, s . Nessas condições a “desutilidade” do usuário n viajar, começando no instante t , ao longo do caminho c que conecta a rampa de acesso r à rampa de saída s é:

$$U_{np}(t) = \beta'_n x_{np}(t) + \varepsilon_{np}$$

Onde x_{np} é o vetor das observações das variáveis, β_n é um vetor de coeficientes correspondentes que varia entre os usuários, porém não muda entre as alternativas ou o tempo, e ε o termo de erro.

Especificamente:

$$x_p(t) = [T_p(t), R_p(t), C_p(t)]$$

Onde $T_p(t)$ corresponde ao tempo de viagem, $R_p(t)$ a confiabilidade do tempo de viagem e $C_p(t)$ o custo monetário da viagem. Assim o valor do tempo de viagem (VOT), o valor da confiabilidade (VOR) e o valor da aversão ao risco foram definidos como:

$$VOT_n = \frac{\partial U_{np}(t)/\partial T_p(t)}{\partial U_{np}(t)/\partial C_p(t)} = \frac{\beta_n^T}{\beta_n^C}$$

$$VOR_n = \frac{\partial U_{np}(t)/\partial R_p(t)}{\partial U_{np}(t)/\partial C_p(t)} = \frac{\beta_n^R}{\beta_n^C}$$

$$DORA_n = \frac{\partial U_{np}(t)/\partial R_p(t)}{\partial U_{np}(t)/\partial T_p(t)} = \frac{\beta_n^R}{\beta_n^T}$$

Onde $\beta_n = [\beta_n^T, \beta_n^R, \beta_n^C]$ é o vetor de coeficientes que reflete as preferências individuais com relação ao tempo de viagem, a confiabilidade do tempo de viagem e ao custo monetário. Para tomar em conta as variações das preferências individuais, a sua heterogeneidade é considerada supondo-se que os coeficientes β_n se referem a variáveis aleatórias β . Supõe-se que esses coeficientes variem entre os usuários com base nas características da população com uma função densidade de probabilidade $f(\beta)$, que é uma função dos parâmetros Θ , que representam, por exemplo, a média e a covariância de β na população. Essa especificação, conhecida como mixed logit é idêntica ao modelo logit com exceção de que os β_n variam de acordo com os decisores ao invés de serem fixos. Dessa forma a probabilidade de que o usuário n irá escolher o caminho p sob as condições de β_n é dada por:

$$L_{np}(\beta_n; t) = \frac{e^{\beta_n' x_{np}(t)}}{\sum_{\forall j \in Prs} e^{\beta_n' x_{nj}(t)}}$$

A probabilidade não condicional é a integral de $L_{np}(\beta_n; t)$ sobre a distribuição de todos os valores possíveis de β_n ou seja:

$$P_{np}(t) = \int \frac{e^{\beta_n' x_{np}(t)}}{\sum_{\forall j \in Prs} e^{\beta_n' x_{nj}(t)}} \times f(\beta) \cdot d\beta$$

As probabilidades das escolhas podem ser estimadas utilizando-se a transformação integral com uma simulação pelo método de Monte Carlo. Supondo que os parâmetros de $f(\beta)$ são Θ , o estimador não viesado $\widetilde{P}_{np}$ para P_{np} pode ser obtido da seguinte forma:

- a) Selecionar valores experimentais para Θ ;
- b) Simular Q valores para β a partir de $f(\beta/\Theta)$;
- c) Calcular $L_{np}(\beta^q; t)$ para $q = 1, 2, 3, \dots, Q$;
- d) Calcular a probabilidade média simulada como:

$$\widetilde{P}_{np}(t) = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q L_{np}(\beta^q; t)$$

Em geral os valores de Θ são estimados a partir de técnicas de preferência declarada ou preferência revelada, os autores no entanto, como vimos, se valeram das informações de tráfego obtidas a partir dos laços de indução. Um trabalho adicional foi necessário, e para o qual os mesmos se valeram de algoritmos genéticos, para obter um conjunto de parâmetros que propiciassem a melhor aderência entre os resultados agregados do modelo de escolha das rotas e os dados das observações do volume de tráfego dependentes de tempo obtidos nos laços de indução¹⁰.

Dessa forma e de posse dos dados referentes à rodovia SR-91 LIU ET AL. (2004) aplicam o algoritmo genético para identificar os parâmetros e desenvolvem 2000 simulações de Monte Carlo para β , e calculam VOT, VOR e DORA de acordo com as expressões apresentadas.

Embora não seja possível fazer uma extensão direta desses resultados para o caso de transporte de cargas, uma vez que os dados se referem exclusivamente a veículos de passeio, o procedimento pode ser adaptado e a modelagem pode ser similar.

¹⁰ Tendo em vista os objetivos desta pesquisa, esses procedimentos não foram apresentados, no entanto os LIU ET AL. (2004) descrevem com detalhes esse procedimento.

LINT ET AL. (2008) fazem uma análise da natureza da escolha de rotas considerando a confiabilidade do tempo de viagem. No documento Nota Mobility (AVV,2004) que apresenta a política nacional de transporte para a Holanda, são estabelecidas algumas metas a serem atingidas no período 2005-2020 e que utilizam medidas probabilísticas da confiabilidade do tempo de viagem. Para trechos curtos (com menos de 50 km) ficou estabelecido que pelo menos 95% dos tempos de viagem em um determinado período não poderão exceder mais do que 10 minutos a mediana do tempo de viagem, enquanto que para rotas longas 95% dos tempos de viagem devem se situar em uma margem de até 20% acima da mediana do tempo de viagem.

LINT ET AL. (2008) testam então essas metas utilizando dados de 2002 para uma típica ligação considerada com trecho curto e em uma outra rodovia considerada como trecho longo. No trecho curto observam que durante os dias de semana a meta já não é atingida nos horários de pico, onde menos de 90% das viagens se situam em até 10 minutos da mediana. Nas quintas-feiras em especial, entre 16:00 e 18:00 h pouco mais de 80% dos tempos de viagem se encontram dentro da faixa estabelecida e somente aos sábados a meta é atingida.

Quanto ao trecho longo a situação é ainda pior, nem mesmo aos sábados a meta é atingida durante o pico da manhã, enquanto que nos dias de semana a confiabilidade do tempo de viagem cai para menos de 70% tanto no pico matutino quanto no vespertino. O que os autores buscaram enfatizar é que a natureza um tanto quanto arbitrária do estabelecimento dos indicadores de confiabilidade do tempo de viagem irá levar a diferentes conclusões quanto à qualidade da rede de transportes, qualquer que seja o objetivo. Se aqueles limites tivessem sido estabelecidos de forma um pouco mais conservadora, um quadro completamente diferente seria apresentado, com resultados que poderiam ser considerados excelentes. Outro ponto refere-se a que as distribuições do tempo de viagem podem não ser adequadamente representadas pelos valores médios da confiabilidade conforme o estabelecido nesse caso.

LINT ET AL. (2008) utilizam dados de tempos de viagem realizadas entre 6:00 h e 20:00 em 19,1 km da rodovia A20 entre o centro de Rotterdam e Gouda. Os tempos de viagem foram obtidos para partidas por minuto nesse intervalo de tempo, enquanto que o período TOD escolhido foi de 5 minutos.

Em seu trabalho de análise os autores verificaram que nas manhãs de quinta-feira entre 17:00 e 18:00 cerca de 350.000 viagens ocorreram na rodovia em estudo, e que cerca de 5% dessas viagens incorreram em um total de 7.200 horas de atraso, enquanto que cerca de 50% das viagens tiveram um atraso de cerca de 8.000 horas totais. A partir dessa experiência os autores argumentam que a distribuição dos tempos de viagem nesse caso é fortemente assintótica, e extremamente indesejável sob qualquer ponto de vista.

As conseqüências de atrasos muito acentuados podem ser muito mais graves, na medida em que os eventos de destino dessas viagens ou a elas relacionados de alguma forma podem se tornar inexecutíveis pela ausência das pessoas ou mercadorias em um limite de tempo tolerável. Os autores concluem que são fortes as evidências de que não apenas a variância do tempo de viagem deve ser utilizada na análise da confiabilidade do tempo de viagem, mas também a assimetria¹¹ de sua distribuição.

Na figura 3-9 pode-se observar uma representação esquemática da variação da distribuição do tempo de viagem ao longo do dia. Nas condições de fluxo livre (a) a distribuição do tempo de viagem é aproximadamente simétrica e o tempo de viagem e a sua confiabilidade pode ser considerada “boa”¹². Na formação do congestionamento (b) a mediana do tempo de viagem é crescente, mas a distribuição é fortemente assimétrica para a esquerda. Isso quer dizer que em alguns casos as condições de tráfego ainda são de fluxo livre, mas existe um número crescente de dias em que nesse particular TOD o congestionamento já ocorre, ocasionando tempos de viagens muito superiores à mediana.

¹¹ O coeficiente mais utilizado para avaliar a assimetria de um conjunto de dados consiste no terceiro momento centrado na média :

$$M_3 = \frac{N \times \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^3}{3 \times \sigma^3 \times (N-1) \times (N-2)}$$

Onde: N= número de observações, $\bar{X}$ = média amostral e σ = desvio-padrão da amostra

¹² De todo modo é uma consideração qualitativa.

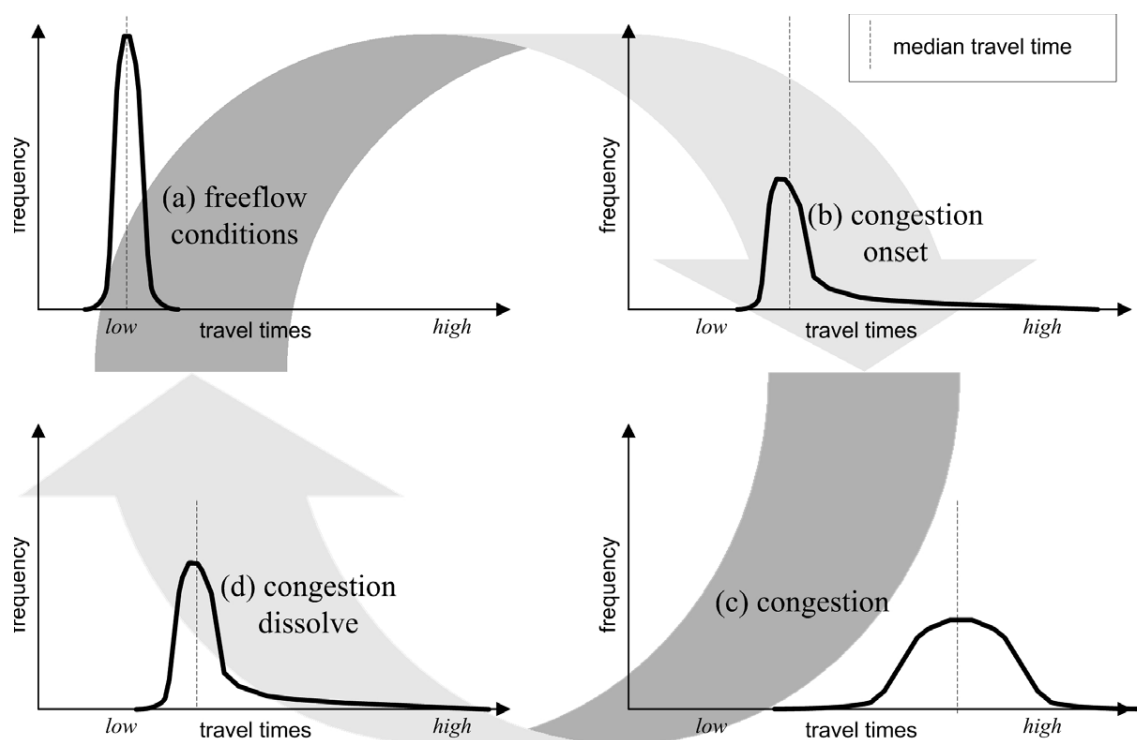


Figura 3-9: Variação da distribuição do tempo de viagem ao longo do dia (Fonte: LIN ET AL ,2008)

Com o tráfego já congestionado (c) a mediana do tempo de viagem é maior e a distribuição do tempo de viagem é mais espalhada, porém razoavelmente simétrica. Nesses períodos o congestionamento irá ocorrer em diferentes níveis de intensidade, trazendo uma faixa mais larga de possíveis tempos de viagem. Quando o congestionamento está se dispersando a mediana do tempo de viagem é decrescente, mas a distribuição é fortemente assimétrica para a esquerda novamente, e ainda ocorrem, embora decrescendo em frequência casos de forte congestionamento.

LINT ET AL. (2008) propõem duas métricas simples para a assimetria e para o achatamento (curtose¹³) da distribuição do tempo de viagem, baseadas em percentis que são suficientemente robustas e permitiram uma identificação adequada das quatro

¹³ O coeficiente de curtose mostra a dispersão de uma distribuição em relação a um padrão, geralmente a distribuição normal e é expresso como: $C = \frac{(X_i - \bar{X})^4}{(N-1)^4}$ onde N= número de observações e $\bar{X}$ = média amostral.

situações explicitadas. Para a assimetria os autores propuseram utilizar a relação entre a diferença do 90º e o 50º percentil e a diferença entre o 50º e o 10º percentil:

$$\lambda^{assim} = \frac{T90 - T50}{T50 - T10}$$

Para a curtose propõem a relação entre o 90º e o 10º percentil e a mediana, o 50º percentil:

$$\lambda^{var} = \frac{T90 - T10}{T50}$$

No caso em estudo a causa principal da variabilidade do tempo de viagem é o grau de congestionamento, ou o fluxo de tráfego na rodovia. Considerando no entanto, a existência de outras fontes de variabilidade do tempo de viagem, especialmente a degradação da infra-estrutura da rede viária, pode-se então inferir que da mesma forma na análise da confiabilidade ou de sua variação em consequência de mudanças no estado dessa infra-estrutura é recomendável que a assimetria da distribuição dos tempos de viagem seja analisada com cuidado.

Em RECKER et al. (2005) é desenvolvida uma metodologia para analisar a contribuição da confiabilidade do tempo de viagem na escolha de rotas, utilizando dados coletados em tempo real por meio de sensores de laços de indução do *California Advanced Transportation Management Systems* (ATMS), combinados com dados da rodovia estadual Route 91 em Orange County na Califórnia, para estimar um modelo mixed-logit que considera explicitamente as percepções e preferências dos condutores de veículos com relação ao risco e à incerteza. Foi utilizado o método de Monte Carlo para simular essas preferências e percepções.

3.3.6 A Confiabilidade e a Degradação da Rede Viária

A degradação da capacidade de uma rodovia ocasionada por incidentes ocasionais como obras, condições meteorológicas, volume de tráfego excessivo e outros diminui o seu desempenho e insere a incerteza. PARK et al. (2007) abordam um Continuous

Network Design Problem – CNDP com restrição de confiabilidade do tempo de viagem para considerar a capacidade dos links como variável aleatória, apresentando soluções quantitativas.

Nesta revisão teórica é importante analisar a modelagem e o procedimento adotados no tratamento da confiabilidade do tempo de viagem. No estudo PARK et al. (2007) adotam a definição dada por ASAKURA (1998) na qual a confiabilidade do tempo de viagem é considerada como a relação entre o tempo de viagem em um estado degradado da rodovia e o tempo de viagem em um estado não degradado da rodovia.

Sejam $t_w(\mathbf{u})$ e $t_w(\mathbf{u}_0)$ os tempos de viagem em um determinado par de origem e destino w em estado degradado e em estado não degradado, a confiabilidade do tempo de viagem para w é dada então pela expressão:

$$P\{t_w(\mathbf{u}) \leq \emptyset \cdot t_w(\mathbf{u}_0)\} = P\left\{\frac{t_w(\mathbf{u})}{t_w(\mathbf{u}_0)} \leq \emptyset\right\}$$

Onde $\mathbf{u}$ e $\mathbf{u}_0$ são os vetores da capacidade do link nos estados degradado e não degradado e $\emptyset$ é um parâmetro que determina um limite para o tempo de viagem e que pode ser interpretado como o nível de serviço que deve ser mantido mesmo em um estado degradado para um determinado link da rede de transporte.

Não é fácil estabelecer uma definição numérica para um estado não degradado, e PARK et al. (2007) considerando que em um estado não degradado o link é percorrido na velocidade de fluxo livre, utilizam então a seguinte definição para a confiabilidade do tempo de viagem :

$$TR_w(\theta) = P\{t_w(\mathbf{u}) \leq \theta \cdot t_w^f\} = P\{t_w(\mathbf{u}) \leq t_w^c\}$$

Onde t_w^f é o tempo de viagem na velocidade de fluxo livre no par de origem e destino w , e θ é um fator de congestionamento maior do que um, na medida em que

define um nível aceitável de congestionamento comparado com a situação de fluxo livre. $t_w^c = \theta \cdot t_w^f$ é definido então como o tempo de viagem crítico em w .

PARK et al. (2007) utilizam ainda a seguinte expressão para calcular a confiabilidade do tempo de viagem de toda a rede de transporte $TR_{system}(\theta)$, que corresponde à média ponderada da confiabilidade para cada par de origem e destino:

$$TR_{system}(\theta) = \sum_{w=1}^W TR_w(\theta) \cdot q_w / \sum_{w=1}^W q_w$$

Onde W é o número total de pares de origem e destino e q_w é o fluxo de tráfego no par w .

A confiabilidade do tempo de viagem sujeita às flutuações de capacidade dos diversos links, foi estimada com a utilização de uma simulação de Monte Carlo. Para obter uma distribuição dos tempos de viagem de acordo com as flutuações de capacidade, um conjunto de capacidades foi gerado estocasticamente e o tempo de viagem foi obtido resolvendo um problema de alocação. Com a repetição desse processo foi obtida uma função densidade de probabilidade para a distribuição do tempo de viagem entre origem e destino, possibilitando assim a estimativa do tempo de viagem.

Foi utilizado o método de Monte Carlo ainda para gerar um conjunto de dados de capacidade dos links, sendo adotada uma aproximação normal para essa distribuição.

$$\mathbf{C} \sim N(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\sigma}^2)$$

$$\mu_a = \beta_a C_a^{design}$$

$$\sigma_a = (1 - \beta_a) C_a^{design} / t_{gl, \alpha \sqrt{n}}$$

Onde $\mathbf{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_a, \dots\}$ é um vetor de capacidades como variáveis aleatórias, $\boldsymbol{\mu} = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_a, \dots\}$ é o vetor da capacidade média dos links e $\boldsymbol{\sigma} = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_a, \dots\}$ é o vetor do desvio padrão da capacidade dos links. μ_a é a capacidade média do link a ($\in A$) especificada como a multiplicação de β_a ($\in [0,1]$) e a capacidade planejada para o link a , C_a^{design} . σ_a é o desvio padrão da capacidade no link a , e $t_{gl, \alpha \sqrt{n}}$ é a estatística t quando o grau de liberdade é gl em um nível de significância α , A é o conjunto de links e n o tamanho da amostra gerada.

Seja então $f(t_w)$ a função densidade de probabilidade e $F_{t_w}(t_w^c)$ a função de distribuição acumulada do tempo de viagem em w , então quando o tempo de viagem crítico é t_w^c , a confiabilidade do tempo de viagem nesse caso é estimada por:

$$TR_w = P(t_w \leq t_w^c) = F_{t_w}(t_w^c) = \int_0^{t_w^c} f(t_w) dt_w$$

Para a obtenção de $f(t_w)$ e $F_{t_w}(t_w^c)$ repete-se então o mesmo procedimento de simulação de alocação de viagens com o vetor $\mathbf{C}$. As distribuições de frequência obtidas são testadas quanto a sua aderência a várias formas funcionais, segundo PARK et al. (2007), em geral as distribuições de Weibull ou Log-Normal são as que apresentam os melhores resultados nesses testes estatísticos.

Essa abordagem irá auxiliar a formulação de uma modelagem para a análise da influência da confiabilidade no transporte de cargas interurbano, e sugere que a modelagem da variabilidade da capacidade de uma rodovia também pode proporcionar indicações importantes, na medida em que está associada diretamente à confiabilidade do tempo de viagem.

A interdependência da confiabilidade do tempo de viagem e a da capacidade requer que seja analisada e tomada em conta a forma com a qual essas medidas irão variar com relação a níveis diferenciados de limites ou padrões de tempo de viagem e de

fluxo de tráfego em uma rede de transporte, e buscar a sua integração em um indicador de desempenho adequado (YANG et al., 2000).

Alguns estudos importantes sobre a confiabilidade da capacidade de uma rede de transporte têm sido desenvolvidos recentemente. CHEN et al. (2002) apresentam uma proposição de metodologia que combina a análise da confiabilidade com análise da incerteza, modelos de equilíbrio de redes, e uma análise de sensibilidade desse equilíbrio na alocação do fluxo de tráfego.

3.3.7 Conectividade e Vulnerabilidade

Um conceito a ser considerado adicionalmente é o da confiabilidade da conectividade, que é definido como a probabilidade que os nós de uma rede permaneçam conectados. A conectividade é uma variável binária, um determinado par de nós está conectado ou não, ou seja não é considerada a capacidade de um determinado arco. Esse tipo de análise de confiabilidade é adequado para situações de calamidades ou desastres naturais, como por exemplo terremotos, que geram interrupções severas no fluxo de tráfego.

Em uma extensão desse conceito, estudos recentes têm tratado da vulnerabilidade das redes de transporte, que é definida como uma medida das conseqüências da interrupção da conectividade em uma rede de transportes, independente da probabilidade dessa ocorrência ou da confiabilidade do tempo de viagem e da capacidade. A análise de vulnerabilidade considera os impactos sócio-econômicos da degradação de uma rede de transporte, com base nas alterações dos níveis de acessibilidade ocasionados por essa degradação.

TAYLOR et al. (2006) desenvolvem uma metodologia para a análise da vulnerabilidade considerada em termos de um processo de planejamento no qual o desempenho da rede de transportes é testado com relação a determinados critérios de performance.

Nesse caso a vulnerabilidade é tratada utilizando o conceito de acessibilidade, a facilidade com que indivíduos de uma localização específica têm de participar de atividades que ocorrem em uma outra localização, utilizando um sistema de transporte

para ter acesso a esse outro local (TAYLOR e D'ESTE,2004 apud TAYLOR et al, 2006), e assim a definição utilizada para vulnerabilidade é:

- Um nó de uma rede de transporte é considerado *vulnerável* quando ocorre uma perda de conectividade, ou uma substancial degradação dos links, diminui de forma significativa a acessibilidade ao nó, medida de acordo com um indicador padronizado de acessibilidade;
- Um link de uma rede é considerado *crítico* se a perda de conexão do mesmo, ou sua substancial degradação, diminui de forma significativa a acessibilidade da rede ou de um conjunto em particular de nós, medida de acordo com um indicador padronizado de acessibilidade.

Foi desenvolvida uma modelagem básica com a utilização de custos generalizados para permitir uma medida da vulnerabilidade em termos da variação dos custos generalizados de viagem entre duas regiões, no caso de interrupção da conectividade. Os custos generalizados foram utilizados como uma medida da “desutilidade” e da dificuldade envolvida para uma viagem entre essas duas regiões. Seja v_{ijrs} a variação no custo generalizado de realizar uma viagem entre o nó i e o nó j se o arco e_{rs} , o link entre i e j . Então a perda de acessibilidade é dada por $d_{ij}v_{ij}$ onde d_{ij} é a demanda por movimentos. Dessa forma a perda total decorrente é dada por:

$$V_{rs} = \sum_i \sum_j d_{ij} v_{ijrs}$$

O índice de acessibilidade integral de Hansen é dado por:

$$A_i = \sum_j B_j f(c_{ij})$$

Onde B_j é a atratividade da região j , e de forma normalizada A_i se torna:

$$A_i = \frac{\sum_j B_j f(c_{ij})}{\sum_j B_j}$$

Essa forma foi então adotada por TAYLOR et al. (2006) e esse índice de Hansen tem sido utilizado na avaliação da variação da acessibilidade entre as principais cidades da Austrália em função da degradação de sua rede de transportes.

A função de impedância utilizada $f(c_{ij})$ representa o grau de separação entre as regiões e nesse caso foi considerada como o inverso da distância x_{ij} entre as regiões:

$$f(c_{ij}) = \frac{1}{x_{ij}}$$

Como uma aproximação para os fluxos entre origem e destino um fator de ponderação foi desenvolvido para cada par de origem e destino, com base em um modelo gravitacional simples de interação entre as duas cidades, assim a ponderação w_{ij} para as viagens entre i e j é dada por:

$$w_{ij} = \frac{g_{ij}}{\sum_{ij} g_{ij}}$$

Onde:

$$g_{ij} = \frac{B_i \cdot B_j}{x_{ij}^2}$$

Onde B_i é a população da cidade i . A abordagem consiste então em encontrar os caminhos mínimos pelo critério do tempo de viagem e a seguir simular a interrupção da conexão nesses links, e calcular as variações Δt_{ij}^e no tempo de viagem entre os pares de origem e destino. Somando as variações de todos os pares de origem e destino e utilizando as ponderações w_{ij} o acréscimo de tempo de viagem ponderado para toda a rede de transporte é calculado pela expressão:

$$\Delta t(e) = \sum_{ij} w_{ij} \Delta t_{ij}^e$$

O procedimento utiliza um modelo gravitacional para proporcionar uma ponderação que permite uma avaliação das conseqüências da variação da conectividade por link. Uma extensão desse artifício pode ser feita, se for utilizado um modelo gravitacional para comparar a função de utilidade considerando a variação da confiabilidade, resta então modelar os seus coeficientes. Essa abordagem não foi encontrada diretamente na literatura pesquisada, mas o trabalho de TAYLOR et al. (2006) dá suporte para essa linha de ação.

Pode-se fazer uma abordagem dessa variação se ao invés de ser considerada a interrupção da conectividade de forma instantânea, se considerar uma taxa de decréscimo da capacidade de fluxo, como modelado em DU e NICHOLSON (1997):

$$y_k(\mathbf{x}) = \frac{f_k(\mathbf{x}_0) - f_k(\mathbf{x})}{f_k(\mathbf{x}_0)} \quad k \in \mathbf{K}$$

Onde $f_k(\mathbf{x})$ e $f_k(\mathbf{x}_0)$ são os fluxos de tráfego no k ésimo sub-sistema de origem e destino para os componentes do vetor de estado de degradação $\mathbf{x}$ e $\mathbf{x}_0$ respectivamente. Essa relação pode variar de 0, não há degradação e o fluxo de tráfego pode ser considerado como fluxo livre, até 1 quando o sistema estará tão degradado que o seu fluxo será igual a zero (a conectividade estará interrompida).

