

# **UM MÉTODO DE PONDERAÇÃO PARA O TEMPO DE VIAGEM CONSIDERANDO A SUA VARIABILIDADE**

**José Luiz Lopes Teixeira Filho**

PET/COPPE/UFRJ

Companhia Estadual de Engenharia de Transportes e Logística – CENTRAL

Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias - INPH

**Hostilio Xavier Ratton Neto**

Programa de Engenharia de Transportes - PET/COPPE/UFRJ

## **RESUMO**

Este trabalho visa contribuir para um melhor entendimento das funções de impedância utilizadas no estudo dos fluxos de transporte rodoviário interurbano 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 método 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 método 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**

This work has the main purpose to contribute to a better understanding of deterrence functions in the analysis of intercity road freight flows. The current gravity models use trip times as the deterrence or separation costs. This paper presents a procedure to estimate and analyze the influence of the variability trip times on transportation operations, based on the reliability of travel time. An application of the model was run to estimate the influence and reliability of trip times from a four year period in a Brazilian Roadway.

## **1. INTRODUÇÃO**

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 impõe à disponibilização de informações.

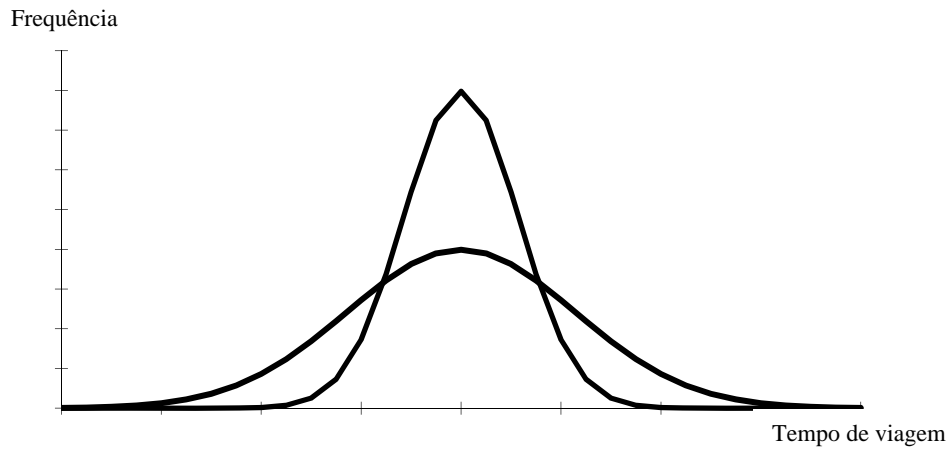
Os estudos do transporte de passageiros em áreas urbanas, talvez por não apresentarem essas restrições, puderam dar maior atenção aos efeitos que a confiabilidade, ou a falta dela, têm nos sistemas de transporte, buscando desenvolver modelos que representassem a variabilidade do tempo de viagem e da 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.

O transporte de cargas, entretanto, também sofre um impacto relevante da variabilidade das condições em que se dão suas viagens. Os diversos recursos envolvidos em operações tais como veículos, terminais, sistemas, locais de armazenagem e, ainda, as necessárias interações entre o transportador, o embarcador e o recebedor da carga, seja este o cliente final ou um agente de distribuição, e, ainda, as restrições a que as operações de transporte de cargas estão sujeitas na maioria das cidades, são motivações importantes para que maior atenção seja dada

à modelagem que considere os efeitos do risco e da incerteza envolvidos.

## 2. A VARIABILIDADE DO TEMPO DE VIAGEM

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 (Teixeira Filho, 2009). Tal 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. A questão pode ser exemplificada ao serem comparadas duas situações alternativas nas quais os valores esperados do tempo de viagem sejam iguais, mas suas variâncias sejam diferentes, conforme ilustrado na Figura 1.



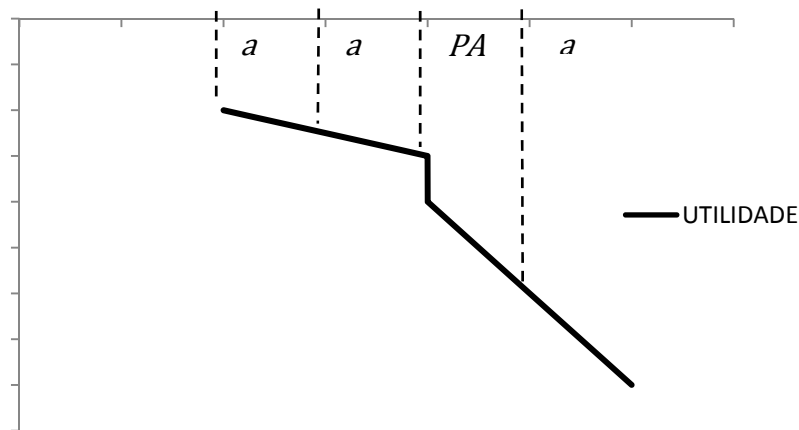
**Figura 1:** Comparação de alternativas com diferentes distribuições do tempo de viagem

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, por exemplo, não compensa uma chegada com atraso que possa comprometer a sua integridade.