3.4 A Distribuição do Tempo de Viagem

A análise da confiabilidade do tempo de viagem requer como informação básica os dados referentes às distribuições de probabilidades do tempo de viagem. A partir de sua distribuição é que podem ser estimados os valores dos indicadores de confiabilidade do tempo de viagem. A obtenção desses dados não é uma tarefa simples, e em geral envolve custos razoáveis.

Nos países em que existe uma maior utilização de ITS o trabalho pode ser um pouco facilitado, como pode ser visto em UNO et al. (2004), LIU et al. (2004) e LINT et al. (2008), no entanto quando essa tecnologia não está disponível, os analistas têm dificuldades em obter essas informações, como é o caso desta pesquisa. Dessa forma é necessário maximizar os resultados que podem ser extraídos a partir das fontes de dados disponíveis, e buscar poupar esforços na coleta e no tratamento de dados e informações.

HOLLANDER e LIU (2008) fazem uma análise das perspectivas do desenvolvimentos de modelos que possam realizar micro-simulações do tráfego para permitir inferências sobre as distribuições de probabilidades do tempo de viagem em situações hipotéticas e desenvolvem uma análise dessas distribuições reais.

A distribuição do tempo de viagem pode ser vista sob diferentes perspectivas. Entre veículos diferentes que fazem as mesmas viagens, entre diferentes horários dos mesmos dias, entre viagens semelhantes porém em dias diferentes e outras combinações. No trabalho de HOLLANDER e LIU (2008) o interesse se dá pelas variações aleatórias entre as viagens realizadas ao longo de dias diferentes, e não pelas variações de comportamento dos condutores dos veículos ou de eventos inesperados.

No nosso caso o interesse é semelhante, e se dá pela variação ocasionada por diferentes condições da rede viária, seja pelas condições do tráfego, seja pela frequência com que as condições meteorológicas interferem com a operação ou seja pelas próprias características da infra-estrutura e suas condições de conservação e manutenção.

No seu estudo HOLLANDER e LIU (2008) avaliam se as distribuições dos tempos de viagem obtidas por intermédio de repetidas simulações podem replicar as distribuições reais, então iremos verificar quais são os parâmetros, as premissas consideradas e os procedimentos adotados nessa avaliação, de forma que seja possível uma validação das distribuições de probabilidade do tempo de viagem que serão utilizadas, como representativas dentro dos objetivos considerados.

Na calibragem dos modelos são adotados procedimentos em que se busca minimizar a diferença entre as distribuições simuladas e aquelas obtidas na vida real. Os dados de entrada se referem então a medidas de tempos de viagem observados e tempos de viagem simulados. Os dados foram classificados para L locais, P períodos de tempo (horários) e N dias diferentes. Para determinar N os autores apresentam um

procedimento, porém para L e P argumentam que não foi possível o seu estabelecimento de forma analítica e que foi utilizada a regra geral, de que quanto maior a amostra, melhores os resultados.

Os autores utilizaram dados reais de tempos de viagem por ônibus de uma seção de uma rede viária urbana, localizada na área central da cidade de York na Inglaterra. Foi analisada a variabilidade relativa ao comportamento diário do tempo de viagem, assim a amostra a ser obtida deveria ser suficientemente grande em termos do número de dias.

Para estimar então o tamanho da amostra com relação ao número de dias necessários, foram adotadas duas premissas, a primeira de que a distribuição dos tempos de viagem é log-normal, e a segunda de que é suficiente nesse caso analisar as propriedades estatísticas do desvio-padrão do tempo de viagem.

Com relação à primeira premissa deve-se observar que outras distribuições também têm sido encontradas em estudos relevantes sobre o tempo de viagem, como a distribuição normal, a distribuição exponencial e a distribuição gama.

Se o tempo de viagem tem uma distribuição log-normal então o seu logaritmo natural é normalmente distribuído, e variância dos logaritmos segue uma distribuição qui-quadrado. Com base nessas premissas HOLANDER e LIU(2008) determinam o tamanho da amostra impondo restrições ao tamanho do intervalo de confiança da distribuição qui-quadrado da variância:

$$\sqrt{\frac{(n-1).s^2}{\chi^2_{1-\alpha/2}}} < \sigma < \sqrt{\frac{(n-1).s^2}{\chi^2_{\alpha/2}}}$$

Onde σ é o desvio-padrão real, s é o desvio-padrão da amostra, n é o tamanho da amostra, α é o nível de confiança desejado, χ^2 é o valor da distribuição qui-quadrado para $n-1$ graus de liberdade. Para garantir um determinado nível de significância da relação entre o desvio-padrão real e o estimado determina-se:

$$\sqrt{\frac{(n-1)}{\chi^2_{1-\alpha/2}}} < \frac{\sigma}{s} < \sqrt{\frac{(n-1)}{\chi^2_{\alpha/2}}}$$

A partir da variação do tamanho da amostra verificam-se os ganhos em termos do tamanho do intervalo de confiança, e no caso em estudo os autores chegaram a que a partir de um tamanho de 40 dias os ganhos deixavam de ser substanciais. Importante observar que neste caso não eram esperadas, e nem era o objetivo, avaliar variações ao longo do tempo, mas apenas a validade das distribuições simuladas.

Com relação à pesquisa deve-se considerar um tamanho de amostra que possa representar a variação da confiabilidade ao longo do tempo, ou seja a própria variação da variância da distribuição e ainda se essa distribuição permanece a mesma, assim a mesma deve ser verificada utilizando-se por exemplo um teste não paramétrico como o de Kolmogorov-Smirnov.

3.5 Consolidação do Referencial Teórico

A partir dos conceitos teóricos e das ferramentas de análise utilizadas na literatura pesquisada é possível estabelecer uma orientação teórica e conceitual para o desenvolvimento de um modelo de análise da confiabilidade do tempo de viagem com relação à sua influência nas funções de impedância, para aplicação no transporte de cargas.

Esse modelo deverá possibilitar a comparação entre os trechos ou rodovias de interesse a partir de valores do tempo de viagem, e alguma medida de sua confiabilidade. Dos seus resultados deve ser realizado um procedimento que permita calibrar a função de impedância dos modelos gravitacionais, com relação ao tempo de viagem, de forma a incorporar os efeitos da sua variabilidade.

O ponto de partida para o trabalho pode ser a modelagem de vulnerabilidade de TAYLOR et al (2006), que busca comparar variações hipotéticas na conectividade, adaptado para variações na confiabilidade do tempo de viagem. Essa adaptação conforme sugerido poderá observar a gradação encontrada na modelagem de DU e NICHOLSON (1997).

A abordagem utilizada em BATES et al. (2001) e em BATLEY(2007) pode ser utilizada para modelar a variação da inclinação da função de utilidade, de forma a tratar adequadamente as viagens com atraso. Tendo em vista que a taxa de variação da função de utilidade não deve ser considerada como constante em relação ao tempo de viagem esperado, a modelagem deve então tomar em conta essa forma e o tempo de viagem

deve ser ponderado pela utilidade relativa às demais alternativas ou objetos de comparação, de acordo com suas distribuições de probabilidades.

Para obter essa ponderação é proposta a utilização de um modelo gravitacional de alocação ou distribuição de viagens, a partir de uma origem virtual, e o cálculo das proporções de viagens para as alternativas ou objetos de análise que considere as suas distribuições de probabilidades gerando uma distribuição de probabilidades própria para essa alocação.

Caso não possível formular analiticamente essa distribuição, um procedimento de simulação pelo método de Monte Carlo pode ser utilizado para gerar uma estimativa, procedimento esse que tem sido bastante utilizado em casos semelhantes. Finalmente os resultados podem ser confrontados com indicadores discricionários como o *buffer index* e outros encontrados na literatura.

4. ESTRUTURA METODOLÓGICA

4.1 Introdução

Para analisar a influência da confiabilidade do tempo de viagem nas funções de impedância é necessário o desenvolvimento de um modelo que permita a mensuração da variação da impedância relativa mediante a variação do nível de confiabilidade entre vias de transporte diferentes, ou entre a mesma via de transporte em condições técnicas e operacionais diferentes, de forma a que seja possível observar variações na confiabilidade e seu efeito na função de impedância considerada.

O modelo deve representar de alguma forma como a variação nas condições de confiabilidade do tempo de viagem influi na variação da propensão a que uma viagem de transporte de cargas seja realizada em uma via de transporte que conecta um determinado par de origem e destino. Obtida essa relação o modelo de análise deve então permitir o desenvolvimento de uma inferência com relação às taxas de variação da impedância relativa a partir de variáveis representativas da confiabilidade do tempo de viagem. Essas taxas de variação irão possibilitar uma ponderação do tempo de viagem, e por consequência da função de impedância, para que sejam considerados os efeitos da confiabilidade resultante da variabilidade do tempo de viagem.

4.2 Modelo de Análise Proposto

Para realizar a comparação desejada o modelo deve medir a impedância à realização de viagens de transporte de cargas em situações diferentes no que se refere à confiabilidade do tempo de viagem. Fazendo uma adaptação do trabalho de TAYLOR et al. (2006) e com esse intuito será utilizado um modelo gravitacional tradicional.

Com o objetivo de possibilitar as mensurações desejadas com relação à influência da confiabilidade na impedância relativa algumas suposições iniciais são necessárias à modelagem. Deve-se supor que n viagens são produzidas a partir de uma origem fictícia para n regiões distintas, ligadas por vias com diferentes características. Todas as regiões têm a mesma atração de viagens, e igual a 1 viagem. Essa condição é conveniente para “forçar” a que a cada região corresponda 1 viagem, se todas tiverem o mesmo valor para a função de impedância. Dessa maneira não importa quantas rodovias estejam sendo comparadas, o índice obtido irá a mesma ordem de grandeza, 1 viagem.

$$V_{ij} = \frac{P_i \times A_j \times F_{ij} \times K_{ij}}{\sum_{j=1}^n (A_j \times F_{ij} \times K_{ij})}$$

Onde:

V_{ij} = número de viagens produzidas em i e atraídas por j

P_i = total de viagens produzidas em i

A_j = total de viagens atraídas por j

F_{ij} = expressão de calibração para o par de zonas $i j$

K_{ij} = fator de ajustamento sócio-econômico para o par de zonas $i j$

A expressão de calibração F_{ij} é denominada fator de fricção ou impedância ao deslocamento, e indica a influência que o tempo exerce sobre a realização das viagens. É determinado empiricamente por intermédio de um processo de calibração do modelo procurando expressar a influência do tempo de viagem. Esse fator deve ser substituído por uma função do tempo de viagem do tipo $1/t^a$. Nos modelos clássicos iniciais a varia de acordo com a especificação adotada para a função distância.

A utilização do modelo deverá permitir que se observe o número de viagens alocado a uma determinada zona sem considerar a confiabilidade do tempo de viagem e o número de viagens considerando a variação de F_{ij} devida aos efeitos da confiabilidade do tempo de viagem, bem como às variações desta última.

O modelo gravitacional é utilizado usualmente considerando de forma determinística o tempo de viagem esperado, representado por médias amostrais, em cada par de origem e destino ij de forma a que todo atraso é “compensado” por uma viagem adiantada. O modelo de análise adotado considera que não existe essa compensação, assim os atrasos devem corresponder a viagens que excedam o limite de

confiabilidade e que necessitam de representação adequada com relação aos seus efeitos.

Os tempos de viagem entre os pares de origem e destino devem ser considerados no modelo como variáveis aleatórias, assim como a própria confiabilidade também é uma variável aleatória, em que os parâmetros de suas distribuições de probabilidades são desconhecidos. O modelo deverá então indicar o valor esperado do número de viagens a ser alocado entre os diversos pares de origem e destino considerando a distribuição de probabilidades dessa alocação de viagens.

Tendo em vista que a distribuição de probabilidades real do número de viagens a ser alocado a cada região é desconhecida e que a sua obtenção por meio de transformações matemáticas diretas é muito complexa, pode-se obter uma estimativa de sua distribuição de probabilidades utilizando-se sua frequência relativa a partir de um modelo de simulação pelo Método de Monte Carlo baseado em um número de observações suficientemente grande.

Para tanto é necessário gerar uma amostra aleatória de V_{ij} simulando os valores do tempo de viagem e da confiabilidade do tempo de viagem a partir de suas distribuições de probabilidades. Tendo em vista no entanto que essas distribuições são desconhecidas é necessária obter estimativas de várias situações diferentes, para que seja possível observar as variações do nível de serviço revelado pela confiabilidade do tempo de viagem. O valor do número de viagens alocado a cada região, ou rota, será a sua média amostral obtida com a utilização da técnica de simulação.

Tendo em vista a modelagem proposta não serão consideradas outras causas de atração de viagens que a utilidade ou *desutilidade* do tempo de viagem, dessa forma podemos assumir que os fatores de ajustamento K_{ij} sejam iguais a 1. Como consideramos por construção que a atração de cada região A_j também é igual a 1 viagem e que a produção de viagens P_i é igual a n temos então como expressão para o número de viagens para a região j :

$$V_j = \frac{n \times F_j}{\sum_{j=1}^n (F_j)}$$

Tendo em vista que F_j é função da variável aleatória t_{vj} , o tempo de viagem para a região j , e que para cada j corresponderá uma distribuição de probabilidades própria, a função V_j é uma função de variáveis aleatórias, e tem sua própria função densidade de probabilidades $f(F_j)$. Seja $\mathbf{t}$ o vetor dos tempos de viagem t_{vj} para cada região j , então a probabilidade da alocação de V_j viagens na região j é dada por:

$$L_j(V_j; \mathbf{t}) = \frac{F_j}{\sum_{j=1}^n (F_j)}$$

A probabilidade não condicional é a integral de L_j sobre todos os valores possíveis de V_j :

$$P(V_j) = \int \frac{F_j}{\sum_j F_j} \times f(V_j) \cdot dV_j$$

Supondo que os parâmetros de $f(V_j)$ são Θ , o estimador não viesado $\tilde{P}_j$ para P_j pode ser obtido da seguinte forma:

- e) Selecionar valores experimentais para Θ ;
- f) Simular Q valores para V_j a partir de $f(V_j/\Theta)$;
- g) Calcular $L_j(V_j^q; \mathbf{t})$ para $q = 1, 2, 3, \dots, Q$;
- h) Calcular a probabilidade média simulada como:

$$\tilde{P}_j(t) = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q L_j(V_j^q; t)$$

O número de viagens esperado para o destino j é obtido então como:

$$V_j = \frac{n}{Q} \sum_{q=1}^Q L_j(V_j^q; t)$$

Antes de chegar a esse cálculo no entanto, é necessário modelar adequadamente os efeitos da confiabilidade do tempo de viagem no que diz respeito às conseqüências quando o tempo de viagem exceder esse limite, bem como estimar a própria distribuição de probabilidades desse limite, ou realizar alguma inferência sobre ela.

A amostra então tem que ser suficientemente grande para que as medidas de confiabilidade sejam significativas, uma vez que necessariamente referem-se a períodos de tempo razoáveis. O que se considera como razoável neste caso é que calcular a confiabilidade do tempo de viagem em um dia é bem menos significativo do que calcular a confiabilidade do tempo de viagem em um período de um mês ou de um ano. Um período mais longo proporcionará a representação de eventos sazonais e a influência exercida pela frequência com que ocorrem eventos tais como acidentes, chuvas muito intensas, tráfego de férias ou de feriados prolongados, escoamento sazonal de safras e outras situações semelhantes.

4.3 Dados de Entrada do Modelo

O modelo deve ter como entrada dados de tempos de viagem agrupados em amostras que representem as n ligações entre a origem e os destinos j . Embora o modelo possa ser utilizado considerando variações nos modos de transporte utilizados, neste caso está restrito ao transporte rodoviário. A modelagem compara amostras de

observações de tempo de viagem, independente de serem de uma mesma rodovia, uma vez que as condições de atração de viagens não terão efeito, pois o que se busca é medir as variações nas funções de impedância.

A utilização de amostras de uma rodovia real tem a vantagem de proporcionar maior sensibilidade sobre as variações que ocorrem de fato nas condições das viagens de transporte de cargas, embora a obtenção desses dados seja de fato uma tarefa muito difícil. Grande parte dos trabalhos sobre confiabilidade em redes de transporte se vale de dados simulados a partir de distribuições de probabilidades hipotéticas obtidas a partir de inferências sobre as distribuições de probabilidades reais dos tempos de viagem justamente pela dificuldade de obtenção dessas informações com a qualidade necessária.

Esta pesquisa pode ser delineada como um experimento com a obtenção de medidas do tempo de viagem mediante a utilização de um veículo único repetindo a mesma viagem como reprodução de um experimento controlado, de forma a que apenas as condições referentes ao objeto em estudo, a rodovia, se alterassem, sendo mantidas as mesmas condições do instrumento de medida, o veículo e seu condutor.

Os custos de um experimento de tal monta bem como o tempo necessário para a coleta de dados que possam atender aos objetivos do modelo fogem do alcance e não têm como ser suportados neste projeto de pesquisa. Para contornar esse problema optou-se pela utilização de dados de tempo de viagem de transporte de passageiros por ônibus interurbanos.

As condições com as quais essas viagens ocorrem guardam muita proximidade com a obtenção experimental pretendida embora a rigor se constitua em uma pesquisa *Ex-post facto*. Se os dados forem obtidos em uma mesma rota regular, por um período suficientemente grande, pode-se considerar que quase todos os requisitos de uma pesquisa experimental são atendidos, a exceção se dá na manipulação das características. O período levantado e a quantidade de viagens diárias, entretanto, podem suprir adequadamente a abrangência dos valores possíveis e de interesse para a pesquisa da variável tempo de viagem. As vantagens da utilização de dados de tempo de viagem por ônibus são comprovadas na literatura pesquisada, mesmo onde dados de ITS estão disponíveis como em UNO et al. (2004) e HOLLANDER e LIU (2008)

Dessa forma e para melhor observar os objetivos desta pesquisa optou-se pela utilização de medições de tempos de viagem em uma ligação rodoviária interurbana em uma linha de transporte por ônibus, em substituição a um veículo piloto de carga. O ônibus nesse caso é apenas o instrumento de medição de tempos de viagem.

Importante que o trecho rodoviário possa ser considerada com condições típicas no Brasil no que diz respeito às suas características físicas e operacionais, e por um período bastante longo, uma vez que serão necessárias observações de pelo menos um ano para que as amostras possam ser representativas do comportamento do tempo de viagem em períodos mensais considerando as possibilidades de eliminação de observações por problemas usuais na coleta desse tipo de dados e informações. A partir dessas amostras mensais são feitas as estimativas das distribuições de probabilidades utilizando-se suas as distribuições de frequência de suas observações.

4.4 Modelagem da Confiabilidade do Tempo de Viagem

A confiabilidade do tempo de viagem CT em uma determinada rota é definida para os fins desta pesquisa como a probabilidade de que a mesma seja percorrida com sucesso com um tempo de viagem t_v menor ou igual a um determinado limite de tempo t_{lat} , a partir do qual o tempo de viagem irá caracterizar um atraso:

$$CT = P\{ t_v \leq t_{lat} \}$$

Para o transporte de carga interurbano o fator crítico é esse limite superior, o limite referente à probabilidade de que a viagem ocorra com um determinado atraso relativo ao tempo de viagem esperado, no entanto a confiabilidade também pode ser entendida como a probabilidade de que o tempo de viagem esteja inserido em um determinado intervalo de tempo.

Em muitos casos o limite inferior também pode ser considerado relevante, como no problema das entregas em áreas urbanas (Taniguchi et al., 2000), em que a chegada muito antecipada pode ocasionar sérias dificuldades à operação devido por exemplo a restrições de tráfego de veículos de carga na legislação, ou mesmo pela falta de capacidade ou condições de recebimento da carga antes do horário previsto. Neste

estudo, no entanto, a análise será restrita aos atrasos devidos às variações de confiabilidade do trajeto interurbano que é o objetivo da pesquisa.

O modelo de análise deve então considerar o estabelecimento desse limite de tempo admissível para a realização de uma viagem. Tendo em vista os objetivos do trabalho, a verificação das variações na impedância à realização de uma viagem de transporte de cargas em função da variação da confiabilidade do tempo de viagem, podem ser consideradas apenas as viagens para embarques em que pelo menos o tempo esperado no trajeto seja viável. Assim não faz sentido introduzir no modelo viagens potenciais cujos requisitos de viabilidade tenham como consequência tempos de viagem muito inferiores aos possíveis de serem realizados pelos veículos e meios disponíveis. Se o embarque de uma determinada mercadoria não admite um tempo de viagem superior a 5 horas, por exemplo, não é razoável que o modelo considere a mesma como potencial em uma rota cujo tempo de viagem dentro de condições normais de operação seja de 10 horas.

O limite de confiabilidade deve então ser restrito a valores que possam ser considerados razoáveis para uma determinada rota. Uma forma encontrada na literatura para estabelecer esse limite é calcular o tempo de viagem em um estado não degradado da via de transporte e considerar um fator de congestionamento ou, por extensão, de atraso que seja considerado razoável comparado com o fluxo livre (PARK et al., 2007). A definição numérica de estado não degradado é muito difícil de ser estabelecida de forma objetiva e uma maneira de se contornar essa questão é adotar o tempo de viagem calculado a velocidade de fluxo livre.

O estabelecimento do limite do intervalo de tempo de confiabilidade do tempo de viagem depende de fatores próprios do embarque, tais como urgência, custo do tempo, restrições operacionais para recebimento, perecibilidade da carga e outros conforme exposto nos capítulos anteriores. Esse limite deve então ser considerado dentro de um intervalo de tempos de viagem que seja exequível dentro da tecnologia dos veículos de transporte de carga que são utilizados assim como também não é razoável supor por exemplo que o trajeto possa ser percorrido a velocidades médias superiores a 100 km/h que é superior ao limite legal de 80 km/h em rodovias de pistas simples, e mesmo essa velocidade possivelmente não possa ser alcançada em uma viagem típica.

O cálculo de um limite utilizando a velocidade de fluxo livre e arbitramento de um fator de congestionamento conforme proposto por PARK et al.. (2007) tem o inconveniente de inserir um fator subjetivo no modelo. Uma alternativa é estimar uma distribuição de probabilidades para esse limite a partir da própria amostra obtida, se no conjunto de observações se puder extrair uma sub-amostra de um período em que haja regularidade e que a ligação não possa ser considerada degradada. O limite inferior exeqüível para o tempo de viagem esperado t_{lie} pode ser estimado como o próprio valor esperado dessa sub-amostra.

Por outro lado existe também um limite superior de exeqüibilidade “negativa”, pois o tempo de viagem não pode ser considerado “ilimitado” para efeitos práticos. Mesmo nas piores condições de degradação também haverá um limite de exeqüibilidade razoável superior t_{lse} para o tempo de viagem, pode-se considerar que acima desse limite não há conectividade, seja do ponto de vista físico da infra-estrutura, seja do ponto de vista de qualquer resquício de uma operação comercial regular, que é o objeto da pesquisa. De todo modo as expectativas têm necessariamente que estar restritas aos valores de tempo de viagem exeqüíveis, considerando a tecnologia contemporânea e as restrições legais de velocidade.

Embora o tratamento dado neste caso possa ser considerado discricionário, pela arbitrariedade da escolha dos limites, os mesmos podem ser objeto de um tratamento analítico e formal que irá chegar aos valores extremos desse intervalo, de acordo com a tecnologia e as restrições legais. Dessa forma o procedimento não fica invalidado, e de toda forma estamos considerando os valores como estimativas e não como seleção arbitrária.

O intervalo desse limite estará então entre o valor esperado μ ou t_{lie} na f.d.p. do tempo de viagem t_v que corresponde a uma expectativa determinística $P(t_v \leq t_{lie}) = 0$ até um embarcador que admita o valor máximo possível sem que a viagem seja considerada atrasada t_{lse} nessa f.d.p. em que temos $P(t_v \leq t_{lse}) = 1$, O limite de atraso t_{lse} deverá então se situar dentro desse intervalo:

$$t_{lie} \leq t_{lat} \leq t_{lse}$$

As expectativas dos embarcadores ou transportadores têm sua própria distribuição de probabilidades que deve ser calculada ou estimada para a modelagem.

4.5 Os Efeitos da Confiabilidade do Tempo de Viagem

Em uma determinada rota o embarcador ou o transportador tem um intervalo de tempo de viagem que delimita a viabilidade dessa operação de transporte de cargas, resultante das características próprias do embarque. Esse intervalo irá impor um limite de confiabilidade do tempo de viagem que é considerado aceitável como vimos anteriormente, mas é necessário que o modelo contemple a decisão que será tomada quando o tempo de viagem exceder esse limite.

É esperado que a função de impedância especificada sofra uma mudança na sua inclinação no ponto em que o tempo de viagem é igual ao limite superior ou ao limite inferior desse intervalo conforme a modelagem encontrada em BATES et al.(2001) e em BATLEY(2007). A partir desses pontos o embarcador ou o transportador pode simplesmente decidir não realizar a viagem, uma modelagem muito encontrada na literatura quando o objeto é o estudo de conectividade de redes de transporte, ou pode ser atribuída uma penalização (ANDO e TANIGUCHI, 2006) que irá corresponder a um acréscimo ao custo da viagem modelado pela sua função de impedância. Esse acréscimo poderá variar em um intervalo $(0, +\infty)$ de acordo com as especificações das funções de penalização de cada embarque.

A não realização da viagem corresponde a uma descontinuidade na função de impedância e em que é atribuída uma probabilidade igual a zero de que seja realizada uma viagem para o destino j . Essa condição irá implicar em que a função de impedância tenderá a infinito nesse ponto, ou nessa iteração da simulação, o que pode trazer dificuldades para a modelagem no cálculo das médias amostrais da simulação. Se observação qualquer tende a infinito, isso implica que a média irá tender para infinito.

Se for utilizada a penalização temos o inconveniente de que é necessário descobrir qual é essa função de penalização real, o que não é uma tarefa trivial, considerando que a cada embarcador ou transportador poderá corresponder uma especificação diferente para essa função.

Para contornar esse problema uma alternativa é relaxar essa condição considerando que nesse ponto de ruptura do limite de confiabilidade aceitável, a impedância considerada pelo embarcador ou pelo transportador será um valor bastante grande, e é razoável supor que esse valor possa ser obtido utilizando-se o maior valor factível encontrado na amostra. Essa simplificação corresponde a que a partir desse limite a impedância assume o maior valor relativo possível, alocando em uma rota que tenha esse tempo de viagem a menor fração possível das viagens produzidas, dentro dos valores de tempo de viagem encontrados na realidade. Embora seja uma limitação aos resultados do modelo, pode-se considerar que seja uma estimativa razoável da função de penalização e não traz o inconveniente de que a função de impedância tenda para $+\infty$ nesse ponto.

Uma outra alternativa possível é considerar que no ponto de limite superior de exequibilidade do tempo de viagem t_{lse} , a propensão a realizar a viagem é zero e conseqüentemente o número de viagens alocado nesse caso também é igual a zero. Por outro lado até o ponto a partir do qual a viagem começa a ser considerada atrasada t_{lat} , a proporção de viagens P_j alocadas é calculada pela expressão:

$$P_j = \frac{F(t_{lat})}{\sum_{j=1}^n (F_j)}$$

Assim em um ponto intermediário a proporção de viagens a pode ser aproximada por uma interpolação entre esses dois pontos, o que corresponde a considerar uma mudança na inclinação da função de impedância, conforme encontrado em BATES et al.(2001) e em BATLEY(2007). Dessa forma teremos a proporção P'_j :

$$P'_j = \frac{F(t_{lat})}{\sum_{j=1}^n (F_j)} \times \frac{(t_{lse} - t_v)}{(t_{lse} - t_{lat})}$$

Na figura apresenta-se uma visão esquemática da variação da função de utilidade.

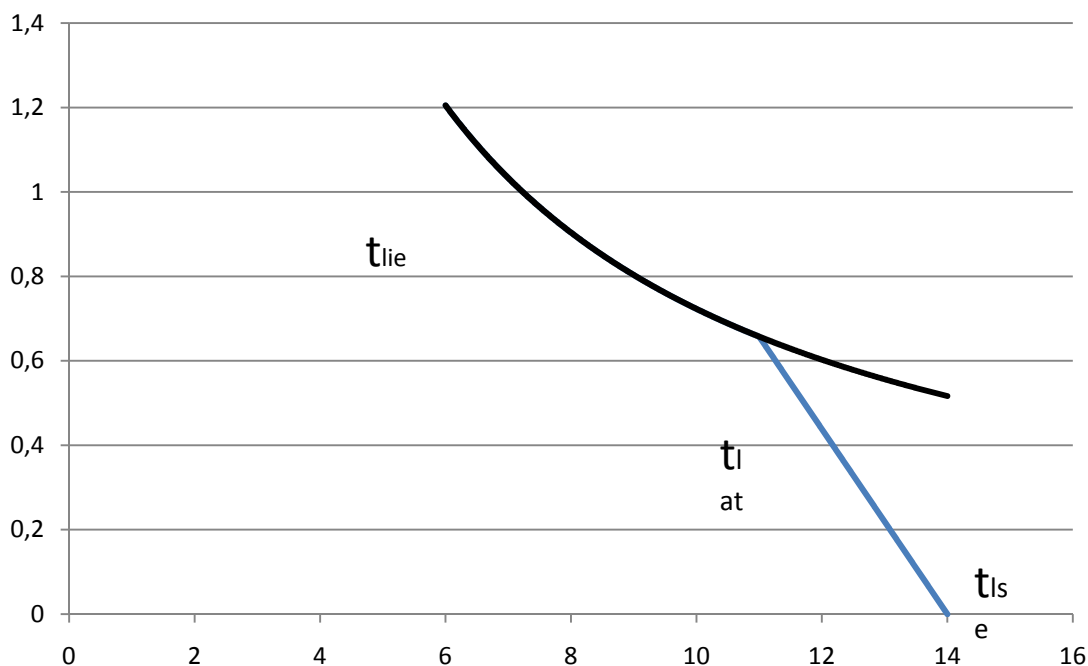


Figura 4-1 Modelagem da função de utilidade.

4.6 Aproximações para as Especificações da Função de Impedância

O objetivo mais importante desta pesquisa é contribuir para avaliar o impacto da variabilidade do tempo de viagem na variação da propensão a que uma determinada viagem seja realizada em uma determinada rota. É de interesse portanto avaliar o quanto fica modificada a percepção do próprio tempo de viagem de forma probabilística. Foi selecionada na literatura uma estrutura de ampla utilização e que atende ao objetivo referenciado :

$$F(t) = c_{ij}^{\beta}$$

Onde c_{ij} é o custo generalizado de uma viagem entre ij e β um parâmetro a ser ajustado por calibragem para as condições específicas de uma determinada área em estudo.

Uma estimativa sugerida para β em ORTÚZAR e WILLUMSEN (1994) é o inverso do tempo de viagem, e como os objetivos da aplicação do modelo se restringem ao estudo dos efeitos da confiabilidade com relação ao tempo de viagem percebido para efeito de planejamento de longo prazo essa estimativa atende do ponto de vista da aplicação acadêmica, e a expressão toma então a forma:

$$F(t) = \frac{1}{t_{ij}}$$

Para efeito da pesquisa serão então, testadas essas duas formas funcionais, e comparados os resultados da confiabilidade com o *buffer index*, para que se verifique qual modelo se mostra mais adequado.

4.7 O Modelo

4.7.1 O Algoritmo de Simulação

Em cada iteração da simulação será alocada a cada rota uma proporção do número de viagens totais produzidas, de acordo com o limite de confiabilidade e os tempos de viagem simulados. Em cada iteração essa proporção será:

$$V_{ij} = \frac{n \times F_{ij}}{\sum_{j=1}^n (F_{ij})}$$

Se $t_{vi}^q \leq t_{lat}^q$, ou:

$$V_{ij} = \frac{F(t_{lat}^q)}{\sum_{j=1}^n (F_j)} \times \frac{(t_{lse} - t_{vi}^q)}{(t_{lse} - t_{lat}^q)}$$

Se $t_{vi} > t_{lat}$.

O procedimento adotado tem então a seguinte sequência de passos:

Passo 01: Simular o tempo de limite de atraso t_{lat} para a iteração;

Passo 02 : Simular o tempo de viagem t_{vj} para cada destino j ;

Passo 03 : Verificar se $t_v > t_{lat}$:

Passo 04 : Se $t_v > t_{lat}$ calcular o número de viagens V_{ij} por interpolação;

Passo 05 : Se $t_v \leq t_{lat}$ calcular o número de viagens V_{ij} utilizando o modelo de distribuição;

Passo 06: Calcular a média para Q iterações de V_{ij} ;

4.7.2 O Cálculo do Tempo de Viagem Equivalente

Estimados os valores de V_{ij} pelo processo de simulação, o valor de F_{ij} pode ser calculado, utilizando-se a expressão original:

$$\widetilde{V}_{ij} = \frac{n \times F_{ij}}{\sum_{j=1}^n (F_{ij})}$$

Então:

$$\widetilde{F}_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^n (F_{ij}) \times \widetilde{V}_{ij}}{n}$$

Como $\sum_{j=1}^n (F_{ij})$ não é conhecido, pode-se estimar seu valor utilizando-se os valores encontrados em cada iteração e calculando-se a sua média:

$$\widetilde{\sum_{j=1}^n (F_{ij})} = \frac{1}{Q} \times \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^n F_{ij}^q$$

Se a forma funcional para F_{ij} for:

$$F(t) = \frac{1}{t_{ij}}$$

Então

$$\widetilde{t}_{ij} = \frac{1}{\widetilde{F}_{ij}}$$

Se a forma funcional para F_{ij} for:

$$F(t) = \frac{1}{e^{t_{ij}}}$$

Então:

$$e^{\widetilde{t}_{ij}} = \frac{1}{\widetilde{F}_{ij}}$$

e

$$\widetilde{t}_{ij} = \ln \frac{1}{\widetilde{F}_{ij}}$$

Então $\widetilde{t}_{ij}$ é o valor equivalente do tempo de viagem para o destino j ponderado pela incorporação dos efeitos da confiabilidade do tempo de viagem.

3.7.3 Ajuste do Tempo de Viagem Equivalente

Esse valor de $\widetilde{t}_{ij}$ no entanto consiste em uma correção considerando os demais destinos de forma relativa, assim é necessário que o modelo seja ajustado. Para tanto, pode-se introduzir um destino “dummy” com um tempo de viagem determinístico t_{dummy} , correspondendo a um destino que não necessita de correção por não ter variabilidade. O valor do tempo de viagem pode ser selecionado como o limite legal possível, ou seja, o tempo de percurso a uma velocidade próxima do limite estabelecido pela legislação.

Concluída a simulação e encontrados os V_{ij} força-se o valor do número de viagens alocadas ao destino “dummy” V_{dummy} , que será o maior, a ser igual a 1, que é a atração de viagens de cada região. Uma vez que apenas o destino “dummy” terá

confiabilidade igual a 1, apenas esse destino poderia ter a alocação de viagens igual à atração, os demais devem ter uma redução proporcional, e esse fator de redução é:

$$\alpha = \frac{1}{V_{dummy}}$$

Multiplica-se então cada $\widetilde{V}_{ij}$ por α antes de calcular $\widetilde{F}_{ij}$ e prosseguindo-se com os cálculos da mesma forma apresentada, obtendo-se então um valor de $\widetilde{t}_{ij}$ já considerando essa calibragem.

O valor da confiabilidade CF_j esperada para cada destino j pode ser calculado de forma semelhante, utilizando-se as observações das simulações. Seja c_j^q uma variável binária que em cada simulação q e para cada destino j irá assumir os seguintes valores:

$$c_j^q = 1 \text{ se } t_{vj}^q \leq t_{lat}$$

$$c_j^q = 0 \text{ se } t_{vj}^q > t_{lat}$$

Então:

$$\widetilde{CF}_j = \frac{1}{Q} \times \sum_{q=1}^Q c_j^q$$

Para cada destino calcula-se o seu *buffer-index* B_{index} que é obtido calculando-se a diferença entre o valor do 95º percentil t_{95} de sua distribuição de probabilidades e o valor esperado t_{esp} dessa distribuição e dividindo-se por esse valor esperado:

$$B_{index} = \frac{t_{95} - t_{esp}}{t_{esp}}$$

Pode-se então fazer uma comparação das confiabilidades simuladas e o valor do B_{index} para verificar o comportamento dos dois indicadores. O fluxograma e o programa fonte, que foi desenvolvido em Visual Basic for Applications, estão apresentados no Anexo I.

5 APLICAÇÃO

5.1 Introdução

Para realizar uma aplicação prática, foi realizada uma busca no sentido de se obter uma fonte de dados e informações que apresentasse uma variação nas suas condições de operação, que permitisse a observação de mudanças significativas nas distribuições do tempo de viagem.

Outro fator muito importante foi a forma de obtenção de dados e informações com a qualidade necessária a um trabalho científico. Conforme foi apresentado no Capítulo de Fundamentação Teórica, mesmo nos países mais desenvolvidos essa não é uma tarefa simples, e as dificuldades inerentes a coleta desses dados tem avançado em razão da adoção de tecnologias de controle que indiretamente se tornam fontes de informações de tempode de viagem. Optou-se neste caso por buscar obter esses dados a partir de viagens interurbanas por transporte rodoviário de passageiros por ônibus.

A empresa Transnorte com sede no município de Montes Claros no norte de Minas Gerais permitiu que fossem coletados dados de suas linhas intermunicipais, e disponibilizou os discos de tacógrafo dessas linhas para fonte de dados da pesquisa.

Esses dados foram coletados por uma equipe de dois estagiários da Universidade Estadual de Montes Claros -UNIMONTES, sob supervisão de um Professor daquela Universidade, de acordo com as orientações da pesquisa.

5.2 A Base de Dados

A linha selecionada para a pesquisa foi Montes Claros a Belo Horizonte, que compreende um trecho na rodovia BR-040 de 106 km e um trecho na rodovia MG-135 de 293 km, e ainda 24 km na região metropolitana de Belo Horizonte num total de 423 km.

5.2.1 Montes Claros

Montes Claros é a cidade pólo da Região Norte do Estado de Minas Gerais e conta com um parque têxtil dos mais modernos do Brasil, uma grande unidade produtora de cimento, empresas de biotecnologia muito avançadas e uma estrutura de educação de destaque com uma Universidade Estadual localizada na cidade.

RODRIGUES ET AL (2006) apresenta um estudo das especificidades setoriais dos municípios do Norte de Minas Gerais em que 76% são de pequeno porte com população inferior a 20 mil habitantes, apenas 4,5% têm população entre 50 mil e 100 mil habitantes e somente Montes Claros com uma população de mais de 300 mil habitantes pode ser considerada de grande porte. Utilizando a técnica de *clusters* 5 agrupamentos de municípios foram formados, porém Montes Claros formou um *cluster* unitário, pois não foi possível se juntar a nenhum outro município.

Esse estudo evidencia a importância de Montes Claros para toda essa região, e por consequência a importância da ligação rodoviária entre esse município e Belo Horizonte. É por essa rota que circula praticamente toda a interação da economia da Região Norte do Estado de Minas Gerais com o restante do país, pois passam por Belo Horizonte todas as viagens de transporte rodoviário de mercadorias de Montes Claros, que têm origem ou destino nos principais Portos do país, nas maiores metrópoles e nas regiões de maior atividade econômica do Brasil.

5.2.2 Características da Amostra

Foram coletados dados entre os anos de 2003 e 2006, em que para alguns períodos não foi possível a utilização das informações do tacógrafo em razão dos discos terem sido danificados. Não foi possível então a utilização dos dados de janeiro de 2006, janeiro, novembro e dezembro de 2005 e agosto de 2004.

Foram obtidas as informações referentes aos horários de saída da origem e de chegada ao destino, de Montes Claros a Belo Horizonte e de Belo Horizonte a Montes Claros. Essa linha tem regularmente 30 horários, sendo 15 em cada sentido. As informações foram retiradas diretamente dos discos de tacógrafo e digitadas em

planilhas eletrônicas. Foram levantadas 36.648 observações (36.622 válidas) de tempos de viagem referentes a 43 meses de operação.

Para verificação do comportamento da distribuição dos tempos de viagem considerando todo o período da pesquisa a sua distribuição de frequência foi utilizada para estimativa, com o auxílio do Software ARENA, por intermédio do módulo *Input Analyser* que executa os testes não paramétricos de Kolmogorov-Smirnov e de Qui-Quadrado. Para os tempos de viagem de todas as observações, a melhor aderência encontrada para os dados foi a uma função de distribuição Log-Normal conforme a expressão a seguir.

$$= 5 + \text{Log}N(2,48; 0,881)$$

O teste χ^2 foi realizado dividindo-se a amostra em 30 intervalos, o que implicou em 27 graus de liberdade, e a estatística foi $3,39 \times 10^{-3}$ correspondendo a um valor $p < 0,005$.

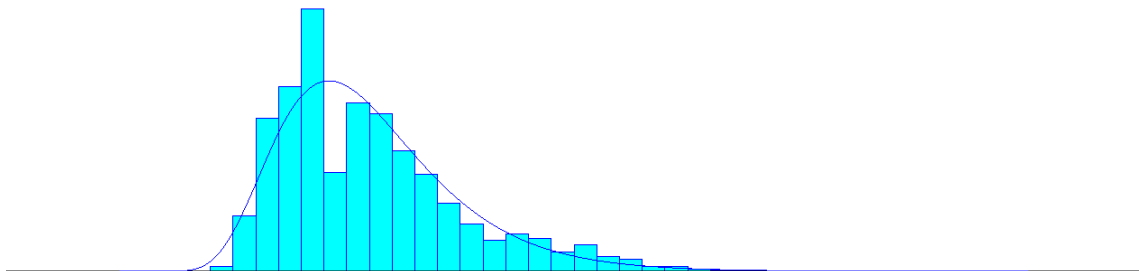


Figura 5-1 Distribuição de frequência e ajustamento à distribuição log-normal de todas as observações de tempo de viagem.

5.2.3 Tratamento dos Dados

As observações foram analisadas quanto a eventuais erros e problemas com relação à sua qualidade tendo sido eliminadas da amostra 21 observações com tempo de viagem inferior a 6 horas, sendo 16 com tempo de viagem igual a

zero, o que indica que provavelmente houve um dano no disco do tacógrafo ou algum problema na digitação dos dados.

Foram eliminadas ainda 9 observações com um tempo de viagem superior a 14 horas tendo em vista que não se pode verificar que houvesse regularidade nem frequência razoável desses valores que justificasse considerá-los. Provavelmente se deveram a fatos fortuitos que não devem ser computados na análise que a pesquisa se propõe. De todo modo, ainda que a retirada dessas observações possa ser considerada discricionária, não afeta significativamente os resultados estatísticos dado o tamanho da amostra. Tendo em vista no entanto a análise a ser realizada quanto aos tempos de viagem que comporão os limites de exeqüibilidade, esses valores poderiam dar um viés ao estabelecimento desses limites.

Os dados foram classificados de acordo com o horário de partida e para avaliação da confiabilidade do tempo de viagem foram classificados em períodos mensais. Grupados por intervalos de tempo de viagem pode-se observar nos gráficos das **fig 4-2 e 4-3** o comportamento do tempo de viagem com relação à média e ao desvio-padrão das amostras referentes a cada mês objeto da pesquisa por algumas classes mais significativas de intervalo de horário de saída.

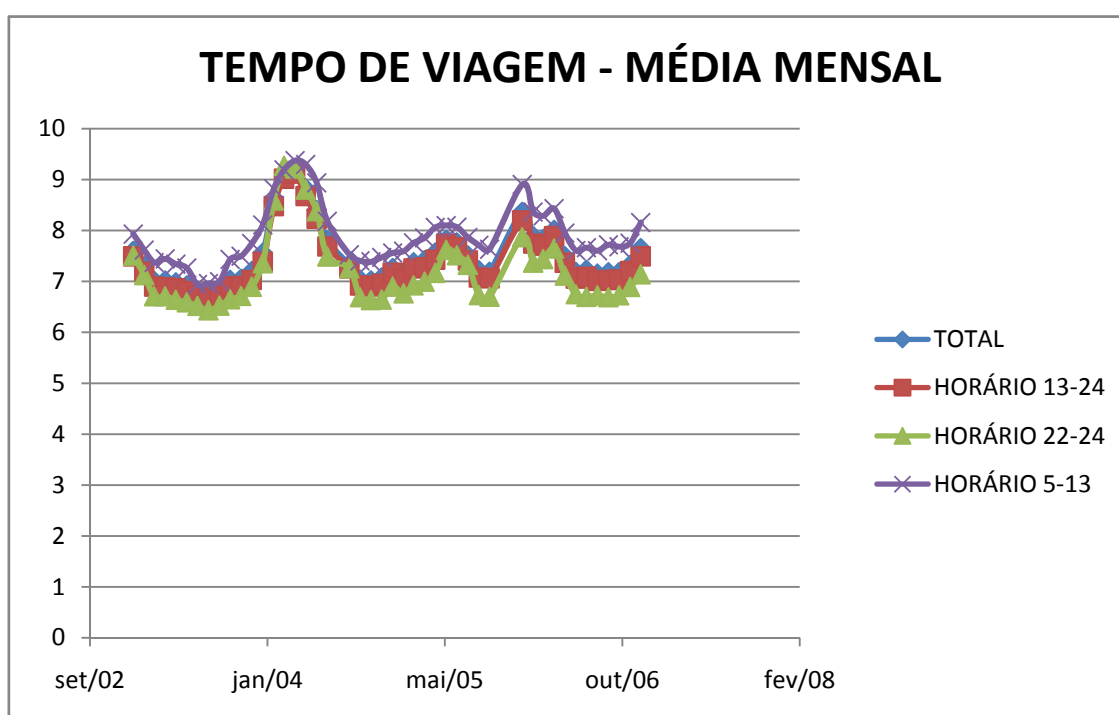


Figura 5-2: Gráfico de evolução da média mensal do tempo de viagem.

No gráfico de evolução da média mensal do tempo de viagem pode-se verificar que aos horários de partida entre 5 h e 13 h correspondem os valores mais elevados da média em qualquer período, o inverso ocorrendo aos horários compreendidos entre 22 h e 24 h, que correspondem às viagens nos períodos do dia com menor fluxo de tráfego. Feita essa verificação, foi então constatado que no período da manhã ocorrem paradas intermediárias para entrada e saída de passageiros, e esse fato pode dar um viés de aumento do tempo de viagem, que não tem como motivação qualquer fato atinente ao fluxo de tráfego ou às condições da infra-estrutura.

Nos demais horários não são permitidas paradas ao longo da estrada, ocorre apenas uma parada programada de cerca de 30 minutos, que foi considerada como inerente a uma viagem dessa extensão, em que o condutor do veículo necessita de uma pequena interrupção para descanso. Dessa forma para a modelagem foram considerados apenas os horários a partir de 13 h.

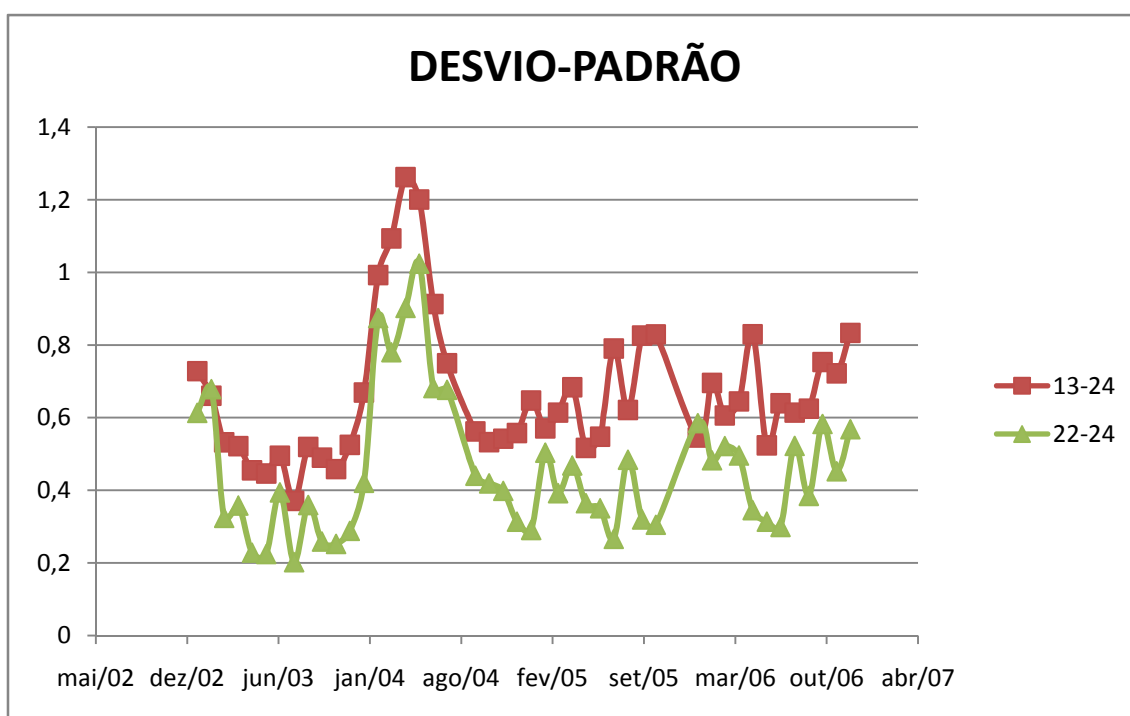


Figura 5-3: Gráfico de evolução do desvio-padrão do tempo de viagem.

Com relação à variabilidade do tempo de viagem observa-se no gráfico da figura 4-3 que aos horários entre 22 h e 24 h correspondem valores menores para o desvio-

padrão, em qualquer período. Observa-se ainda que entre janeiro de 2004 e maio de 2004 a variabilidade aumentou sensivelmente atingindo os maiores níveis de todo o período em estudo, com um máximo 1:15 h para o desvio-padrão do tempo de viagem nos horários de 13 a 24 h no mês de abril de 2004, e um máximo de 1 h para o desvio-padrão do tempo de viagem nos horários de saída entre 22 e 24 h no mês de maio de 2004.

Com relação à média amostral do tempo de viagem esse mesmo período compreendeu os valores mais elevados, como pode ser observado no gráfico da figura 4-2, com um máximo de 9:13 h de média mensal do tempo de viagem para o intervalo de horários de partida entre 13 h e 24 h, e de 9:16 h para o intervalo entre 22 e 24 h, ambos ocorridos no mês de março de 2004.

Nesse período de janeiro a maio de 2004 em virtude da ocorrência de fortes chuvas, a degradação das condições de operação desse trecho rodoviário se acelerou intensamente. No gráfico da figura 4-4 pode-se observar o comportamento das chuvas em todo o período da pesquisa, com dados de precipitações pluviométricas diárias, obtidos a partir de observações do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais –INPE em Estações localizadas em Montes Claros e em Belo Horizonte.