Batley (2007) estuda a hipótese de que o horário de partida de uma viagem é selecionado com base na distribuição dos consequentes 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 consequências. No seu estudo, sua formulação adota o modelo de Small (1982), assim definida:

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

Onde  $U_{kn}$  é a utilidade derivada do horário de chegada  $a_k$  para o horário de partida  $d_n$ ,  $T$  é o tempo de viagem,  $SDE$  é uma chegada adiantada,  $SDL$  é uma chegada com atraso,  $L$  é uma variável indicadora (*dummy*) igual a 1 no caso de chegada com atraso ou igual a zero para qualquer outro caso, e  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  e  $\delta$  coeficientes a determinar. Na Figura 2, pode-se observar essa função.



**Figura 2:** Função de utilidade do horário de chegada (Fonte: Batley, 2007)

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  $PAT$ .

Essa mesma abordagem pode ser encontrada no trabalho de Bates *et al* (2001), se  $PAT$  é considerado o limite de viabilidade de uma viagem qualquer e 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  $PAT$ .

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

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). 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. Essas ferramentas fornecem previsões de valores médios para os fluxos de tráfego e para os tempos de viagem em uma rede viária. 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.

Em Sumalee e Watling (2003), pode ser encontrada uma proposta de estrutura para análise de uma rede de transportes, considerada 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. Uma interessante discussão sobre incerteza, com uma abordagem psicológica, para além de um conceito puramente estatístico, foi elaborada em Bonsall (2000). Uno *et al.* (2004) realizaram 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 no Japão. Fan *et al.* (2005) propuseram 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.

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 consequências. Nele são recomendadas quatro diferentes formas de quantificar a confiabilidade de tempo de viagem, destacando-se o “*Buffer Index*”, que é uma medida em percentagem representando 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. Lyman (2007) fez uma aplicação desse indicador na avaliação de diversos segmentos nas principais rodovias metropolitanas da cidade de Portland no Estado do Oregon, EUA, entre os anos de 2004 e 2007.

Os avanços na tecnologia de monitoramento do tráfego, com a utilização de informações em tempo real a partir de laços de indução, podem fornecer informações valiosas, na medida em que, ao invés de se entrevistar motoristas pelo método direto, é possível inferir as suas escolhas reais a partir das medições dessa tecnologia. Liu *et al.* (2004) se utilizaram da abordagem para estabelecer um modelo para estimar o valor do tempo, o valor da confiabilidade e o valor da aversão ao risco em uma estrada da Califórnia, EUA, a *Route 91* (SR91).

Lint *et al.* (2008) fizeram 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, foram estabelecidas algumas metas a serem atingidas no período 2005-2020 utilizando medidas probabilísticas da confiabilidade do tempo de viagem. Os autores argumentam que a distribuição dos tempos de viagem é fortemente assintótica e extremamente indesejável sob qualquer ponto de vista e concluem que são fortes as evidências de que a variância e a assimetria da variância do tempo de viagem devem ser utilizadas na análise da sua confiabilidade.

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) abordaram um *Continuous Network Design Problem* – CNDP com restrição de confiabilidade do tempo de viagem para considerar a capacidade dos arcos (*links*) como variável aleatória, apresentando soluções quantitativas. Além disso, é importante analisar a modelagem e o procedimento adotados no tratamento da confiabilidade do tempo de viagem. Os mesmos Park *et al.* (2007) adotaram 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.

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. Em uma extensão desse conceito, Taylor *et al.* (2006) desenvolveram uma metodologia para a análise da vulnerabilidade, considerada em um processo de planejamento no qual o desempenho da rede de transportes é testado com relação a determinados critérios de desempenho.

O ponto de partida para o método então foi a modelagem de vulnerabilidade de Taylor *et al.* (2006), que buscaram comparar variações hipotéticas na conectividade, adaptadas 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) foi utilizada para modelar a variação da inclinação da função de utilidade, de forma a tratar adequadamente as viagens com atraso.

#### 4. ESTRUTURA METODOLÓGICA

Teixeira Filho (2009) desenvolveu uma metodologia para obter essa ponderação, que consiste na 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. 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 virtual para  $n$  regiões distintas, ligadas por vias com diferentes características. Todas as regiões têm a mesma atração de viagens, igual a uma viagem. Essa condição é conveniente para “forçar” a que a cada região corresponda uma viagem, se todas tiverem o mesmo valor para a função de impedância. Então:

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

$V_{ij}$  é número de viagens produzidas em  $i$  e atraídas por  $j$ ,  $P_i$  é o total de viagens produzidas em  $i$ ,  $A_j$  é o total de viagens atraídas por  $j$ ,  $F_{ij}$  é a expressão de calibração para o par de zonas  $i, j$ , e  $K_{ij}$  é um fator de ajustamento sócio-econômico para o par de zonas  $i, j$ .