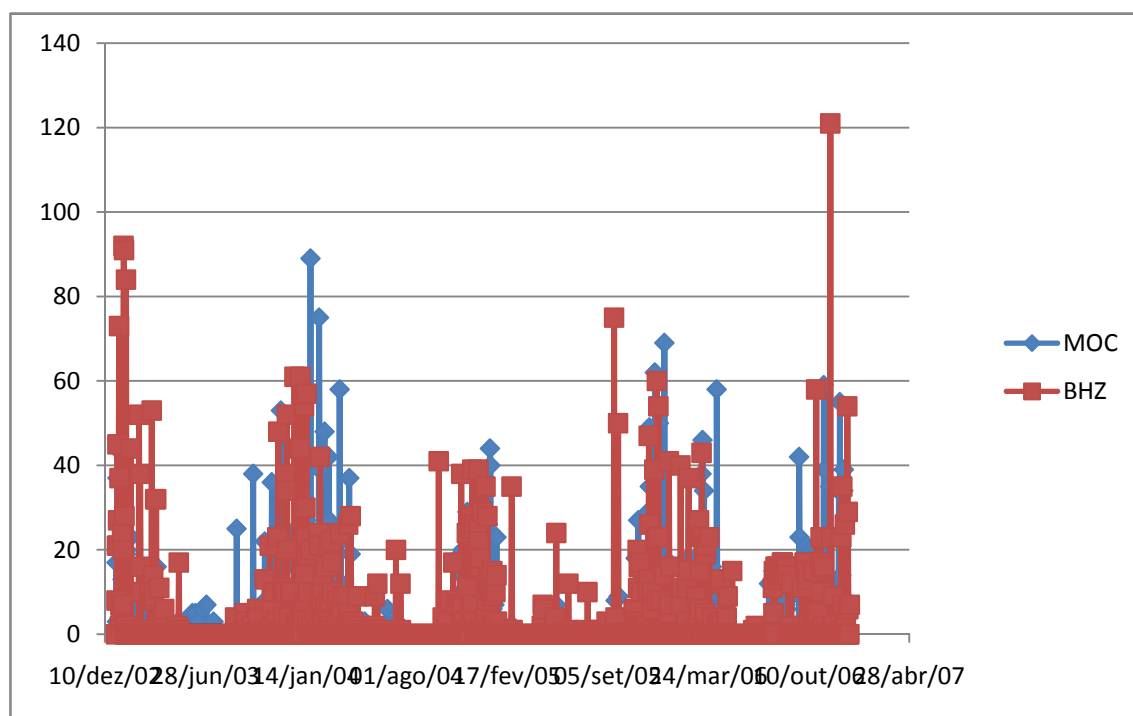


Figura 5-4: Gráfico da evolução da precipitação pluviométrica entre dezembro de 2002 e dezembro de 2006 (Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais –INPE).

Pode ser verificado que nos meses iniciais de cada ano a precipitação pluviométrica é mais intensa, tanto em Montes Claros quanto em Belo Horizonte, no entanto no período inicial de 2004 e no de 2005, esse comportamento se acentuou com um aumento expressivo da média diária correspondente ao mesmo período do ano, conforme pode ser observado no gráfico da figura 4-4 e na tabela 4-1. Os dados coletados com relação às chuvas estão no **Apêndice II**.

ANO	MÉDIA JAN-MAR(MOC)	MÉDIA JAN-MAR (BHZ)	MÉDIA ANUAL (MOC)	MÉDIA ANUAL (BHZ)
2003	4,20	10,46	2,19	3,84
2004	9,52	7,89	3,61	3,69
2005	2,57	2,30	2,11	2,34
2006	4,25	4,95	3,98	4,21

Tabela 5-1: Precipitações pluviométricas médias.

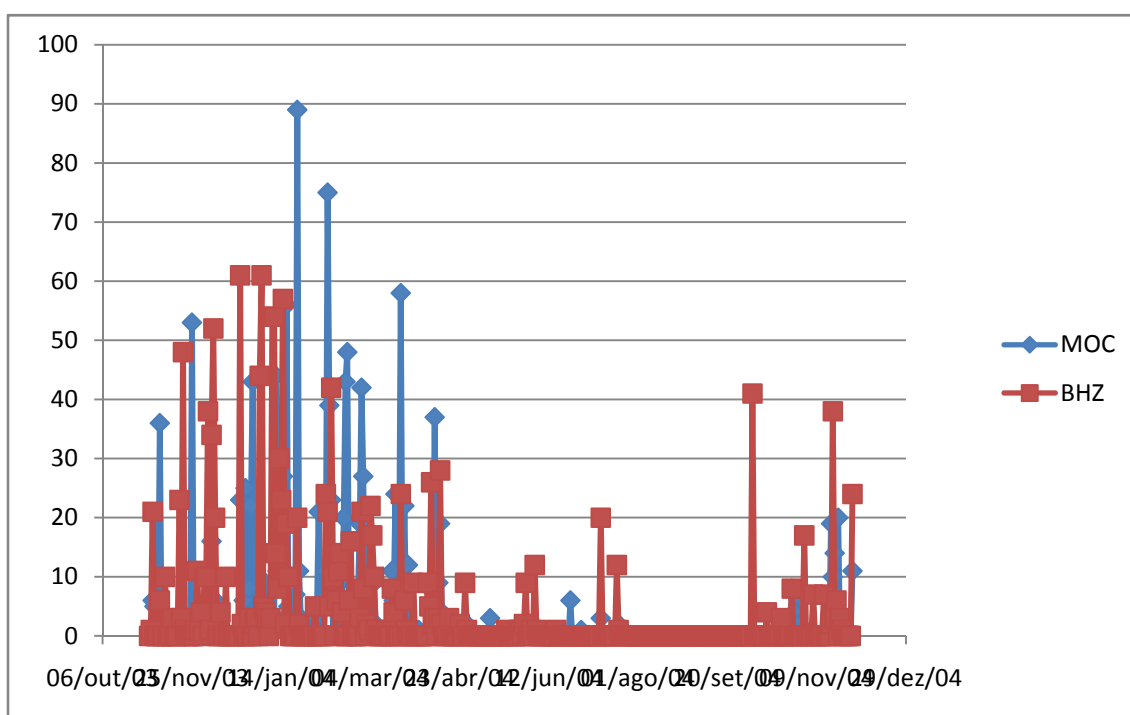


Figura 5-5: Precipitações pluviométricas em 2004.

Esses comportamentos do tempo de viagem e da variabilidade do tempo de viagem permitem a utilização desse período como representativo de uma situação degradada do trecho rodoviário em questão. De outro lado a segregação das observações do intervalo de horários de partida entre 22 e 24 h nos dá uma boa aproximação do tempo de viagem a velocidade de fluxo livre, considerando que durante a madrugada, que é o período dessas viagens, o fluxo de tráfego tanto de caminhões quanto de veículos de passeio é extremamente reduzido de uma forma geral.

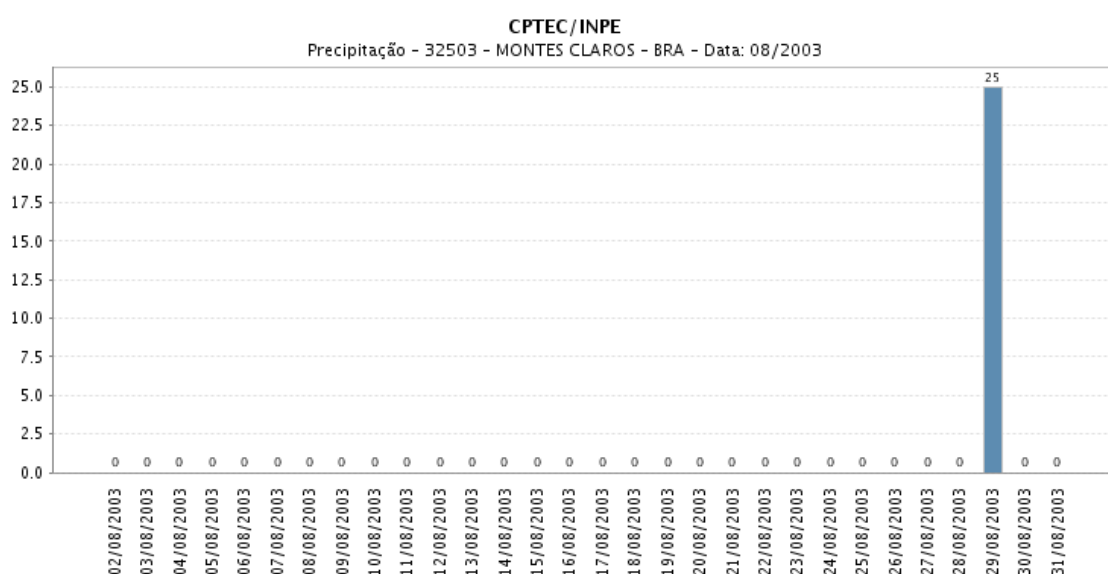


Figura 5-6: Precipitações pluviométricas em Montes Claros no mês de agosto de 2003 (Fonte INPE).

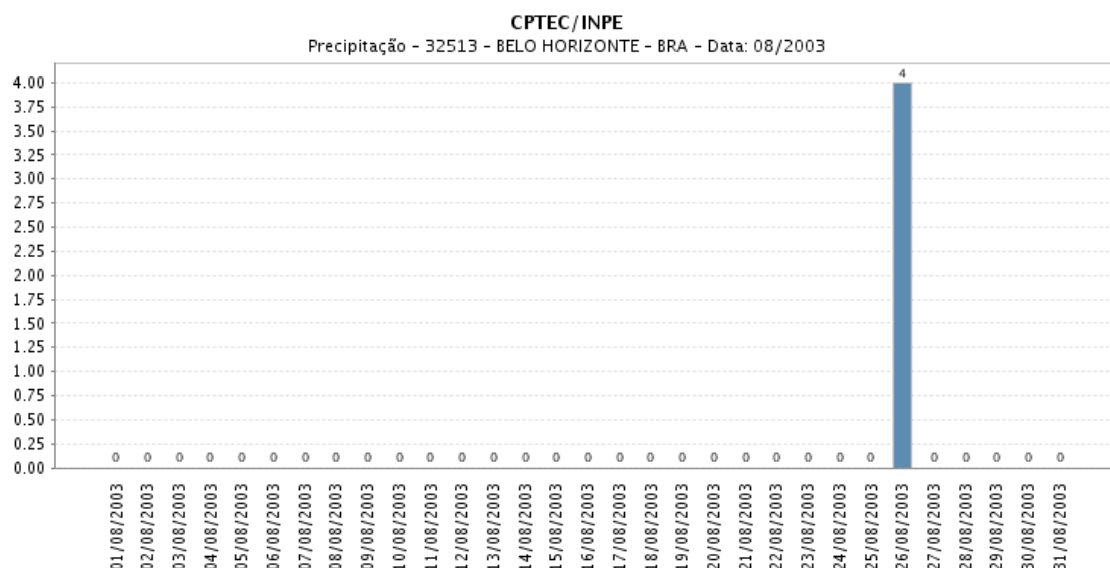


Figura 5-7: Precipitações pluviométricas em Belo Horizonte no mês de agosto de 2003 (Fonte INPE).

No mês de agosto de 2003 foram observados os menores valores tanto para a média quanto para o desvio-padrão do tempo de viagem, respectivamente 6:25 h e 12 min. É importante observar que nesse período as precipitações pluviométricas ocorreram em apenas um dia na região de Montes Claros e um dia na região de Belo Horizonte, conforme pode ser observado nos gráficos das figura 4-6 e 4-7.

Essas condições permitem que a partir das observações de tempo de viagem em condições situadas nos extremos, no que diz respeito ao grau de degradação, pode-se estabelecer os valores limite conforme a metodologia proposta.

5.3 A MODELAGEM

5.3.1 Distribuições do Tempo de Viagem

Foram utilizadas as distribuições de frequência de 43 meses compreendidos entre janeiro de 2003 e dezembro de 2006, e de acordo com a metodologia proposta a cada mês corresponde um destino virtual j . A primeira etapa consiste em estimar os parâmetros das distribuições de probabilidades do tempo de viagem para cada destino j a partir de suas distribuições de frequência.

No Anexo II são apresentados os resultados dos testes não paramétricos da estatística χ^2 e as estatísticas de Kolmogorov-Smirnov encontradas com a utilização do *Input Analyser* do Software ARENA, realizados para testar as aproximações pela distribuição normal para utilização no modelo de simulação. São apresentadas ainda as características das distribuições de frequência do tempo de viagem, para cada um dos períodos que foram utilizados.

5.3.2 Definição dos Intervalos dos Limites de confiabilidade

O intervalo dos valores de tempo de viagem considerados “exeqüíveis” foi estabelecido, de acordo com a metodologia proposta, observando-se o comportamento em diferentes condições de fluxo de tráfego e de degradação da rede viária em estudo.

Observando as médias do tempo de viagem nos horários de partida compreendidos entre 22 e 24 h pode-se fazer uma inferência com relação ao limite inferior exeqüível, ou seja o tempo de viagem mínimo que pode ser utilizado como planejamento de operações de transporte rodoviário de cargas e que pode ser alcançado caso a rede viária esteja nas suas melhores condições possíveis com relação ao estado da infra-estrutura e com relação ao fluxo de tráfego.

Foi selecionado então o valor do tempo de viagem correspondente à menor média mensal obtida das amostras desse intervalo de horários de partida, chegando a um limite $t_{lie} = 6,43$ h obtido no mês de agosto de 2003, nas condições descritas anteriormente. Essa média foi obtida a partir de 279 viagens realizadas nesse mês e dentro do intervalo de horários de partida indicado, o que dá suporte a que se possa considerar como factível a obtenção desse desempenho com relação ao tempo de viagem esperado.

Das 27.985 observações em apenas 19 o tempo de viagem foi superior a 12 horas, e esse tempo de viagem corresponde a uma velocidade média de cerca de 36 km/h. Esse limite foi considerado então como o limite superior de exeqüibilidade t_{lse} , pois mesmo nas piores condições da infra-estrutura e de operação é possível realizar a viagem em um tempo inferior a 12 h. Dessa forma temos:

$$6,43 < t_{lat} < 12$$

A partir da análise das distribuições de frequência dos tempos de viagem de cada destino j correspondente a cada um dos meses analisados optou-se por uma aproximação pela distribuição normal, com os parâmetros estimados a partir das médias e desvios-padrão das amostras apresentados na Tabela 4-2.

Além desses limites é introduzido no modelo uma restrição na simulação para que o tempo de viagem não seja simulado como inferior ao tempo de viagem considerado o limite legal de velocidade. Considerando que a distância a ser percorrida é de 423 km, e considerando ainda 30 min de parada para descanso do condutor esse limite foi estipulado na modelagem como 6 h de viagem.

5.4 Resultados da Simulação

Foram realizadas $Q = 5.000$ simulações para os valores de V_j , e sendo $n = 43$ destinos $j + 1$ destino “dummy”, temos:

$$\check{P}_j(t) = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q L_j(V_j^q; t)$$

e

$$V_j = \frac{n}{Q} \sum_{q=1}^Q L_j(V_j^q; t)$$

Utilizando-se então:

$$\widetilde{\sum_{j=1}^n (F_{ij})} = \frac{1}{Q} \times \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^n F_{ij}^q$$

Temos:

$$\widetilde{\sum_{j=1}^n (F_{ij})} = 6,086$$

Aplicando-se em:

$$\widetilde{F_{ij}} = \frac{\sum_{j=1}^n (F_{ij}) \times \widetilde{V_{ij}}}{n}$$

Encontra-se os valores de cada $\widetilde{F_j}$ e que correspondem ao tempo de viagem equivalente:

$$\widetilde{t_{ij}} = \frac{1}{\widetilde{F_{ij}}}$$

Finalmente com a utilização do destino “dummy” pode-se fazer um ajuste com:

$$\alpha = \frac{1}{V_{dummy}}$$

Multiplicando-se então cada V_j por α temos os valores de $\widetilde{t_{ij}}$ equivalentes.

Quanto à confiabilidade o seu cálculo é obtido a partir de:

$$c_j^q = 1 \text{ se } t_{vj}^q \leq t_{lat}$$

$$c_j^q = 0 \text{ se } t_{vj}^q > t_{lat}$$

Com:

$$\widetilde{CF}_j = \frac{1}{Q} \times \sum_{q=1}^Q c_j^q$$

Finalmente o *buffer index* calculado como:

$$B_{index} = \frac{t_{95} - t_{esp}}{t_{esp}}$$

Esses resultados, assim como os parâmetros das distribuições amostrais são apresentados na Tabela 5-2 a seguir.

Mês	$\bar{X}$	σ	V_j	$\tilde{t}_{ij}$	$\tilde{t}_{ij \text{ ajustado}}$	$\widetilde{CF}_j$	B_{index}
jan-03	7,49	0,728	0,960633	7,525494	9,068627	79,30%	15,99%
fev-03	7,2	0,66	1,002815	7,208945	8,687169	84,90%	15,08%
mar-03	6,9	0,532	1,047687	6,900192	8,315105	90,90%	12,68%
abr-03	6,88	0,522	1,052679	6,867467	8,275669	91,40%	12,48%
mai-03	6,86	0,455	1,057116	6,838643	8,240935	92,80%	10,91%
jun-03	6,81	0,446	1,066244	6,780099	8,170386	92,30%	10,77%
jul-03	6,72	0,495	1,078938	6,700328	8,074258	94,00%	12,12%
ago-03	6,64	0,371	1,089447	6,635699	7,996376	94,90%	9,19%
set-03	6,72	0,52	1,076815	6,713541	8,090181	94,00%	12,73%
out-03	6,9	0,49	1,053001	6,865366	8,273138	91,60%	11,68%
nov-03	6,91	0,458	1,045984	6,911425	8,328641	91,40%	10,90%
dez-03	7,03	0,525	1,032651	7,000662	8,436176	89,50%	12,28%
jan-04	7,39	0,669	0,973846	7,423392	8,945589	82,70%	14,89%
fev-04	8,48	0,992	0,805967	8,969643	10,80891	61,90%	19,24%
mar-04	9,01	1,09	0,718443	10,06236	12,12569	51,70%	19,90%
abr-04	9,12	1,26	0,696074	10,38573	12,51537	50,20%	22,72%
mai-04	8,67	1,2	0,784062	9,22024	11,11089	59,90%	22,77%
jun-04	8,23	0,913	0,859282	8,41312	10,13827	68,70%	18,25%
jul-04	7,68	0,75	0,931195	7,7634	9,355317	76,20%	16,06%
set-04	7,26	0,562	0,992395	7,284638	8,778383	85,10%	12,73%
out-04	6,92	0,533	1,047036	6,90448	8,320272	91,40%	12,67%
nov-04	6,9	0,542	1,052022	6,871756	8,280838	91,00%	12,92%
dez-04	6,95	0,558	1,045693	6,913345	8,330954	90,50%	13,21%
fev-05	7,04	0,571	1,028974	7,025677	8,46632	88,30%	13,34%
mar-05	7,25	0,614	0,998613	7,23928	8,723724	86,40%	13,93%
abr-05	7,28	0,677	0,99534	7,263082	8,752406	84,10%	15,30%
mai-05	7,43	0,517	0,969576	7,456083	8,984983	81,80%	11,45%
jun-05	7,75	0,452	0,925709	7,809409	9,41076	76,90%	9,59%
jul-05	7,65	0,476	0,93683	7,7167	9,299041	78,10%	10,23%
ago-05	7,42	0,549	0,96963	7,455667	8,984482	82,00%	12,17%
set-05	7,05	0,552	1,028261	7,030552	8,472195	88,90%	12,88%
out-05	7,04	0,556	1,027531	7,035542	8,478209	87,90%	12,99%
fev-06	7,74	0,695	0,925677	7,809677	9,411084	75,30%	14,77%
mar-06	7,7	0,606	0,930198	7,771724	9,365348	78,40%	12,95%
abr-06	7,89	0,645	0,904764	7,990194	9,628617	74,30%	13,45%
mai-06	7,41	0,594	0,971345	7,442505	8,968621	82,10%	13,19%
jun-06	7,05	0,524	1,02714	7,038225	8,481442	88,60%	12,23%
jul-06	7,09	0,64	1,017509	7,104839	8,561716	86,20%	14,85%
ago-06	7,01	0,614	1,036156	6,976976	8,407634	89,10%	14,41%
set-06	7,02	0,625	1,034522	6,987999	8,420917	88,20%	14,64%
out-06	7,07	0,582	1,026507	7,042562	8,486668	86,90%	13,54%
nov-06	7,21	0,663	1,003571	7,203518	8,680629	85,60%	15,13%
dez-06	7,49	0,714	0,965701	7,485999	9,021034	80,80%	15,68%

Tabela 5-2 : Parâmetros das amostras e resultados da simulação.

5.5 ANÁLISE

O início do ano de 2004 se caracterizou por uma degradação muito expressiva dessa ligação entre Montes Claros e Belo Horizonte, o tempo de viagem que se situava no entorno de 7 horas de viagem e com um desvio-padrão da ordem de 20 a 30 minutos se elevou para mais de 9 horas e o desvio-padrão para mais de 60 minutos.

No intervalo de horários de partida entre 22 e 24 h em que o fluxo de tráfego é muito menor, e que pode-se equiparar ao fluxo livre, o desempenho habitual era de um tempo de viagem de cerca de 6:45 h e um desvio-padrão de cerca de 20 minutos. Mesmo nesses horários o tempo de viagem se elevou de forma muito acentuada, uma média superior a 9 h de viagem, um aumento de 30%. Por sua vez o desvio-padrão nesse intervalo atinge em maio de 2003 a mais de 1 h, mesmo não tendo sido esse mês o de maior média, 8:48 h contra 9:16 h em março do mesmo ano.

Nesse período, início de 2004, não foi rara a ocorrência de tempos de viagem superiores a 10 h, no mês de março por exemplo cerca de 12 % das observações foram superiores a esse valor. Importante observar que ainda assim ocorreram tempos de viagem inferiores a 7 h, o que indica a dispersão que ocorreu nesse período.

O tempo de viagem equivalente obtido mostra que a queda da confiabilidade nesse período, 61,9 % em fevereiro, 51,7% em março e 50,2 % em abril de 2004 enquanto que no mesmo período de 2003 a confiabilidade foi de 84,9% em fevereiro, 90,9% em março e 91,4% em abril. A confiabilidade atingiu o seu máximo em agosto de 2003 com 94,9% e em todo o período analisado teve uma média de 82,9%. No gráfico da figura 4-8 pode-se observar a evolução da confiabilidade durante todo o período da pesquisa.

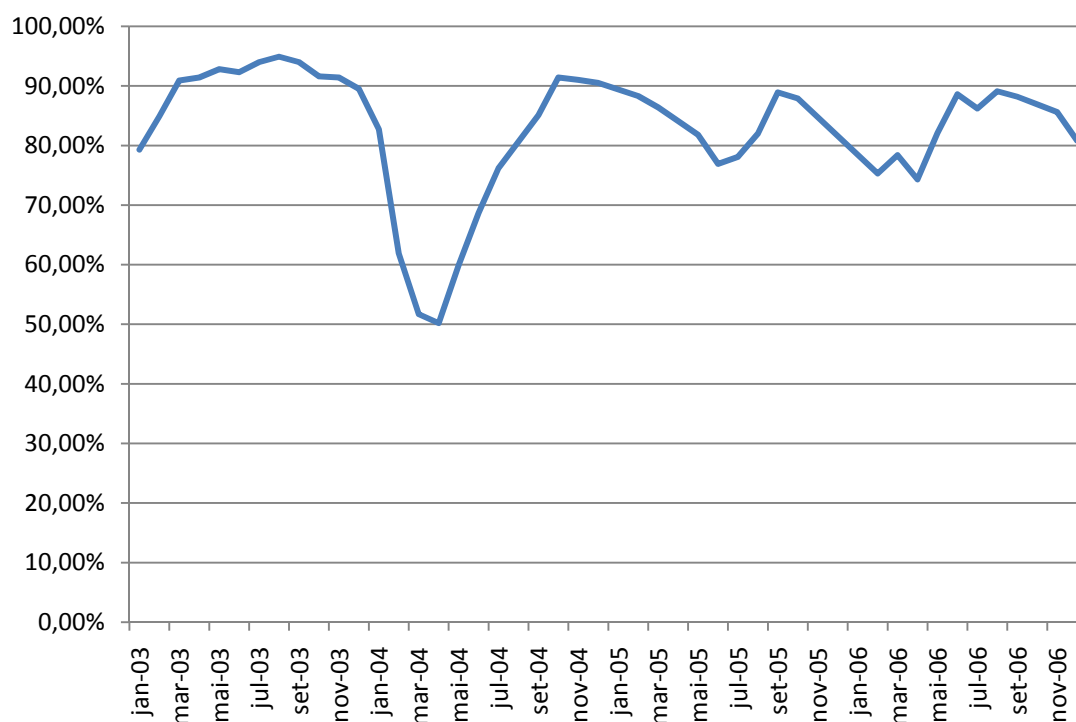


Figura 5-4-2: Evolução da confiabilidade esperada.

O *buffer index* teve nesse período os seus valores máximos, atingindo a 22,77% em maio de 2003, enquanto que a sua média em todo o período considerado foi de 13,93%. No gráfico da figura 5-9 pode-se observar a sua variação em todo o período da pesquisa.

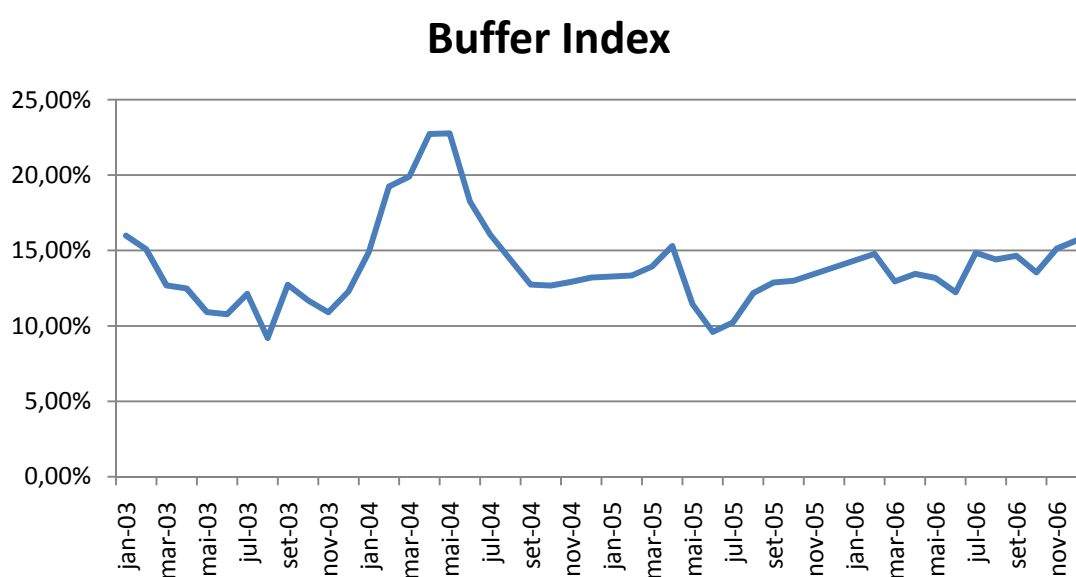


Figura 5-4-3: Evolução do *buffer index*.

O tempo de viagem equivalente calculado pode ser visto no Gráfico da figura 5-10.

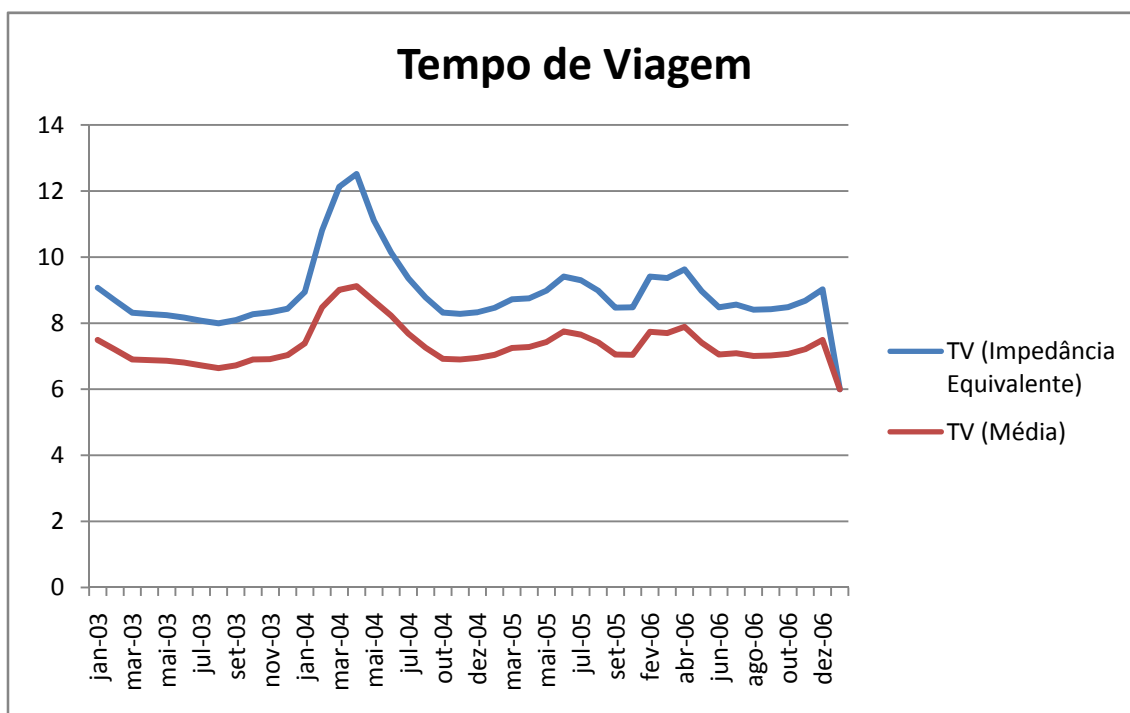


Figura 5-4-4: Evolução do tempo de viagem equivalente.

O tempo de viagem equivalente incorpora a impedância acrescentada pela variação da confiabilidade, e nos meses críticos em que houve uma queda acentuada o tempo de viagem equivalente chegou a cerca de 12:30 h, em abril de 2004 correspondendo a uma média de 9:07 h nesse período, o que significa uma correção de 3:21 h ou 37,22% para incorporar os efeitos da queda na confiabilidade, que nesse mês foi de 50,2% , como vimos a mais baixa em todo o período da pesquisa.

A utilização do destino *dummy* faz com que o tempo de viagem seja corrigido, mesmo nos períodos em que as condições da infra-estrutura e do fluxo de tráfego estão em ótimas condições, como por exemplo em agosto de 2003. Nesse Mês a confiabilidade atingiu o seu maior valor 94,9%, a média dos tempos de viagem foi de 6:38 h, a menor em todo o período da pesquisa, o desvio-padrão foi de 22 minutos e o *buffer index* de apenas 9,19%. Nesse período o tempo de viagem corrigido foi de cerca de 8 h correspondendo a um acréscimo de cerca de 20 % na sua impedância, relativa ao

destino *dummy* que teria um tempo de viagem determinístico com confiabilidade igual a 100%.

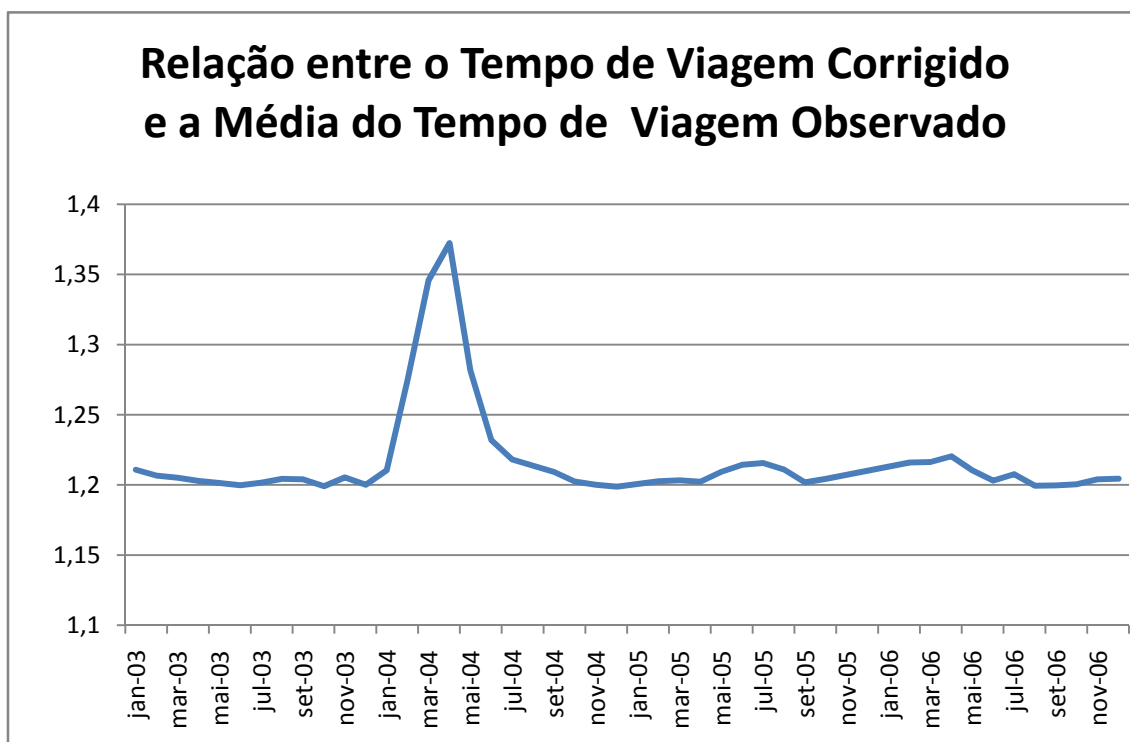


Figura 5-4-5: Relação entre o tempo de viagem corrigido e a média do tempo de viagem observado.

No gráfico da figura 4-11 pode-se observar que o tempo de viagem corrigido se manteve em cerca de 20% acima do tempo de viagem observado em quase todo o período considerado, à exceção do período de degradação que chegou a mais de 35% superior ao tempo de viagem observado.

Verifica-se, portanto, que nas condições extremas de degradação da rede de transportes em estudo o tempo de viagem alcançou uma média de 9:07 h correspondendo a uma elevação de cerca de 37% com relação ao tempo de viagem médio nas melhores condições de operação. Utilizando-se a metodologia proposta verifica-se que a queda de confiabilidade propicia um aumento da impedância observada a partir do tempo de viagem de mais 10% em tempo equivalente.

6 CONCLUSÕES

A confiabilidade do tempo de viagem é um fator relevante para permitir uma melhor compreensão e modelagem das impedâncias associadas aos tempos de viagem nas redes de transporte, e recentemente tem sido objeto de maior atenção por parte de estudos e pesquisas científicas na engenharia de transportes.

O desenvolvimento da Geografia Econômica e de Transportes e da Economia de Transportes tem demandado também um maior rigor no tratamento e na modelagem dos custos de transportes generalizados utilizados em modelos gravitacionais.

A teoria mais recente tem encontrado evidências de que para alcançar esse rigor demandado é necessário que seja dado um tratamento adequado na modelagem do tempo de viagem, incorporando a representação da influência da sua variabilidade e confiabilidade, de forma que a sua condição de variável aleatória esteja presente nos modelos utilizados.

Esta pesquisa buscou colaborar apresentando um procedimento que permite uma avaliação preliminar desses efeitos, e a aplicação prática com dados reais viabilizou uma perspectiva da sua ordem de grandeza. Nessa aplicação pode ser evidenciado que essa influência é significativa e que é recomendável que esses efeitos sejam avaliados na modelagem da impedância devida ao tempo de viagem.

A utilização do valor esperado do tempo de viagem, a média, não considera a variação da inclinação da função de utilidade, e deixa implícita uma compensação entre viagens adiantadas e viagens atrasadas. Pode-se considerar que esse é apenas um caso particular da função de utilidade, e que em termos formais a taxa de variação da influência do tempo de viagem na função de utilidade deve ser considerada de acordo com sua própria forma funcional. O tratamento dessa variação é recomendado na literatura pesquisada, e o procedimento desenvolvido avança alguns passos nesse sentido. O conceito de confiabilidade do tempo de viagem utilizado na modelagem empregada e as variações na função de utilidade encontradas na literatura pesquisada permitiram o desenvolvimento de uma forma de tomar em conta essa assimetria.

A aproximação utilizada para a forma funcional empregada nessa função de utilidade pode ter alguma influência nos resultados numéricos encontrados, no entanto os conceitos empregados são válidos qualquer que seja essa forma funcional.

O estabelecimento dos limites utilizados para a exequibilidade do tempo de viagem e para o tempo limite de atraso pode ser considerado como uma limitação da extensão dos resultados encontrados, no entanto é importante ressaltar que foi utilizada uma base de dados que abrange uma quantidade muito grande de informações sobre o tempo de viagem, e que foi suficiente para o estabelecimento de valores que estão dentro de parâmetros que podem ser considerados razoáveis.

A aproximação normal utilizada para as distribuições do tempo de viagem foi atenuada por dois motivos. Primeiro porque os testes de aderência apresentaram resultados com significância estatística, e segundo, porque foi utilizado um limite mínimo de tempo de viagem. Deve-se observar que de fato a distribuição log-normal é esperada como a mais aderente a esse tipo de dados, porém os resultados relativos à impedância devida aos atrasos, nesse caso são considerados de forma conservadora, ou seja a distribuição normal atenua esses efeitos, atuando de forma contrária à hipótese da tese.

As premissas utilizadas, portanto, não foram violadas, apenas foram admitidas algumas simplificações e aproximações, que encontram suporte e justificativa na literatura pesquisada. O modelo pode ser considerado como uma aproximação razoável para a medição dos efeitos da variação da confiabilidade do tempo de viagem nas funções de impedância devidas ao tempo de viagem.

Os resultados numéricos puderam ainda ser confrontados com o *buffer index* e se mostraram adequados na representação dos efeitos das variações da confiabilidade do tempo de viagem, o que contribui para sustentar a evidência de que essa aproximação é razoável.

A partir dos resultados da pesquisa e das questões nela levantadas, alguns aspectos merecem ser destacados como motivação de estudos sequenciais. O estabelecimento da forma funcional deve ser objeto de uma análise mais detalhada no que diz respeito a uma verificação e avaliação comparativa dos efeitos de variações

nessa forma funcional. A partir da base de dados levantada podem ser realizados experimentos em que essas variações sejam analisadas.

A normalização utilizada ao se inserir um destino *dummy* deve ser objeto de uma maior reflexão, de forma a que se possa ter maior clareza quanto às escalas que devem ser utilizadas no cálculo dos tempos de viagem equivalentes.

É recomendável também que o modelo de simulação seja utilizado com funções de densidade de probabilidade da forma log-normal e que os resultados sejam comparados, para que se verifiquem as extensões e limites de variação dos efeitos dessa mudança.

O estabelecimento dos limites de tempo de viagem com conotação de exeqüibilidade superior e inferior dá ensejo a um estudo que avalie a sua determinação analítica. A partir das restrições de velocidade impostas pela legislação e pela tecnologia pode-se formular ou desenvolver um procedimento para o estabelecimento do limite inferior, e a partir de uma análise econômica e financeira das operações de transporte de cargas, que considere as diferenças existentes entre as diversas operações de transporte, pode-se chegar ao limite superior.

A contribuição mais relevante, portanto, desta Tese é levantar a questão da necessidade de que a utilização do tempo de viagem na modelagem de alocação ou distribuição de viagens em modelos gravitacionais, nas suas diversas aplicações, deve tomar em conta uma ponderação relativa ao peso que é dado na sua função de utilidade para os atrasos e para as chegadas adiantadas. Esse é um tópico da teoria de planejamento de transportes que ainda está pouco explorado na literatura e em especial no Brasil pode ser considerado como uma abordagem inédita e que merece um maior esforço de desenvolvimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBRECHTS, L., COPPENS, (2003). Megacorridors : striking a balance between the space of flows and the space of places. *Journal of Transport Geography* 11.p.p.215-224.

ALI, T.H., RADHAKRISHNAN, S., PULAT, S., GADDIPATI, N.C. (2002). Relay design in freight transportation systems. *Transportation Research part E* v 38. p.p. 405-422.

ALMEIDA, E.S. (2003). Quanto custa o descaso com nossas estradas?*Anais do XVII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes vol 2 .p.p. 1312-1323.*

ALMEIDA, E.S. (2004). A duplicação da rodovia Fernão Dias: uma análise de equilíbrio geral. *Anais do XXXII Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia ;*

ALMEIDA, E.S. , HADDAD, E.A. , HEWINGS, G.J.D (2003). The transport-regional equity issue revisited. *Anais do XXXI Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia ;*

ALVIM, A.M. , WAQUIL, P.D. (2003). Cenários de Livre Comércio e os Efeitos sobre o Mercado de Arroz no Brasil: um modelo de alocação espacial e temporal. *Anais do XXXI Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia .*

ANGUERA, R. (2006). The Channel Tunnel—an ex post economic evaluation. *Transportation Research Part A* 40 p.p. 291–315 .

ASAKURA, Y. (1998). Reliability measures of an origin and destination pair in a deteriorated road network with variable flows. *Transportation Networks: Recent Methodological Advances*. Pergamon, Oxford, UK, p.p. 273-88.

ASAKURA, Y. e KASHIWADANI, M. (1991). Road network reliability caused by daily fluctuation of traffic flow. *Proceedings 19^o PTRC Summer Annual Meeting*. Brighton, p.p. 73-84.

AVV, 2004. Nota Mobility (Dutch: Nota Mobiliteit), AVV Transport Research Centre, Dutch Ministry of Transport, Public Works and Water Management. <<http://www.notamobiliteit.nl>>.

BALLOU, R.H. (2002). Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos (4^a Edição). *Artmed Editora S.A. Bookman*.

BATES, J., GILLIAM, C.,FEARON, J. e BLACK, I. (2004). Introducing Reliability Into Travel Demand Models.*Proceedings The Second International Symposium on Transportation Network Reliability*.Nova Zelândia, p.p 1-7.

BATISTA DA SILVA, M.V., SILVEIRA NETO, R.M. (2005). Determinantes da localização industrial no Brasil e geografia econômica : evidências para o período pós-real. *Anais do XXXIII Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia*.

BATLEY, R. (2007). Marginal valuations of travel time and scheduling, and the reliability premium. *Transportation Research Part E vol 43*. p.p 387- 408.

BIDERMAN, C. (2005). Indução a ocupação decorrente de uma obra viária: o caso do Rodoanel. *Anais do XXXIII Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia*.

BOOKBINDER, J.H.,HIGGINSON, J. H., (2002). Probabilistic modeling of freight consolidation by private carriage.. *Transportation Research part E v 38*. p.p 305-318.

BRATHEN, S. (2001). Do fixed links affect local industry? A Norwegian case study. *Journal of Transport Geography* 9,p.p. 25-38.

BRITTO, J., STALLIVIERI E VARGAS, M. (2005). Aglomeração espacial, cooperação e inovação na indústria brasileira: uma análise cross-sector exploratória. *Anais do XXXIII Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia* .

BRÖCKER, J. E SCHNEIDER, M. (2002). How does economic development in Eastern Europe affect Austria's regions? A multirregional general equilibrium framework. *Journal of Regional Science*, vol 42, n2, p.p. 257-285.

BUCKWALTER,D.W. (2001). Complex topology in the highway network of Hungary, 1990 and 1998. *Journal of Transport Geography* 9,p.p 125-135.

CAMPOS, A.C., GURGEL, A.C. (2004). Avaliação de políticas comerciais em modelos de equilíbrio geral com pressuposições alternativas quanto aos retornos à escala. *Anais do XXXII Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia* .

CAMARGO, O. E GONÇALVES, M. B. (2001). Identificação e Análise dos Principais Atributos Considerados no Transporte de Cargas Utilizando-se de Técnicas de Preferência Declarada. *Anais do XV ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes* , Vol 2 pp. 233-237 .

CARBONE,V. , STONE, M.A. (2005). Growth and relational strategies used by the European logistics service providers: Rationale and outcomes. *Transportation Research Part E* 41 p.p. 495–510.

CARVALHO, M. P. (1967). Curso de Estradas . *Editora Científica, Rio de Janeiro*.

CASTILHO, M.R. (2001). O acesso das exportações do Mercosul ao mercado europeu. *Anais do XXIX Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia* .

CASTRO, N. R.(2001). Custos de Transporte e Produção Agrícola no Brasil: 1970-1996. *Nemesis Working Paper* .

CASTRO, N., CARRIS, L. Y RODRIGUES, B. (1999). Custos de Transporte e a Estrutura Espacial do Comércio Brasileiro. *Pesquisa e Planejamento Econômico* 29 (3). p.p.347-400.

ÇETINKAYA, S., BOOKBINDER J. H. (2003). Stochastic models for the dispatch of consolidated shipments. *Transportation Research Part B* 37 p.p. 747–768.

CHEN, A.,YANG, H., LO, H.K., TANG, W.H. (2003). Capacity reliability of a road network : an assessment methodology and numerical results. *Transportation Research part B*. p.p.225-252.

CHEUNG, R.K. , TONG, J.H. , SLACK, B. (2003). The transition from freight consolidation to logistics: the case of Hong Kong. *Journal of Transport Geography* 11 p.p. 245–253.

CHOPRA, S. (2003). Designing the distribution network in a supply chain. *Transportation Research part E* 39. p.p.123-140.

COSTA, E.F., ARAÚJO JR., I.T.A., Bezerra,J.F., Melo, M.V. (2004). Matriz de insumo-produto de Pernambuco para 1999: Metodologia de cálculo e subsídios ao planejamento regional. *Anais do XXXII Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia* .

CUBELLS, J.V.P., ARMIÑANA, E.P., GÁÑEZ, J.B.S (2002). La influencia del coste económico el acondicionamiento de travessias urbanas. *Actas del V Congreso de Ingenieria del Transporte* v 2,p.p.1211-1218. Santander.

DANIELIS, R., MARCUCCI, E. , ROTARIS, L. (2005). Logistics managers stated preferences for freight service attributes . *Transportation Research Part E* 41 p.p. 201–215.

DANILEVICZ, A.M.F., GIUSTINA, C. D. , GUZEN, E. R., ARAÚJO, R. R. (2003). Uma análise exploratória dos problemas associados ao transporte rodoviário de carga por autônomos. *Anais do XVII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes vol 2* .p.p. 1203-1215.

DOLGUI , A., OULD-LOULY, M-A. (2002). A model for supply planning under lead time uncertainty. *International Journal of Production Economics* 78 p.p. 145}152.

DOMINGUES, E.P., LEMOS, M.B. (2004). Impactos inter-regionais de estratégias de Política Comercial para o Brasil. *Anais do XXXII Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia* ;

DOMINGUES, E.P., HADDAD, E.A. (2003). Análise de sensibilidade em modelos de equilíbrio geral computável: uma aplicação para a integração brasileira na ALCA. *Anais do XXXI Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia* ;

DUTRA, N. G. S. , BADIN, N. T. , NOVAES, A. G. N. , LUNA , M. M. M. , (2003). Uma análise sobre os problemas enfrentados e as práticas adotadas no transporte urbano de cargas. *Anais do XVII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes vol 2* .p.p. 1239-1249. **CAP 3**

ERADUS, P., SCHOEMAKERS,A., VAN DER HOORN, T. (2002). Four applications of the TIGRIS model in the Netherlands. *Journal of Transport Geography* 10.p.p 111-121;

ERLANDER, S E STEWART, N.F. (1988). The gravity model in transportation analysis: theory and extensions. Utrecht VSP BV. Holanda.

FAN,Y.Y. , KALABA, R.E. e MOORE, J. E. (2005). Arriving on time. *Journal of Optimization Theory and Applications*. Vol 127 n°3 p.p. 497- 513.

FAN, Y. e NIE, Y. (2006). Optimal routing for maximizing the travel time reliability. *Network Spatial Economics*. p.p 333-344.

FERNÁNDEZ L., J.E., DE CEA CH., J., SOTO O.A.(2003). A multi-modal supply–demand equilibrium model for predicting intercity freight flows. *Transportation Research Part B* 37 p.p. 615–640 ;

FERNANDES, A.L., PORCILE, G. (2004). Um modelo evolucionário Norte-Sul. *Anais do XXXII Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia* ;??

FLEMING, DOUGLAS K. AND YEHUDA HAYUTH,(1994) "Spatial Characteristics of Transportation Hubs: Centrality and Intermediacy," *Journal of Transport Geography*. 2(1), pp.3-18.

FONSECA, M.B., HIDALGO, A.B. (2004). Os impactos da ALCA sobre as exportações agrícolas brasileiras. *Anais do XXXII Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia* ;

FULLER S., YU T.H., FELLIN L., LALOR A., KRAJEWSKI R.(2002) Effects of Improving Transportation/Logistics Infrastructure in South America on Competitiveness in World Grain Markets. *TRF South America Journal Abstract*

GARRIDO, R. A. , MAHMASSANI , H. S. (2000). Forecasting freight transportation demand with the space–time multinomial probit model. *Transportation Research Part B* 34 p.p. 403–418

GODFREY, G.A. , POWELL, W.B. (2000). Adaptive estimation of daily demands with complex calendar effects for freight transportation. *Transportation Research Part B* 34 p.p.451–469.

GOETZ, A.R.(2006). Transport Geography: Reflecting on a subdiscipline and identifying future research trajectories .The insularity issue in Transport Geography. *Journal of Transport Geography* 14 p.p. 230–231;

GONÇALVES, P.G., GUALDA, N.D.F. (2005). Contribuição ao estudo de conflitos na implantação do ferroanel na região metropolitana de São Paulo. *Anais do XIX ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes vol I p.p. 286-296* ;

GUILHOTO, J.J.M. , SESSO FILHO, U.A. (2003). The Productive Structure of the Amazon Region States and The Rest of Brazil: A Comparative Study Using an Interregional Input-Output System. *Anais do XXXI Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia* ;

GUJARATI, D.N. (2000). Econometria Básica. *Makron Books do Brasil Editora* ;

GUTIÉRREZ, P. E URBANO, P.(1996). Accessibility in the European : the Impact of the Trans-European road network. *Journal of Transport Geography. Vol 4 , n. I , p.p 15-25, Elsevier Science Ltd* ;

HA, M-S. (2003). A comparison of service quality at major container ports: implications for Korean ports. *Journal of Transport Geography 11p.p. 131–137* ;

HADDAD, E.A., PEROBELLI, F.S (2004). Trade liberalization and regional inequality: do transportation costs impose a spatial poverty trap? . *Anais do XXXII Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia* ;

HADDAD, E.A. , DOMINGUES, E.P. (2003). Interstate Trade and Regional Development: An (Integrated) Interregional CGE Approach. *Anais do XXXI Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia* ;

HAMAD, R., GUALDA, N.D.F., .(2005). Modelo para localização de instalações em escala global envolvendo quatro elos da cadeia logística. *Anais do XIX ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes vol II p.p. 1653-1664*

HARKER,P.T. (1987). Predicting intercity freight flows. VNU Science Press BV. Utrecht, Holanda.

HIDALGO, A.B. , VERGOLINO, J.R. (1998). O Nordeste e o comércio inter-regional e intrnacional: um teste dos impactos por meio do modelo gravitacional. *Brazilian Journal of Applied Economics*, v.2, n. 4, p.p. 707-725 ;

HIMANEN, V., LEE-GOSSELIN, M., PERRELS, A. (2005). Sustainability and the interactions between external effects of transport. *Journal of Transport Geography* 13 p.p. 23–28 .

HOLLANDER, Y. e LIU, R. (2008). Estimation of the distribution of travel times by repeated simulation. *Transportation Research Part C16*. p.p. 212 – 231.

IANNONI, A.P. , MORABITO, R. (2006). A discrete simulation analysis of a logistics supply system. *Transportation Research Part E* 42 p.p. 191–210.

JARA-DÍAZ, S.R., BASSO, L.J. (2003). Transport cost functions, network expansion and economies of scope. *Transportation Research part E* vol 39. p.p 271-288.

JONG, J-C., SCHONFELD, P. (2003). An evolutionary model for simultaneously optimizing three-dimensional highway alignments. *Transportation Research Part B* 37 p.p. 107–128.

KHOUJA,M. (2003). Optimizing inventory decisions in a multi-stage multi-customer supply chain. *Transportation Research Part E* 39 p.p. 193–208.

KILKENNY, M. (1998). Transport costs and rural development. *Journal of Regional Science*, Vol 38, n2, p.p.293-312 .

KIM, K.H., KIM, H.B. (2002). The optimal sizing of the storage space and handling facilities for import containers. *Transportation Research Part B* 36 p.p.821–835 .

KOCKELMAN, K.M., JIN, L. , ZHAO, Y. , RUÍZ-JURI, N. (2005). Tracking land use, transport, and industrial production using random-utility-based multiregional input–output models: Applications for Texas trade. *Journal of Transport Geography* 13 p.p. 275–286 .

KRUGMAN, P.R., VENABLES, A.J. (1996). Integration, specialization, and adjustment. *European Economic Review* 40 p.p. 959-967.

KUME,H., PIANI,G., MIRANDA, P., CASTILHO, M. (2004). Acordo de Livre Comércio Mercosul – União Européia: uma estimativa dos impactos no comércio brasileiro. *Anais do XXXII Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia*.

LAI, K., NGAI, E.W.T. , CHENG, T.C.E. (2002). Measures for evaluating supply chain performance in transport logistics . *Transportation Research Part E* 38 p.p. 439–456 .

LIMA, M. L. P. E GONÇALVES, M. B. (2001). O Uso dos Conceitos Microeconômicos de Taxa Marginal de Substituição e Elasticidade a Partir de Um Experimento de Preferência Declarada num Corredor de Transporte de Cargas Agrícolas. *Anais do XV ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, vol 2 p.p. 299-307 .

LIMA NETO, V.C., ALDIGUERI, D.R., ROCHA,C.H., YAMASHITA, Y. , KAWAMOTO, E. (2005). Metodologia para avaliação dos benefícios de intervenções em rodovias concedidas para os usuários diretos. *Anais do XIX ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes vol I* p.p. 297-308.

LIN, C. (2001). The freight routing problem of time-definite freight delivery common carriers. *Transportation Research Part B* p.p. 525-547.

LIU, H. , X. , RECKER, W. e CHEN, A. (2004). Uncovering the contribution of travel time reliability to dynamic route choice using real-time looping data. *Transportation Research Part A* vol 38. p.p 435 – 453.

LINT, J.W.C , ZUYLEN, H.J e TU,H. (2008). Travel time unreliability on freeways: Why measures based on variance tells only half of the story. *Transportation Research Part A*, vol 42, p.p 258 – 277.

LO, H. K. , CHEN , A. (2000). Traffic equilibrium problem with route-specific costs: formulation and algorithms. *Transportation Research Part B* 34 p.p.493–513.

LOFGREN, H. E ROBINSON, S. (2002). Spatial-network, general-equilibrium model with a stylized application. *Regional Science and Urban Economics*, 32, p.p. 651-671.

LOTTI,C.P., WIDMER, J.A., SCHAAL, R.E. (2002). Propostas de um método de sistematização e levantamento de dados para o estudo da relação de acidentes com as características geométricas da rodovia. *Anais do XVI ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes vol I p.p. 405-416.*

LU, C.S.(2003)The impact of carrier service attributes on shipper-carrier partnering relationships: a shipper's perspective. *Transportation Research part E* vol. 39. p.p 399-415.

LYMAN, K. (2007). Travel time reliability in regional transportation planning. *Dissertação de Mestrado, Universidade de Portland.*

MAGALHÃES, M.T.Q., TEIXEIRA, G.L., YAMASHITA, Y. (2004). Indicadores de cobertura espacial para diagnóstico da dotação de estrutura de circulação rodoviária brasileira. *Anais do XVIII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes vol II p.p.880-891.*

MAGALHÃES, M.T.Q., YAMASHITA, Y. (2005). Metodologia para desenvolvimento de sistemas de indicadores para o planejamento nacional de transportes. *Anais do XIX ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes vol I p.p.250-261.*

MANCUSO, P. , REVERBERI, P. (2003) . Operating costs and market organization in railway services. The case of Italy, 1980–1995. *Transportation Research Part B* 37 p.p.43–61.

MÂNICA, A. G. (2005). Avaliação técnico-econômica da malha rodoviária do lote dois pertencente ao programa CREMA/RS através do modelo HDM-4. *Anais do XIX ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes vol I* p.p. 85-96.

MASON, S.J., RIBERA, P.M., FARRIS, J.A., KIRK, R. G. (2003). Integrating the warehousing and transportation functions of the supply-chain. *Transportation Research part E* vol 39. p.p 141-159.

MEIXELL, M.J., GARGEYA, V.B. (2005). Global supply chain design: A literature review and critique. *Transportation Research Part E* 41p.p. 531–550.

MENG, Q., YANG, H. (2003). Benefit distribution and equity in road network design. *Transportation Research part B* 39. p.p. 19-35.

MISHALANI, R.G., KOUTSOPOULOS, H.N. (2002). Modelling the spatial behavior of infrastructure condition. *Transportation Research Part B* p.p. 171-194.

MONASTERIO, L.M. , ÁVILA, R.P. (2004). Uma análise espacial do crescimento econômico do Rio Grande do Sul. *Anais do XXXII Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia*.

MON-MA, M.L., SETTI, J.R.A.(2003). O efeito das faixas adicionais de subida na operação no nível de serviço das rodovias de pista simples. *Anais do XVII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes vol 2* .p.p.450-461.

NAGURNEY, A. , DONG, J., ZHANG, D. (2002). A supply chain network equilibrium model. *Transportation Research Part E* 38 (2002) 281–303.

NAGURNEY, A. , MATSYPURA, D. (2005). Global supply chain network dynamics with multicriteria decision-making under risk and uncertainty. *Transportation Research Part E* 41 p.p. 585–612.

NAGURNEY, A. (2006). On the relationship between supply chain and transportation network equilibria: A supernetwork equivalence with computations. *Transportation Research Part E* 42 p.p. 293–316.

NOVAES, A. G. (2001). *Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição*. Editora Campus, Rio de Janeiro.

NOVAES, A. G., FRAZZON, E.M. (2005). Sustentabilidade e macro-logística: conceitação e perspectivas. *Anais do XIX ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes vol II* p.p.1811-1821.

MARTIN,P.,ROGERS,C.A.,(1995).Industrial location and public infrastructure.*Journal of International Economics* 39.

MARTIN,P.,OTTAVIANO,G.I.P.,(1999). Growing locations: Industry location in a model of endogenous growth. *European Economic Review* 43.

MARTINS, R. S. E MARTINS, P. C. (2001). Os Investimentos na Infra-Estrutura de Transporte como Estratégia de Política de Desenvolvimento Regional no Brasil. *Anais do XV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes Vol 2 pp. 205-213, Campinas*.

PAEZ, A. (2006). Exploring contextual variations in land use and transport analysis using a probit model with geographical weights. *Journal of Transport Geography* 14 p.p. 167–176.

PARK, M. , KIM, S. , PARK, C.e CHON, K.(2007). Transportation network design considering travel time reliability. *Proceedings 2007 Intelligent Transportation Systems Conference , Seattle, USA*, p.p 496 – 502.

PAZ, L.S., MELLO FRANCO NETO, A.A. (2003). Brazilian border and Mercosur integration effects: an assessment using the gravity model. *Anais do XXXI Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia*.

PATRIKSSON, M. (1994). The traffic assignment problem. Models and Methods. Utrecht VSP BV. Holanda.

PECKER, C.C., CYBIS, H.B.B., LINDAU, L.A., RIBEIRO, J.L.D. (2003) . O efeito das características geométricas e da demanda no desempenho de rodovias de pista simples com faixa adicional. *Anais do XVII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes vol 2* .p.p. *Anais do XVII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes vol 1* .p.p. 439-449. Rio de Janeiro.

PEDERSEN, P. O. (2001). Freight transport under globalisation and its impact on Africa. *Journal of Transport Geography* vol 9 .p.p. 85-99.

PEREIRA, G. R. , RATTON NETO, H. X. , (2003). A regulamentação e a distribuição de cargas em centros urbanos. *Anais do I Rio de Transportes em CD-ROM*. Rio de Janeiro.

PEROBELLI, F., HADDAD, E.A. (2003). Brazilian Interregional Trade (1985-1996): An Exploratory Spatial Data Analysis. *Anais do XXXI Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia*.

PUGA, D. (1999). The rise and fall of regional inequalities. *European Economic Review* 43 p.p. 303—334 .

PUGA,D.(2002).European regional policies in light of recent location theories. *Journal of Economic Geography* 2.p.p. 373-406.

RABINOVICH, E. , EVERS, P. T.(2002). Enterprise-wide adoption patterns of inventory management practices and information systems . *Transportation Research Part E* 38 p.p. 389—404.

RATTON FILHO, H.X. (1979). Elementos para projeto de ferrovias. *Notas de Aula, Curso de Engenharia de Fortificação e Construção, Instituto Militar de Engenharia – IME* .

RECKER, W., CHUNG, Y. , PARK, J. , WANG, L. , CHEN, A. , JI, Z. , LIU, H. , HORROCKS, M. e OH , J.S. (2005). Considering risk-taking behavior in travel time reliability. *Institute of Transportation Studies, Universidade da Califórnia*.

ROMAIN, A., TRIP, J.J., DE VRIES, J. (2003). The multi-scalar complexity of infrastructure planning: evidence from the Dutch-Flemish megacorridor. *Journal of Transport Geography* 11.p.p. 205-213.

ROSA, D.P., RATTON NETO, H.X. (2005). Plataformas logísticas no Brasil: ampliação de funções e de agregação de valor no entorno dos terminais de transporte. *Anais do XIX ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes vol II p.p. 1843-1854* .

ROTHMULLER, L. (2003). Does FDI matter for trade in Brazil? An application of the gravity model. *Anais do XXXI Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia* .

RUIZ, R.M., DOMINGUES, E.P. E MORO, S. INDUSTRIAL CORES AND PERIPHERAL IN BRAZIL (2005). *Anais do XXXIII Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia*.

SAMPSON, ROY J. E FARRIS, MARTIM T. (1975) Domestic Transportation . *Houghton Mifflin Company, Boston, Estados Unidos da América*.

SANTOS, A.C., ZANDONADE, E.,CAMPOS,V.B.G. (2004). Proposta de um modelo para análise da acessibilidade no transporte de cargas. *Anais do XVIII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes vol II p.p.856-866*.

SHAW, S-L. (2006) . What about “Time” in Transportation Geography? *Journal of Transport Geography* 14 p.p. 237–240.

SHEU, J. B. (2003) . Locating manufacturing and distribution centers: An integrated supply chain-based spatial interaction approach. *Transportation Research Part E* 39 p.p. 381–397 .

SHINGAL, N., FOWKES, T., (2002) Freight mode choice and adaptive stated preferences. *Transportation Research part E* v 38. p.p 367-378.

SMALL, K. (1982). The scheduling of consumer activities: work trips. *American Economic Review* 72 (3), p.p 251-260.

SOUZA, F.L. (2004). A localização da indústria de transformação brasileira nas últimas três décadas. *Anais do XXXII Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia*.

SUÁREZ, A.J.M. (2002). Las condiciones meteorológicas y su influencia en la circulación y la seguridad vial. *Actas del V Congreso de Ingeniería del Transporte* v 2.p.p.1211-1218. Santander.

SUZIGAN, W., FURTADO, J. E GARCIA, R. (2005). Designing policies for local production systems: a methodology based on evidence from Brazil. *Anais do XXXIII Encontro Nacional de Economia da ANPEC- Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia* .

SWAIT, J.(2001). A non-compensatory choice model incorporating attribute cutoffs. *Transportation Research Part B* p.p. 903-928.

SWENSETH, S.R. , GODFREY, M.R. (2002). Incorporating transportation costs into inventory replenishment decisions. *International Journal of Production Economics* 77 p.p. 113–130 .

TAYLOR, M.A.P. , SEKHAR, S. V. C. e D' ESTE, GM (2006). Application of accessibility based methods for vulnerability analysis of strategic road networks. *Network Spatial Economics*, vol 6, p.p. 267 – 291 .

TRINTA, Z.M., RIBEIRO, P.C.M. (2003). Análise da configuração viária das travessias urbanas. *Anais do I Rio de Transportes*, em CD-ROM. Rio de Janeiro.

TRIP, J.J. , BONTEKONING, Y. (2002). Integration of small freight flows in the intermodal transport system. *Journal of Transport Geography* 10 p.p. 221–229

VALENTE,A.M., PASSAGLIA,E. E NOVAES,A.G.(2003). Gerenciamento de Transporte e Frotas. *Editora Pioneira*.

VALLIM FILHO, A.R.A. E GUALDA, N.F.(2004). Contribuições à modelagem matemática do problema da localização de centros de distribuição de carga. *Anais do XVIII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes vol II* p.p.1086-1097 .

VOORHEES, A.M. (1954). Forecasting peak hours of travel. *Highway Research Board Bulletin* 203. p.p 37-46.

WANG, S-E., LIAO, C-H. (2006). Cost structure and productivity growth of the Taiwan Railway. *Transportation Research Part E* 42 p.p. 317–339 .

WEE, B. , RIETVELD, P. , MEURS, H. (2006). Is average daily travel time expenditure constant? In search of explanations for an increase in average travel time. *Journal of Transport Geography* 14 (2006) 109–122 .

TEXAS TRANSPORTATION INSTITUTE AND CAMBRIDGE SYSTEMS INC., (2006). Travel Time Reliability: Making It There On Time, All The Time.<http://www.ops.fhwa.dot.gov/publications/tt_reliability/index.htm> (retrieved January 30, 2006).

ANEXO I

PROGRAMA FONTE

```

Public Sub SimulaConfiabilidade()
Tlie = Sheets("PARAMETROS").Cells(1, 2)
Tlse = Sheets("PARAMETROS").Cells(2, 2)
n = Sheets("DADOS").Cells(1, 1).End(xlDown).Row
'Sheets("DADOS").Names.Add Name:="LISTA_MEDIAS", RefersToR1C1:= _
'   "DAD OS!R1C2:R" & n & "C"
'Sheets("CALCULO").Cells(9, 2).FormulaR1C1 = "=MIN(DADOS!LISTA_MEDIAS)"
tdummy = 6
Q = Sheets("PARAMETROS").Cells(3, 2)

```

```

Dim Rotulos()
Dim Tlat()
Dim Tvi()
Dim Vi()
Dim CFi()
Dim ViMedia()
Dim SomaVi()
Dim CFiMedia()
Dim Fi()
Dim SomaFi()
Dim Dist()
Dim ViCalibrado()

```

```

Dim TviDummy()
Dim ViDummy()
Dim SomaViDummy()
Dim FiDummy()
Dim SomaFiDummy()
Dim ViMediaDummy()
Dim FiMediaDummy()

```

```

ReDim Rotulos(1 To n)
ReDim Tlat(1 To Q)

```

```

ReDim Tvi(1 To Q, 1 To n)
ReDim Vi(1 To Q, 1 To n)
ReDim CFi(1 To n)
ReDim ViMedia(1 To Q, 1 To n)
ReDim SomaVi(1 To Q, 1 To n)
ReDim CFiMedia(1 To Q, 1 To n)
ReDim Fi(1 To Q, 1 To n)
ReDim SomaFi(1 To Q)
ReDim Dist(1 To n, 1 To 2)
ReDim ViCalibrado(1 To n)
ReDim TviDummy(1 To Q)
ReDim ViDummy(1 To Q)
ReDim ViMediaDummy(1 To Q)
ReDim SomaViDummy(1 To Q)
ReDim FiDummy(1 To Q)
ReDim SomaFiDummy(1 To Q)
ReDim FiMediaDummy(1 To Q)
For i = 1 To n
    Rotulos(i) = Sheets("DADOS").Cells(i, 1)
    For j = 1 To 2
        Dist(i, j) = Sheets("DADOS").Cells(i, j + 1)
    Next j
Next i
For i = 1 To Q
    'SIMULAR Tempo de Viagem
    For j = 1 To n
        mi = Dist(j, 1)
        sigma = Dist(j, 2)
        Sheets("CALCULO").Range("B3") = mi
        Sheets("CALCULO").Range("B4") = sigma
        Sheets("CALCULO").Cells(5, 2).FormulaLocal = Rnd
        Sheets("CALCULO").Range("B6").Formula = "= NORMINV(B5, B3,B4)"
        Tvi(i, j) = Sheets("CALCULO").Cells(6, 2)
    Next j
Next i

```

```

'LIMITE LEGAL DE 80 KM/H

If Tvi(i, j) < 6 Then Tvi(i, j) = 6

If Tvi(i, j) > Tlse Then Tvi(i, j) = Tlse

Fi(i, j) = 1 / Tvi(i, j)

SomaFi(i) = SomaFi(i) + Fi(i, j)

Next j

SomaFi(i) = SomaFi(i) + (1 / tdummy)

'SIMULAR O TEMPO LIMITE DE ATRASO

Sheets("CALCULO").Cells(5, 2).FormulaLocal = Rnd

probabilidade = Sheets("CALCULO").Cells(5, 2)

Tlat(i) = ((Tlse - Tlie) * probabilidade) + Tlie

'CALCULAR A DISTRIBUIÇÃO DE VIAGENS

For j = 1 To n

    If Tvi(i, j) <= Tlat(i) Then

        Vi(i, j) = (n + 1) * (Fi(i, j) / SomaFi(i))

        CFi(j) = CFi(j) + 1

    Else

        Vi(i, j) = ((n + 1) * ((1 / Tlat(i)) / SomaFi(i))) * ((Tlse - Tvi(i, j)) / (Tlse - Tlat(i)))

    End If

    If i = 1 Then

        SomaVi(i, j) = Vi(i, j)

    Else

        SomaVi(i, j) = SomaVi(i - 1, j) + Vi(i, j)

    End If

    ViMedia(i, j) = SomaVi(i, j) / i

    CFiMedia(i, j) = CFi(j) / i

Next j

TviDummy(i) = tdummy

FiDummy(i) = 1 / tdummy

ViDummy(i) = (n + 1) * (FiDummy(i) / SomaFi(i))

If i = 1 Then

    SomaViDummy(i) = SomaViDummy(i) + ViDummy(i)

```

```

    SomaFiDummy(i) = SomaFiDummy(i) + FiDummy(i)
Else
    SomaViDummy(i) = SomaViDummy(i - 1) + ViDummy(i)
    SomaFiDummy(i) = SomaFiDummy(i - 1) + FiDummy(i)
End If
ViMediaDummy(i) = SomaViDummy(i) / i
FiMediaDummy(i) = SomaFiDummy(i) / i

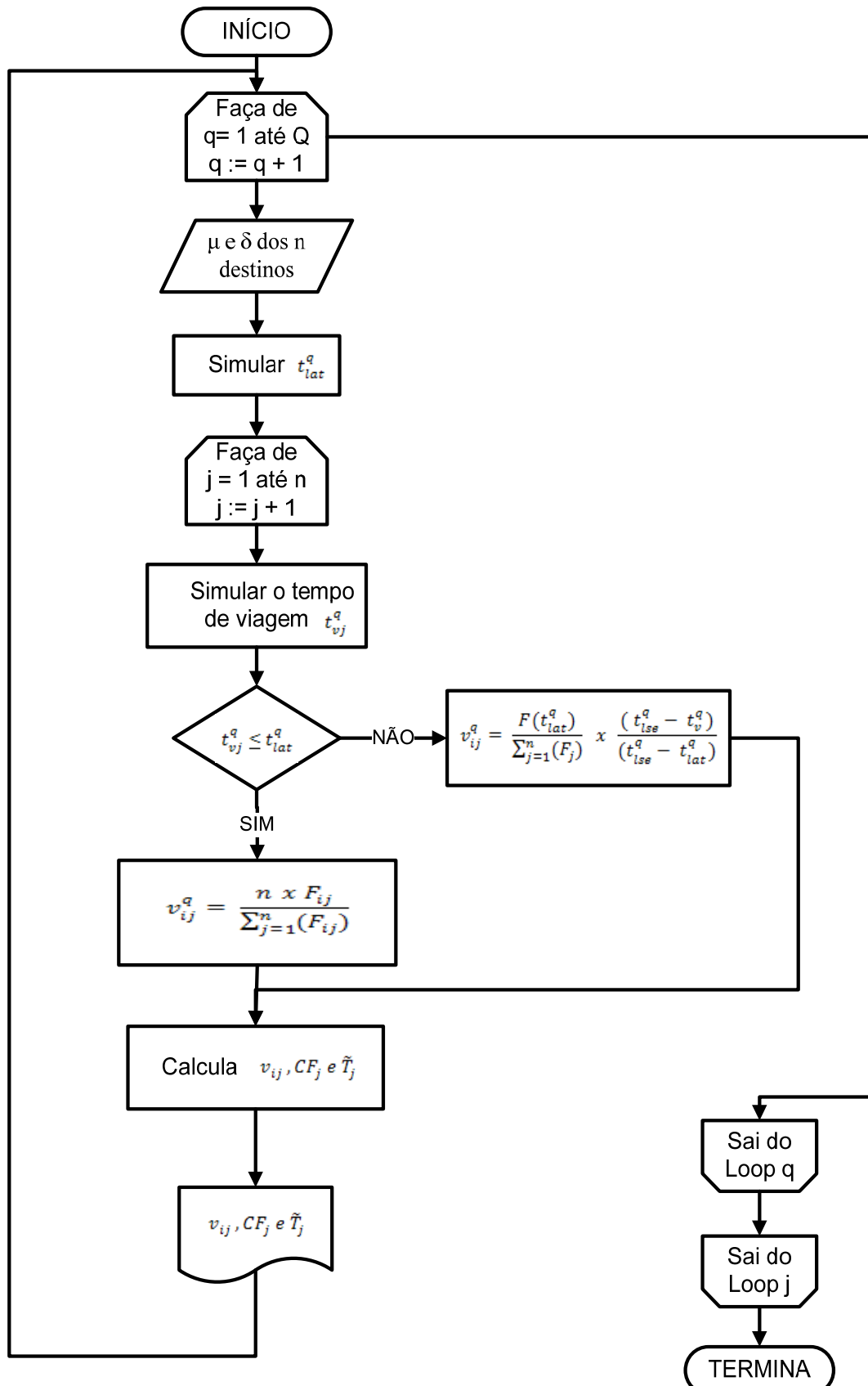
fitotal = fitotal + SomaFi(i)
mediafitotal = fitotal / i
Sheets("CALCULO").Cells(10, 2) = i
Next i

teqdummy = ((n + 1) / (mediafitotal * ViMediaDummy(Q)))
'CALIBRANDO Vi
For i = 1 To n
    ViCalibrado(i) = (1 / ViMediaDummy(Q)) * ViMedia(Q, i)
Next i

For i = 1 To n
    Sheets("RESULTADO").Cells(i + 1, 1) = Rotulos(i)
    Sheets("RESULTADO").Cells(i + 1, 2) = Dist(i, 1)
    Sheets("RESULTADO").Cells(i + 1, 3) = Dist(i, 2)
    Sheets("RESULTADO").Cells(i + 1, 4) = ViMedia(Q, i)
    Sheets("RESULTADO").Cells(i + 1, 5) = CFiMedia(Q, i)
    Sheets("RESULTADO").Cells(i + 1, 6) = ((n + 1) / (mediafitotal * ViMedia(Q, i)))
    Sheets("RESULTADO").Cells(i + 1, 7) = ((n + 1) / (mediafitotal * ViCalibrado(i)))
Next i

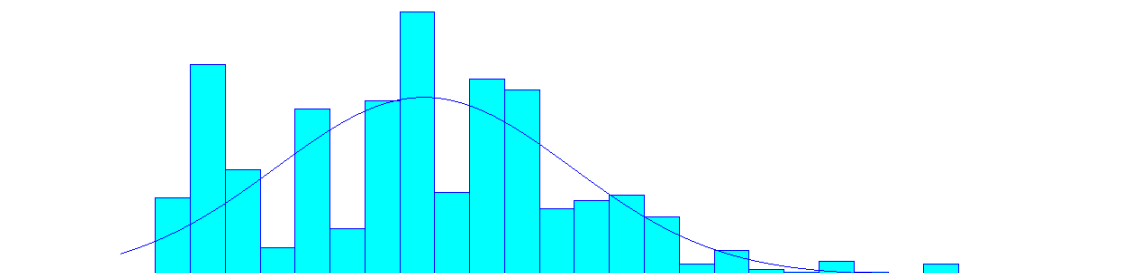
Sheets("RESULTADO").Cells(n + 2, 1) = "DUMMY"
Sheets("RESULTADO").Cells(n + 2, 2) = 6
Sheets("RESULTADO").Cells(n + 2, 4) = ViMediaDummy(Q)
Sheets("RESULTADO").Cells(n + 2, 7) = ((n + 1) / (mediafitotal * ViMediaDummy(Q)))
Sheets("RESULTADO").Cells(n + 3, 1) = mediafitotal
End Sub

```

ANEXO II
DISTRIBUIÇÕES DO TEMPO DE VIAGEM

Janeiro de 2003



Distribuição de freqüência do tempo de viagem jan-2003.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	17
Graus de liberdade	14
Estatística χ^2	242
Valor p	0,005

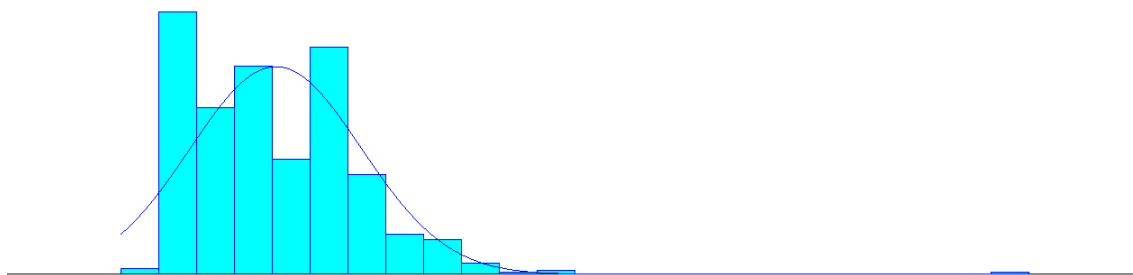
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,0599
Valor p	0,0157

Características da Amostra:

Número de observações	682
Valor mínimo	6,25
Valor máximo	10,1
Média	7,49
Desvio-Padrão	0,728

Fevereiro de 2003



Distribuição de frequência do tempo de viagem fev-2003.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	9
Graus de liberdade	6
Estatística χ^2	179
Valor p	0,005

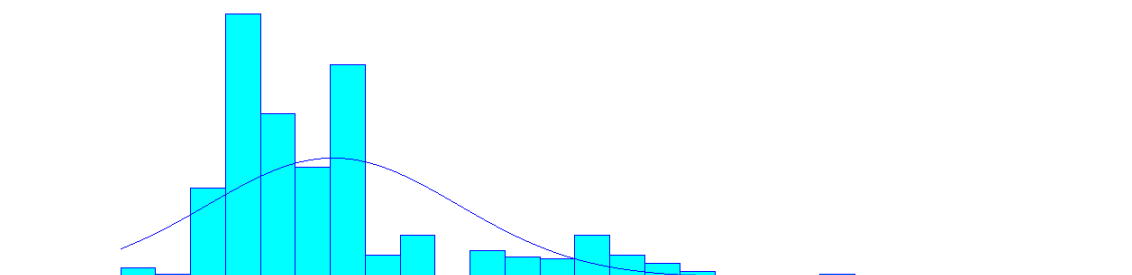
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,0847
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	616
Valor mínimo	6,25
Valor máximo	12,8
Média	7,20
Desvio-Padrão	0,66

Março de 2003



Distribuição de frequência do tempo de viagem mar-2003.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	14
Graus de liberdade	11
Estatística χ^2	578
Valor p	0,005

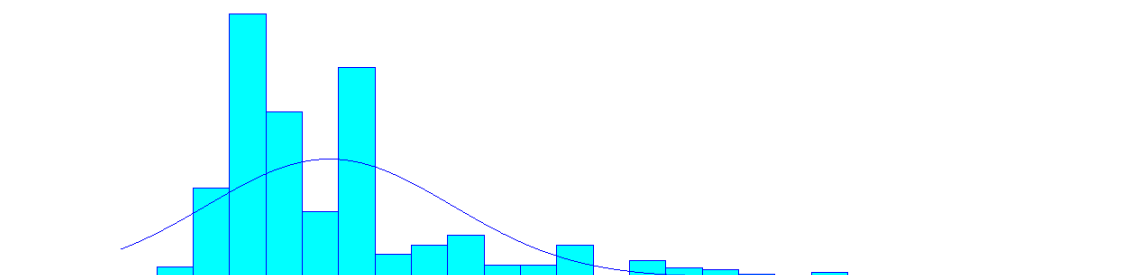
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,132
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	682
Valor mínimo	6,00
Valor máximo	9,50
Média	6,90
Desvio-Padrão	0,532

Abril de 2003



Distribuição de freqüência do tempo de viagem abr-2003.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	14
Graus de liberdade	11
Estatística χ^2	474
Valor p	0,005

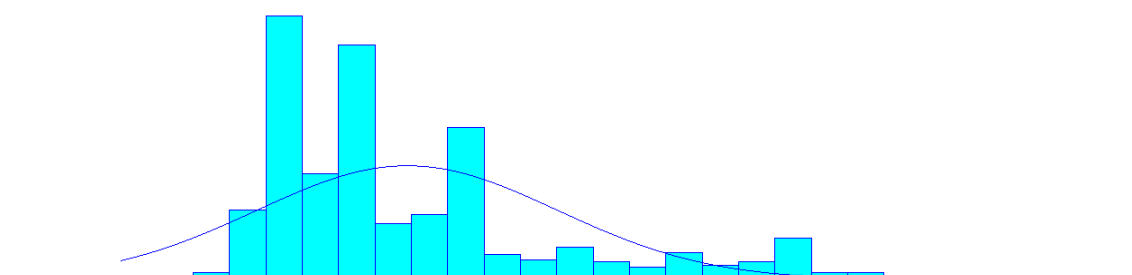
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,156
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	660
Valor mínimo	6,00
Valor máximo	9,50
Média	6,88
Desvio-Padrão	0,522

Maio de 2003



Distribuição de frequência do tempo de viagem mai-2003.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	17
Graus de liberdade	14
Estatística χ^2	551
Valor p	0,005

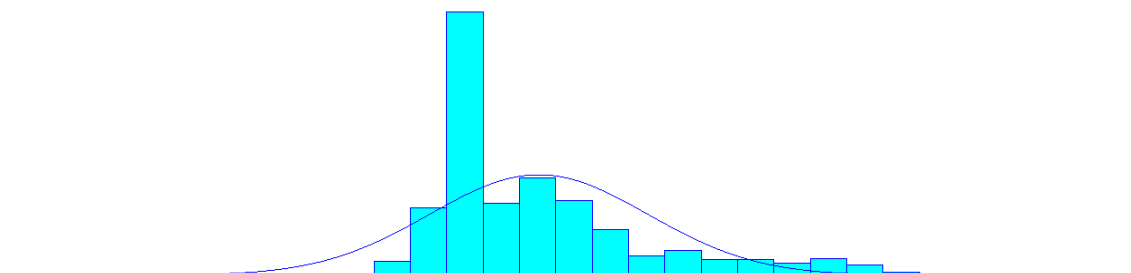
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,141
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	660
Valor mínimo	6,16
Valor máximo	8,50
Média	6,86
Desvio-Padrão	0,455

Junho de 2003



Distribuição de freqüência do tempo de viagem jun-2003.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	14
Graus de liberdade	11
Estatística χ^2	636
Valor p	0,005

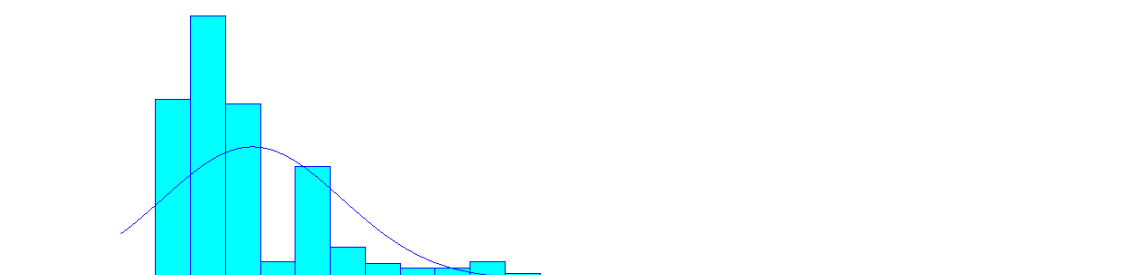
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,134
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	660
Valor mínimo	5,41
Valor máximo	8,50
Média	6,81
Desvio-Padrão	0,446

Julho de 2003



Distribuição de frequência do tempo de viagem jul-2003.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	10
Graus de liberdade	7
Estatística χ^2	431
Valor p	0,05

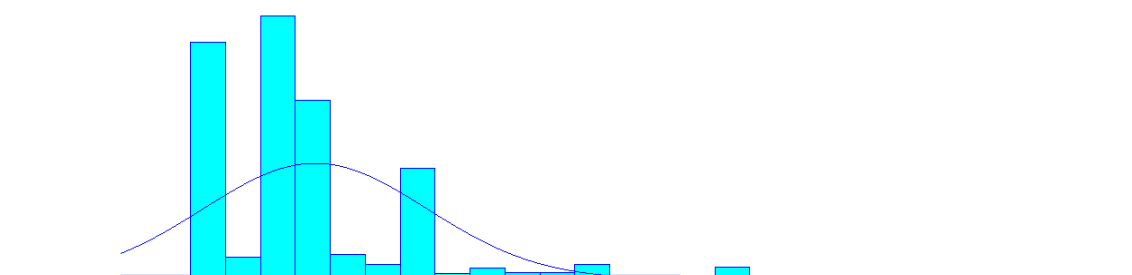
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,202
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	682
Valor mínimo	6,08
Valor máximo	11,00
Média	6,72
Desvio-Padrão	0,495

Agosto de 2003



Distribuição de frequência do tempo de viagem ago-2003.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	13
Graus de liberdade	10
Estatística χ^2	732
Valor p	0,005

Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,19
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	682
Valor mínimo	6,00
Valor máximo	8,83
Média	6,64
Desvio-Padrão	0,371

Setembro de 2003



Distribuição de frequência do tempo de viagem set-2003.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	7
Graus de liberdade	4
Estatística χ^2	258
Valor p	0,005

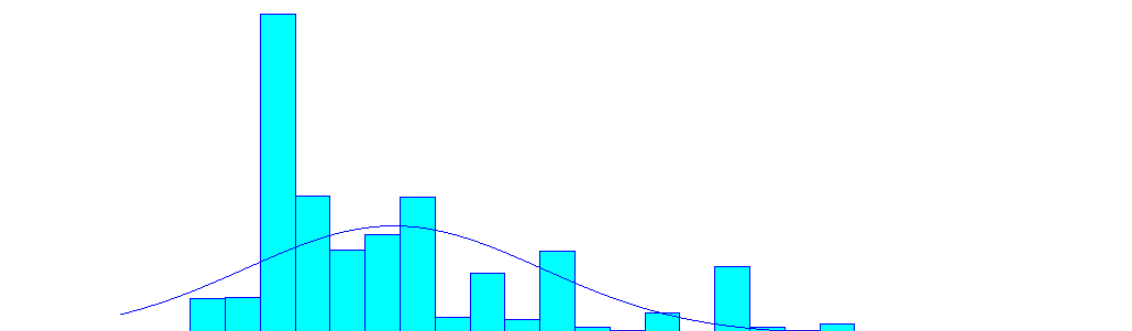
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,158
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	600
Valor mínimo	6,00
Valor máximo	12,50
Média	6,72
Desvio-Padrão	0,52

Outubro de 2003



Distribuição de freqüência do tempo de viagem out-2003.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	17
Graus de liberdade	14
Estatística χ^2	735
Valor p	0,005

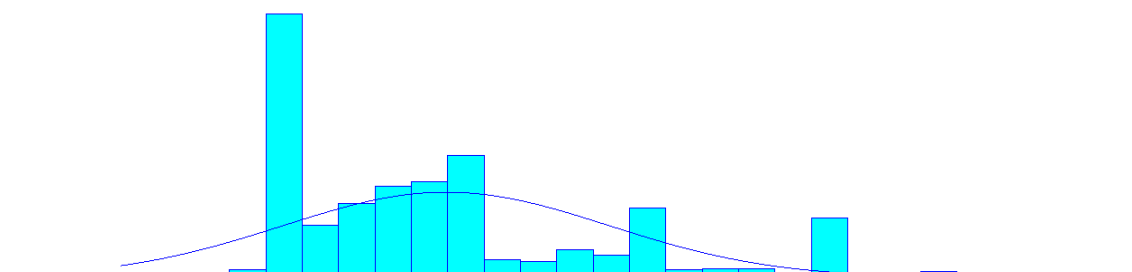
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,131
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	682
Valor mínimo	6,16
Valor máximo	9,00
Média	6,90
Desvio-Padrão	0,49

Novembro de 2003



Distribuição de freqüência do tempo de viagem nov-2003.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	18
Graus de liberdade	15
Estatística χ^2	821
Valor p	0,005

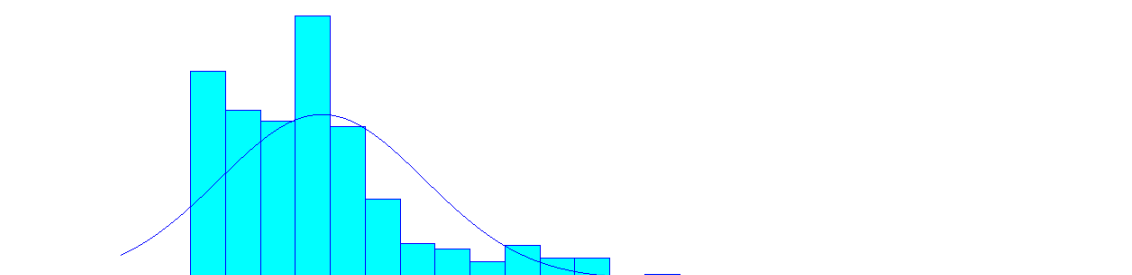
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,146
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	660
Valor mínimo	6,16
Valor máximo	8,33
Média	6,91
Desvio-Padrão	0,458

Dezembro de 2003



Distribuição de freqüência do tempo de viagem dez-2003.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	13
Graus de liberdade	10
Estatística χ^2	319
Valor p	0,005

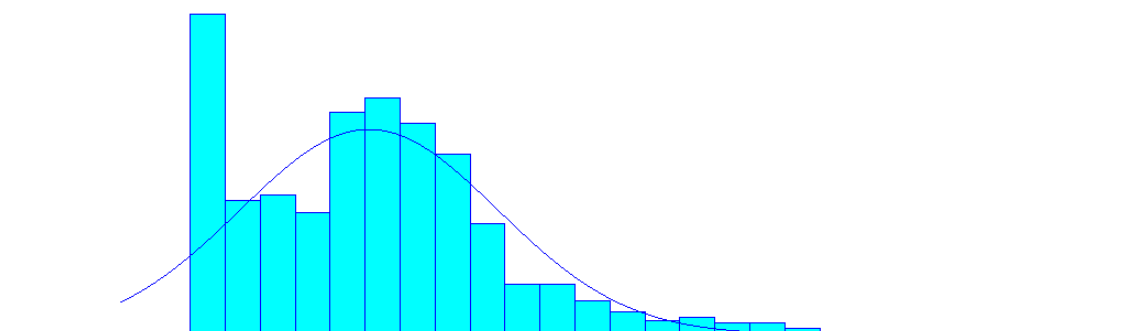
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,188
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	682
Valor mínimo	6,33
Valor máximo	10,30
Média	7,03
Desvio-Padrão	0,525

Janeiro de 2004



Distribuição de freqüência do tempo de viagem jan-2004.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	15
Graus de liberdade	12
Estatística χ^2	263
Valor p	0,005

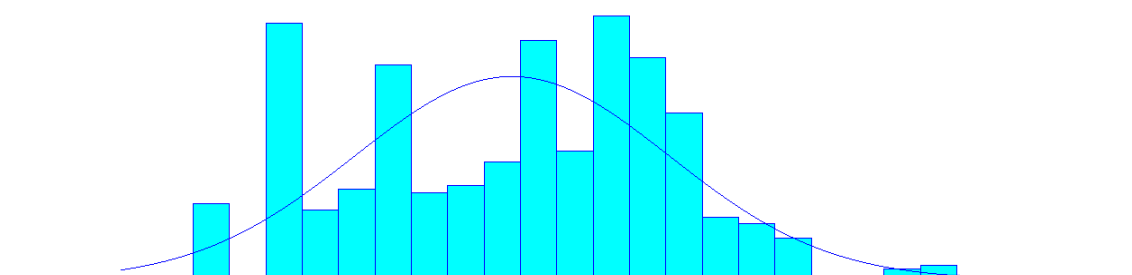
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,0798
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	682
Valor mínimo	6,30
Valor máximo	10,40
Média	7,39
Desvio-Padrão	0,669

Fevereiro de 2004



Distribuição de freqüência do tempo de viagem fev-2004.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	18
Graus de liberdade	15
Estatística χ^2	267
Valor p	0,005

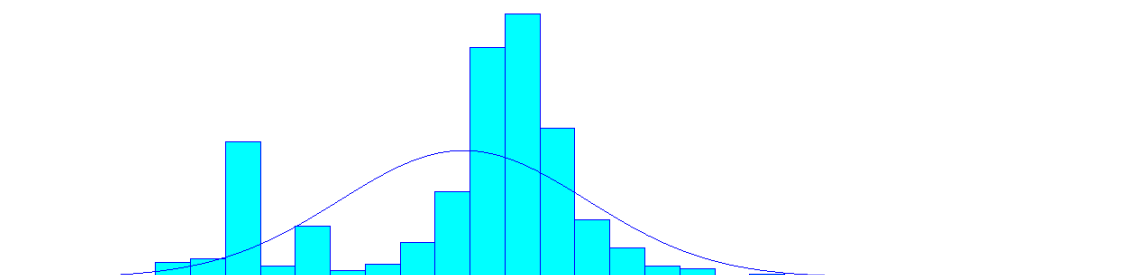
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,0854
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	638
Valor mínimo	6,50
Valor máximo	11,30
Média	8,48
Desvio-Padrão	0,992

Março de 2004



Distribuição de freqüência do tempo de viagem mar-2004.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	16
Graus de liberdade	13
Estatística χ^2	654
Valor p	0,005

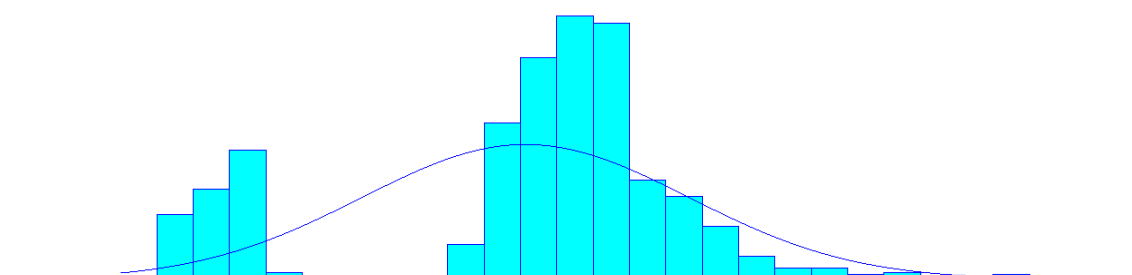
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,204
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	682
Valor mínimo	6,05
Valor máximo	14
Média	9,01
Desvio-Padrão	1,09

Abril de 2004



Distribuição de frequência do tempo de viagem abr-2004.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	19
Graus de liberdade	16
Estatística χ^2	625
Valor p	0,005

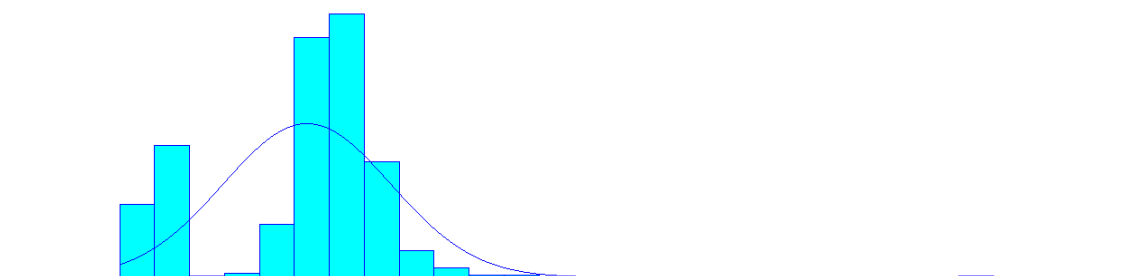
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,205
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	660
Valor mínimo	6,50
Valor máximo	13,00
Média	9,12
Desvio-Padrão	1,26

Maio de 2004



Distribuição de frequência do tempo de viagem mai-2004.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	11
Graus de liberdade	8
Estatística χ^2	583
Valor p	0,005

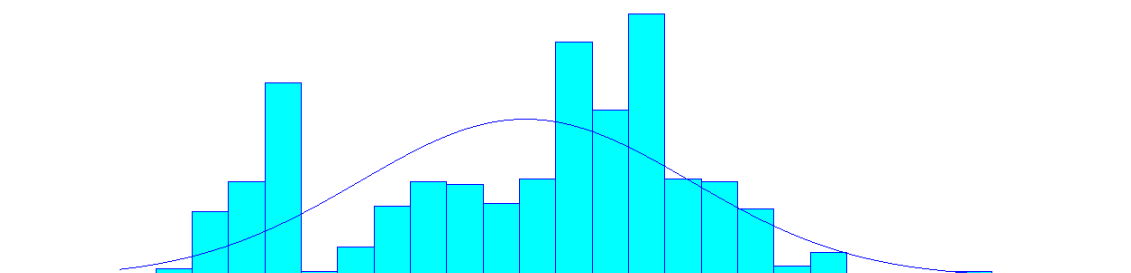
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,189
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	682
Valor mínimo	6,33
Valor máximo	18,2
Média	8,67
Desvio-Padrão	1,20

Junho de 2004



Distribuição de freqüência do tempo de viagem jun-2004.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	19
Graus de liberdade	16
Estatística χ^2	378
Valor p	0,005

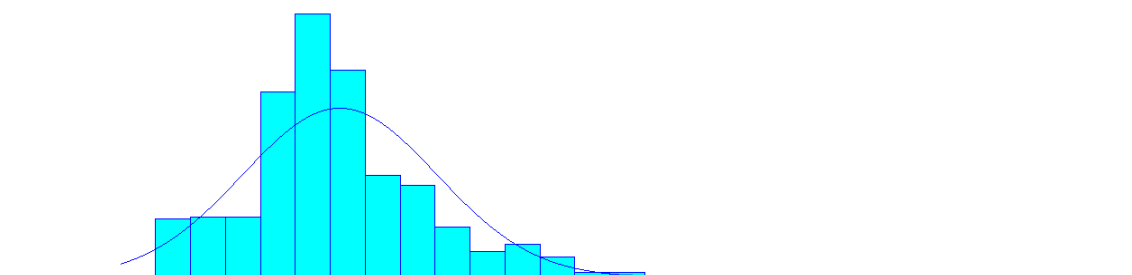
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,111
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	660
Valor mínimo	6,33
Valor máximo	11,00
Média	8,23
Desvio-Padrão	0,913

Julho de 2004



Distribuição de freqüência do tempo de viagem jul-2004.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	13
Graus de liberdade	10
Estatística χ^2	119
Valor p	0,005

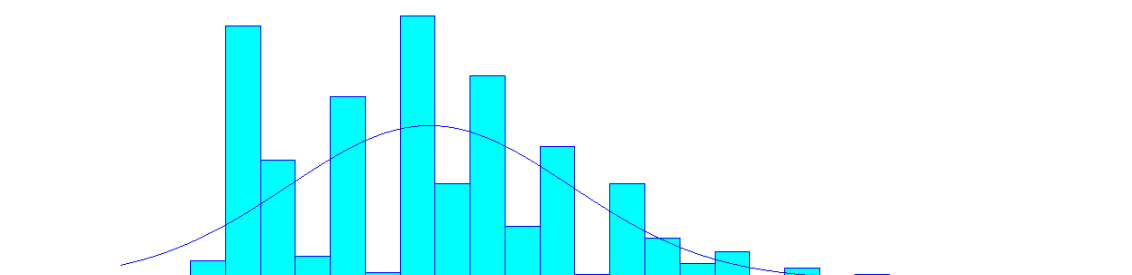
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,122
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	682
Valor mínimo	6,33
Valor máximo	12,50
Média	7,68
Desvio-Padrão	0,75

Setembro de 2004



Distribuição de frequência do tempo de viagem set-2004.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	17
Graus de liberdade	14
Estatística χ^2	497
Valor p	0,005

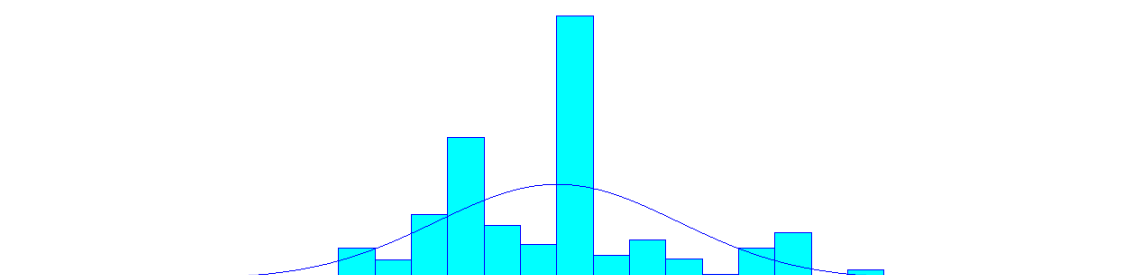
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,0737
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	682
Valor mínimo	6,33
Valor máximo	9,33
Média	7,26
Desvio-Padrão	0,562

Outubro de 2004



Distribuição de freqüência do tempo de viagem out-2004.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	16
Graus de liberdade	13
Estatística χ^2	540
Valor p	0,005

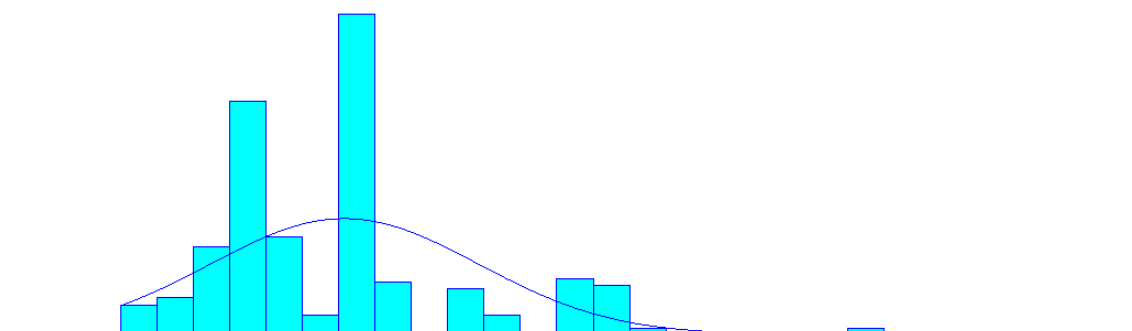
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,153
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	660
Valor mínimo	5,33
Valor máximo	8,83
Média	6,92
Desvio-Padrão	0,533

Novembro de 2004



Distribuição de freqüência do tempo de viagem nov-2004.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	14
Graus de liberdade	11
Estatística χ^2	610
Valor p	0,005

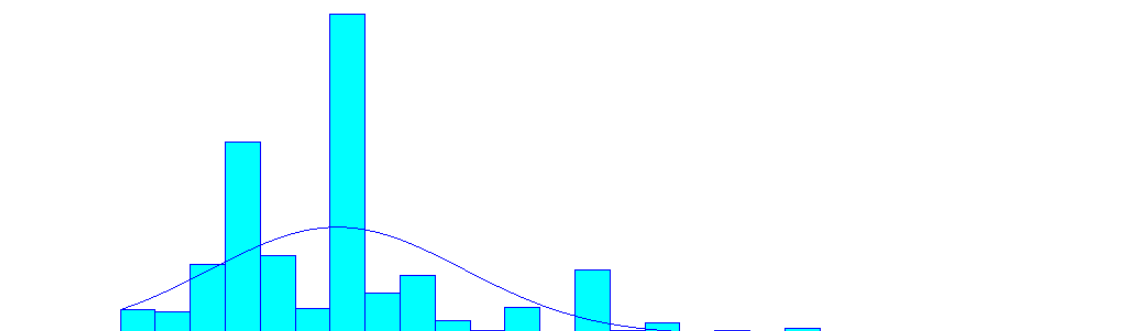
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,101
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	660
Valor mínimo	6,00
Valor máximo	9,33
Média	6,90
Desvio-Padrão	0,542

Dezembro de 2004



Distribuição de freqüência do tempo de viagem dez-2004.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	14
Graus de liberdade	11
Estatística χ^2	743
Valor p	0,005

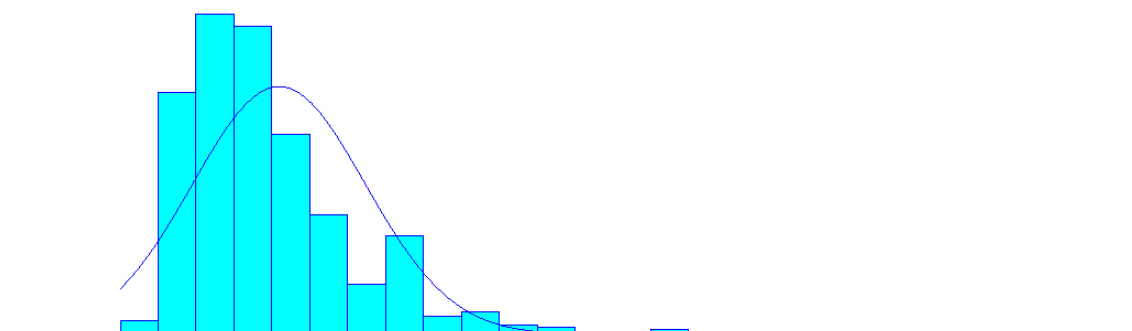
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,110
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	682
Valor mínimo	6,00
Valor máximo	10,00
Média	6,95
Desvio-Padrão	0,558

Fevereiro de 2005



Distribuição de frequência do tempo de viagem fev-2005.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	10
Graus de liberdade	7
Estatística χ^2	183
Valor p	0,005

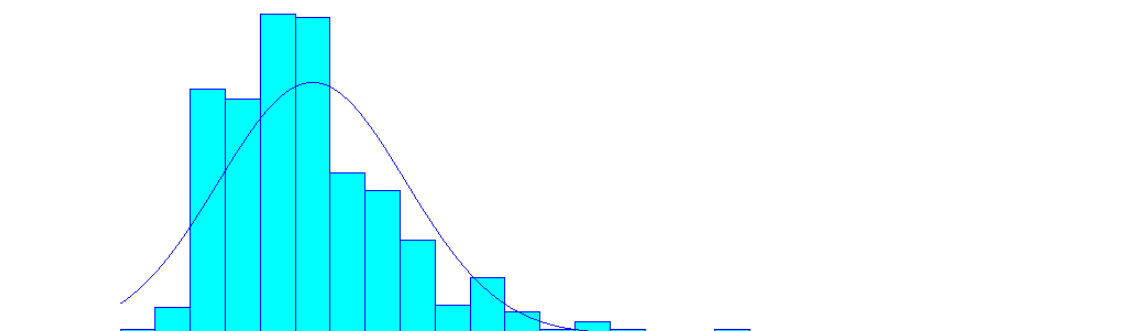
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,103
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	616
Valor mínimo	6,16
Valor máximo	11,80
Média	7,04
Desvio-Padrão	0,571

Março de 2005



Distribuição de frequência do tempo de viagem mar-2005.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	12
Graus de liberdade	9
Estatística χ^2	128
Valor p	0,005

Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,0902
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	682
Valor mínimo	6,00
Valor máximo	11,40
Média	7,25
Desvio-Padrão	0,614

Abril de 2005



Distribuição de freqüência do tempo de viagem abr-2005.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	8
Graus de liberdade	5
Estatística χ^2	289
Valor p	0,005

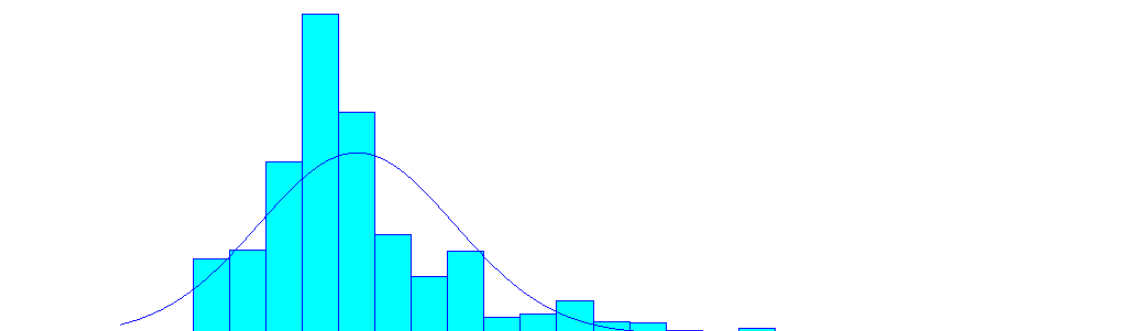
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,137
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	658
Valor mínimo	6,25
Valor máximo	15
Média	7,28
Desvio-Padrão	0,677

Maio de 2005



Distribuição de frequência do tempo de viagem mai-2005.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	12
Graus de liberdade	9
Estatística χ^2	232
Valor p	0,005

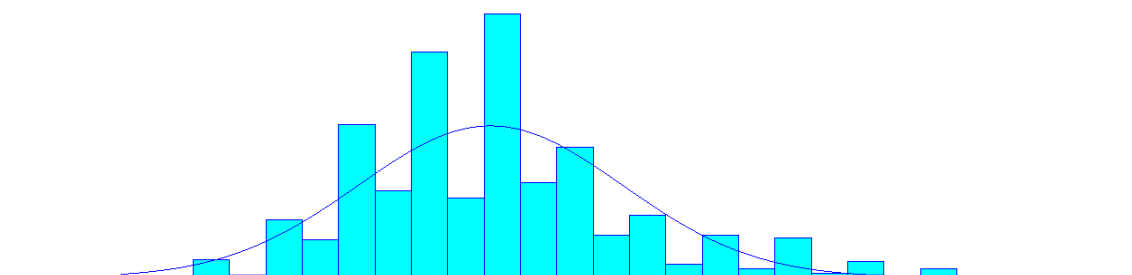
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,127
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	651
Valor mínimo	6,58
Valor máximo	10,6
Média	7,43
Desvio-Padrão	0,517

Junho de 2005



Distribuição de freqüência do tempo de viagem jun-2005.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	16
Graus de liberdade	13
Estatística χ^2	177
Valor p	0,005

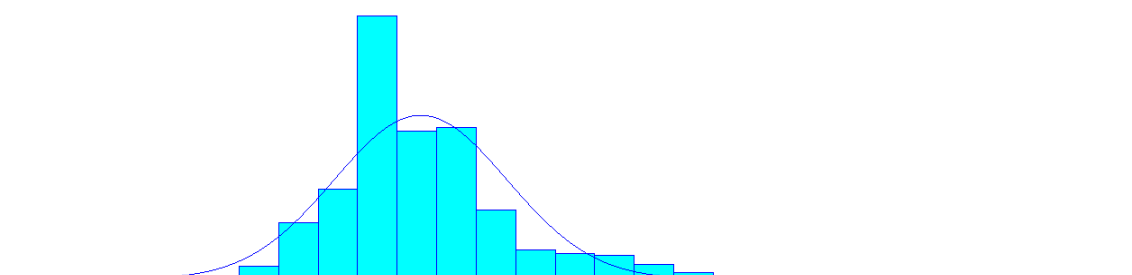
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,0736
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	626
Valor mínimo	6,75
Valor máximo	9,33
Média	7,75
Desvio-Padrão	0,452

Julho de 2005



Distribuição de frequência do tempo de viagem jul-2005.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	11
Graus de liberdade	8
Estatística χ^2	139
Valor p	0,005

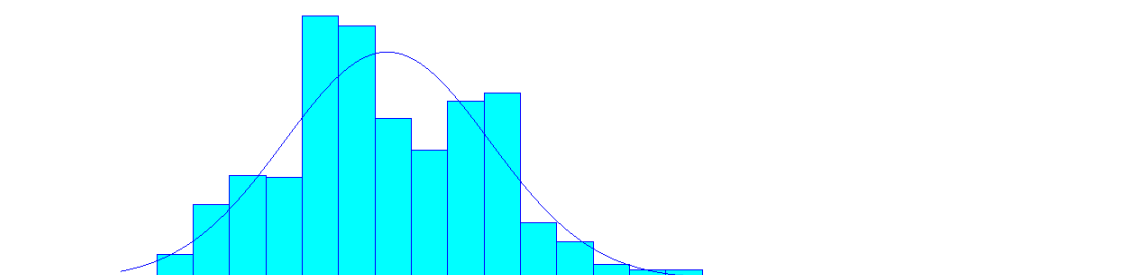
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,101
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	558
Valor mínimo	6,41
Valor máximo	10,90
Média	7,65
Desvio-Padrão	0,476

Agosto de 2005



Distribuição de freqüência do tempo de viagem ago-2005.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	13
Graus de liberdade	10
Estatística χ^2	62,2
Valor p	0,005

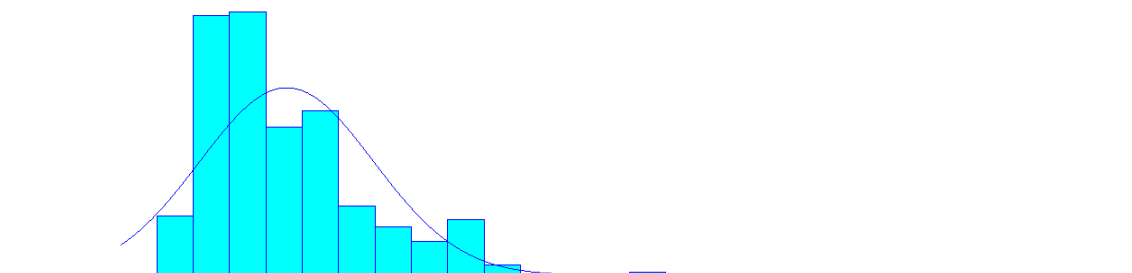
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,0527
Valor p	0,0527

Características da Amostra:

Número de observações	650
Valor mínimo	6,08
Valor máximo	10,40
Média	7,42
Desvio-Padrão	0,549

Setembro de 2005



Distribuição de freqüência do tempo de viagem set-2005.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	10
Graus de liberdade	7
Estatística χ^2	217
Valor p	0,005

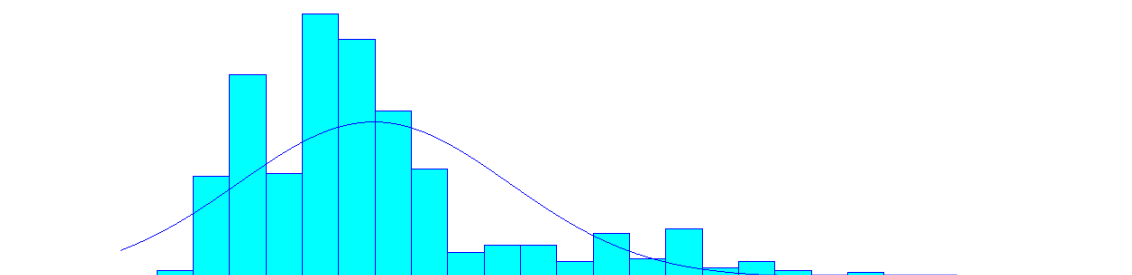
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,122
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	629
Valor mínimo	6,16
Valor máximo	11,3
Média	7,05
Desvio-Padrão	0,552

Outubro de 2005



Distribuição de freqüência do tempo de viagem out-2005.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	15
Graus de liberdade	12
Estatística χ^2	289
Valor p	0,005

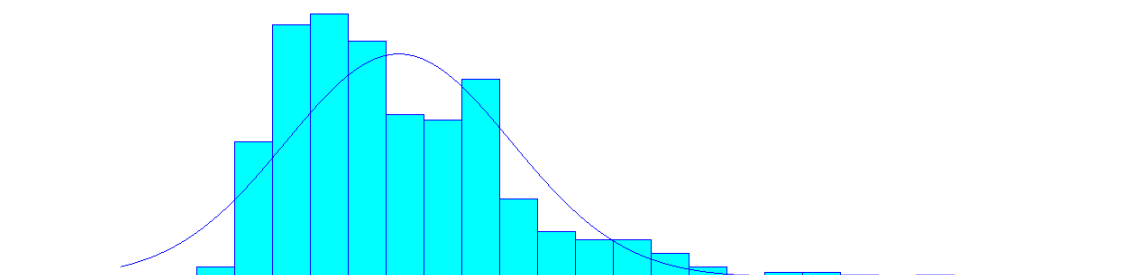
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,115
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	629
Valor mínimo	6,25
Valor máximo	9,41
Média	7,04
Desvio-Padrão	0,556

Fevereiro de 2006



Distribuição de frequência do tempo de viagem fev-2006.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	13
Graus de liberdade	10
Estatística χ^2	128
Valor p	0,005

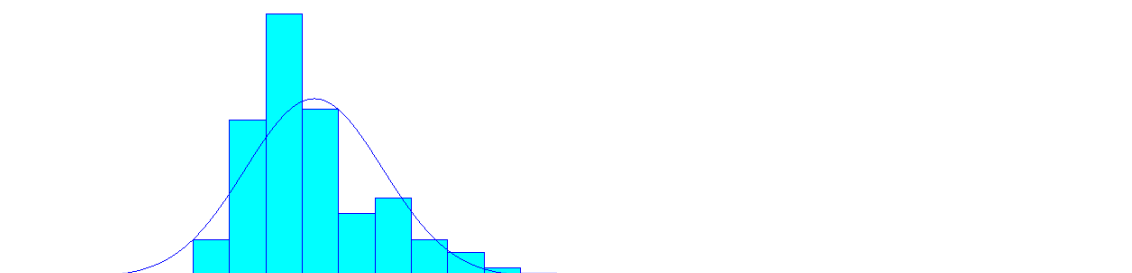
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,0838
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	615
Valor mínimo	6,50
Valor máximo	11,20
Média	7,74
Desvio-Padrão	0,695

Março de 2006



Distribuição de frequência do tempo de viagem mar-2006.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	9
Graus de liberdade	6
Estatística χ^2	143
Valor p	0,005

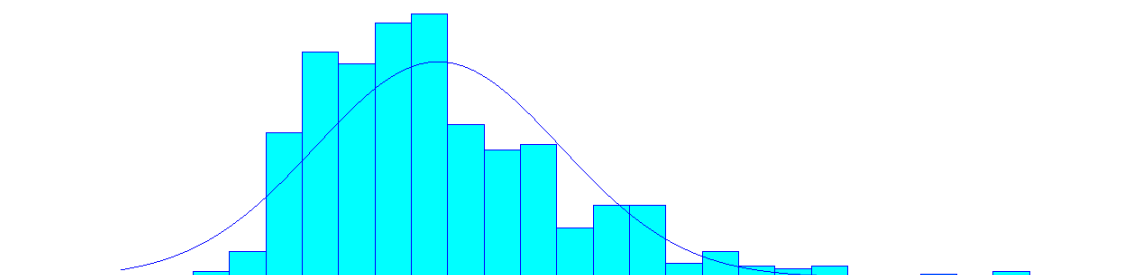
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,0829
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	651
Valor mínimo	6,41
Valor máximo	13,50
Média	7,70
Desvio-Padrão	0,606

Abril de 2006



Distribuição de freqüência do tempo de viagem abr-2006.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	15
Graus de liberdade	12
Estatística χ^2	102
Valor p	0,005

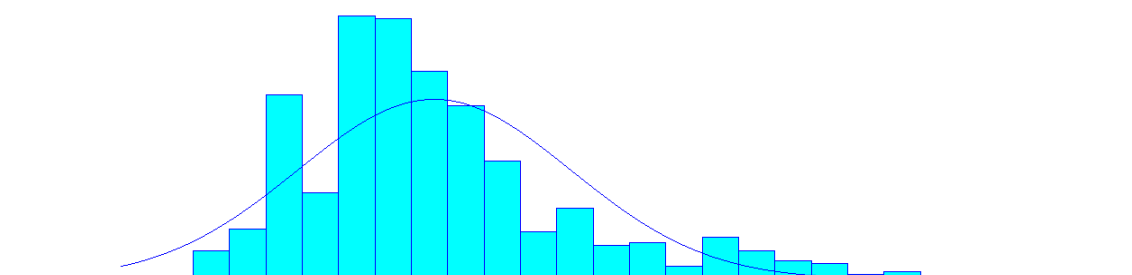
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,0688
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	630
Valor mínimo	6,66
Valor máximo	11,00
Média	7,89
Desvio-Padrão	0,645

Maio de 2006



Distribuição de frequência do tempo de viagem mai-2006.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	16
Graus de liberdade	13
Estatística χ^2	227
Valor p	0,005

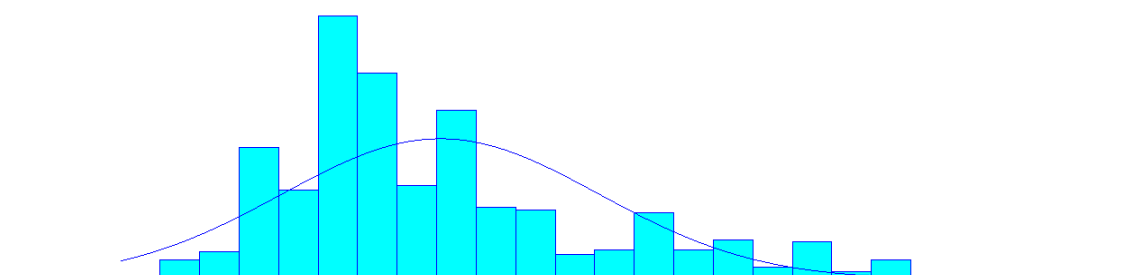
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,0958
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	645
Valor mínimo	6,41
Valor máximo	10,00
Média	7,41
Desvio-Padrão	0,594

Junho de 2006



Distribuição de freqüência do tempo de viagem jun-2006.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	16
Graus de liberdade	13
Estatística χ^2	234
Valor p	0,005

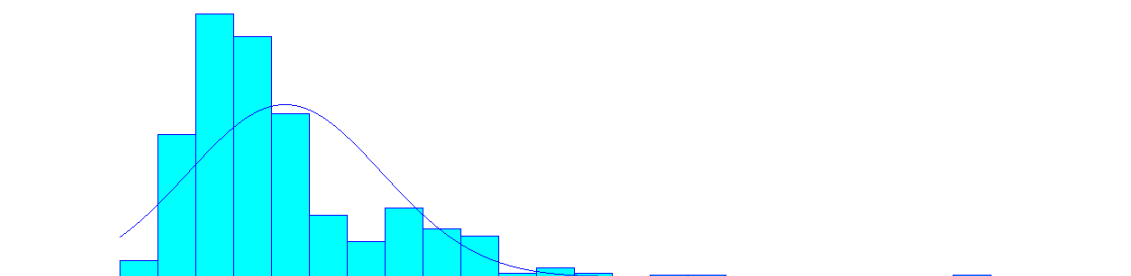
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,121
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	570
Valor mínimo	6,16
Valor máximo	8,75
Média	7,05
Desvio-Padrão	0,524

Julho de 2006



Distribuição de frequência do tempo de viagem jul-2006.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	10
Graus de liberdade	7
Estatística χ^2	198
Valor p	0,005

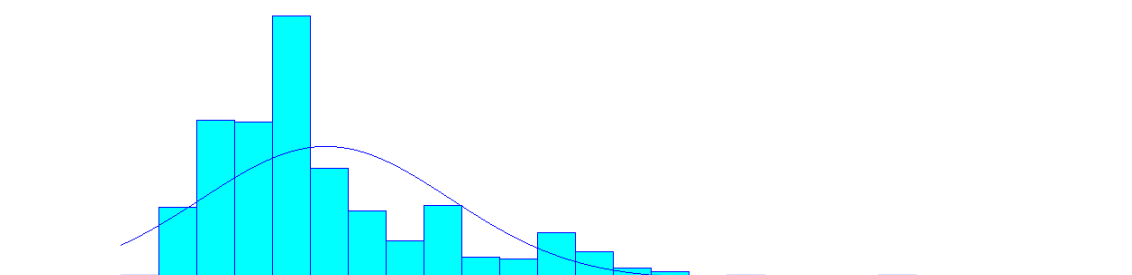
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,144
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	589
Valor mínimo	6,16
Valor máximo	11,70
Média	7,09
Desvio-Padrão	0,64

Agosto de 2006



Distribuição de freqüência do tempo de viagem ago-2006.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	13
Graus de liberdade	10
Estatística χ^2	241
Valor p	0,005

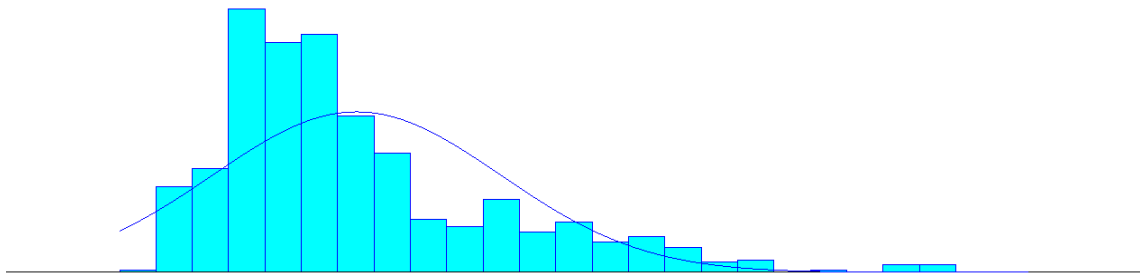
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,13
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	591
Valor mínimo	6,16
Valor máximo	10,10
Média	7,01
Desvio-Padrão	0,614

Setembro de 2006



Distribuição de frequência do tempo de viagem set-2006.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	15
Graus de liberdade	12
Estatística χ^2	212
Valor p	0,005

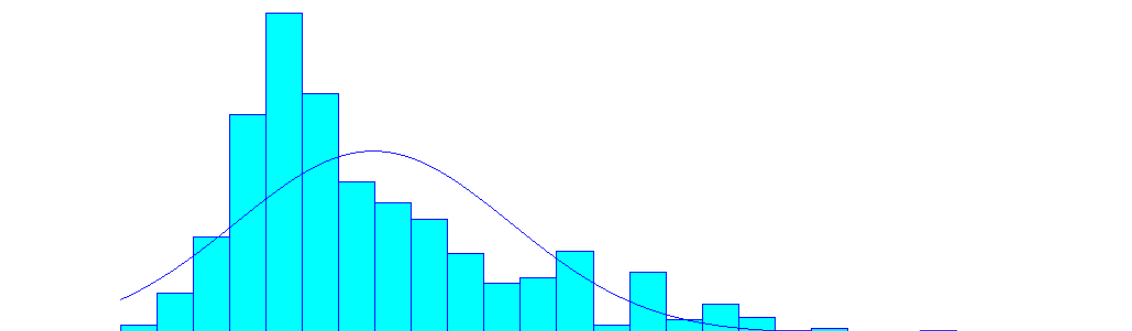
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,11
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	630
Valor mínimo	6,00
Valor máximo	9,58
Média	7,02
Desvio-Padrão	0,625

Outubro de 2006



Distribuição de freqüência do tempo de viagem out-2006.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	15
Graus de liberdade	12
Estatística χ^2	240
Valor p	0,005

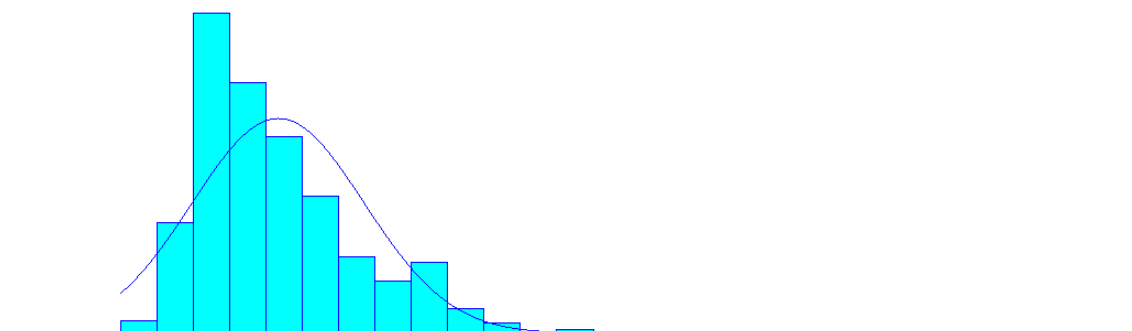
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,115
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	648
Valor mínimo	6,00
Valor máximo	9,50
Média	7,07
Desvio-Padrão	0,582

Novembro de 2006



Distribuição de freqüência do tempo de viagem nov-2006.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	10
Graus de liberdade	7
Estatística χ^2	145
Valor p	0,005

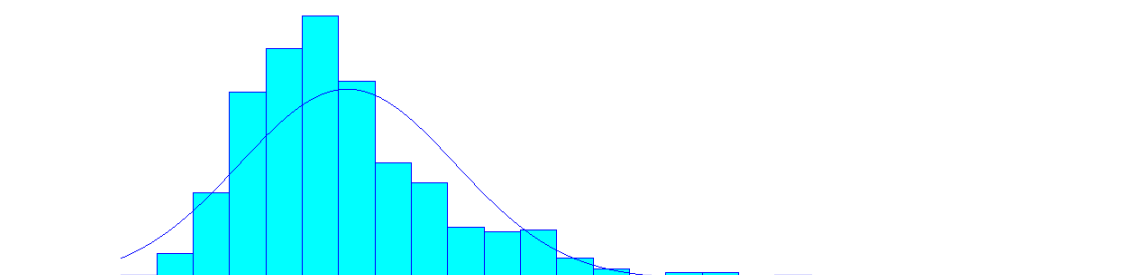
Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,109
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	630
Valor mínimo	6,16
Valor máximo	12,7
Média	7,21
Desvio-Padrão	0,663

Dezembro de 2006



Distribuição de frequência do tempo de viagem dez-2006.

Teste χ^2 :

Número de intervalos	13
Graus de liberdade	10
Estatística χ^2	99,2
Valor p	0,005

Teste Kolmogorov-Smirnov:

Estatística	0,0882
Valor p	0,01

Características da Amostra:

Número de observações	657
Valor mínimo	6,08
Valor máximo	11,70
Média	7,49
Desvio-Padrão	0,714