O modelo gravitacional considera de forma determinística o tempo de viagem esperado, representado por médias amostrais, em cada par de origem e destino  $ij$ , de modo 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. 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 sua frequência relativa em um número de observações suficientemente grande a partir de um modelo de simulação pelo Método de Monte Carlo.

Para a modelagem proposta, não foram consideradas outras causas de atração de viagens além da utilidade ou *desutilidade* do tempo de viagem. Por conta disso, pode-se assumir que os fatores de ajustamento  $K_{ij}$  sejam iguais a 1. Como, por construção, a atração de cada região  $A_j$  também é igual a uma viagem e que a produção de viagens  $P_i$  é igual a  $n$ , a expressão para o número de viagens para a região  $j$  é :

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

Como  $F_j$  é função da variável aleatória  $t_{vj}$ , tempo de viagem para a região  $j$ , e que a 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  $f(F_j)$ . Sendo  $t$  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:

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

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  $\Theta$ , o estimador não viesado  $\check{P}_j$  para  $P_j$  pode ser obtido da seguinte forma:

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

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

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

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

#### 4.1 Modelagem dos Atrasos

A confiabilidade do tempo de viagem  $CT$  em uma determinada rota foi 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 rodoviário interurbano de carga, o fator crítico é o limite superior, referente à probabilidade de que a viagem ocorra com um determinado atraso quanto 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 pode ser relevante, como no problema das entregas em áreas urbanas (Taniguchi *et al.*, 2000), quando a chegada muito antecipada pode ocasionar sérias dificuldades à operação, devido, por exemplo, a restrições na legislação para o tráfego de veículos de carga, ou mesmo pela falta de capacidade ou condições de recebimento da carga antes do horário previsto. Neste estudo, no entanto, a análise ficou restrita aos atrasos devidos às variações de confiabilidade do trajeto interurbano. O modelo de análise considerou, então, o estabelecimento do limite de tempo admissível para a realização de uma viagem e a verificação das variações na impedância quanto à realização de uma viagem de transporte de cargas, em função da variação da confiabilidade do tempo de viagem, foram apenas as viagens para embarques nas quais pelo menos o tempo esperado no trajeto fosse viável. Assim, não faria sentido introduzir, no modelo, viagens potenciais cujos requisitos de viabilidade tivessem como consequência tempos de viagem muito inferiores aos possíveis de serem realizados pelos veículos e meios disponíveis.

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) teria o inconveniente de inserir um fator subjetivo no modelo. Uma alternativa seria estimá-lo por meio de uma distribuição de probabilidades, a partir da própria amostra obtida, na condição em que, no conjunto de observações, se pudesse extrair uma sub-amostra de um período para o qual tenha havido regularidade e que a ligação não pudesse ser considerada degradada. O limite inferior exequível para o tempo de viagem esperado  $t_{lie}$  poderis ser estimado como o próprio valor esperado dessa sub-amostra.

Por outro lado, existe também um limite superior de exequibilidade “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 exequibilidade razoável superior  $t_{lse}$  para o tempo de viagem. Pode-se considerar que, acima desse limite não haveria conectividade, seja do ponto de vista físico da infra-estrutura, seja do ponto de vista de qualquer resquício de uma operação comercial regular. De todo modo, as expectativas teriam necessariamente que estar restritas aos valores de tempo de viagem exequíveis, considerando a tecnologia contemporânea e as restrições legais de velocidade.

O tratamento dado pode ser considerado discricionário, pela arbitrariedade da escolha dos limites, pois se trata de uma simplificação inserida no modelo. Um possível refinamento seria o tratamento analítico e formal para chegar aos valores extremos desse intervalo, de acordo com a tecnologia e as restrições legais. Com efeito, o procedimento não fica invalidado, e, de toda forma, os valores foram considerados como estimativas e, não, como seleção arbitrária.

O intervalo do limite estaria, então, entre o valor esperado  $\mu$  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  $t_{lse}$  em que temos  $P(t_v \leq t_{lse}) = 1$  na f.d.p. O limite de atraso  $t_{lse}$ , então, se situaria dentro do intervalo:

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

Uma alternativa seria admitir 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, 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 pode ser aproximada por uma interpolação entre os 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), definindo a proporção  $P'_j$ :

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

#### 4.2 Procedimento para a Simulação

Em cada iteração da simulação foi 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 é:

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

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 seqüência 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  $V_{ij}$ ;

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:

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

Então:

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

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. O 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 fictício (*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.

## 5. APLICAÇÃO

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. Mesmo nos países mais desenvolvidos, essa não é uma tarefa simples, mas, graças a tecnologias de controle que, indiretamente, se tornam fontes de informações de tempo de viagem, há mais facilidade de obtenção. No caso em estudo, por não se dispor das mesmas condições, optou-se por obter os dados a partir das viagens interurbanas por transporte rodoviário de passageiros por ônibus, adotadas somente como instrumento da medida dos tempos de viagem.

### 5.1 O Objeto Empírico

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, e utilizadas as distribuições de frequência de 43 meses compreendidos entre janeiro de 2003 e dezembro de 2006. De acordo

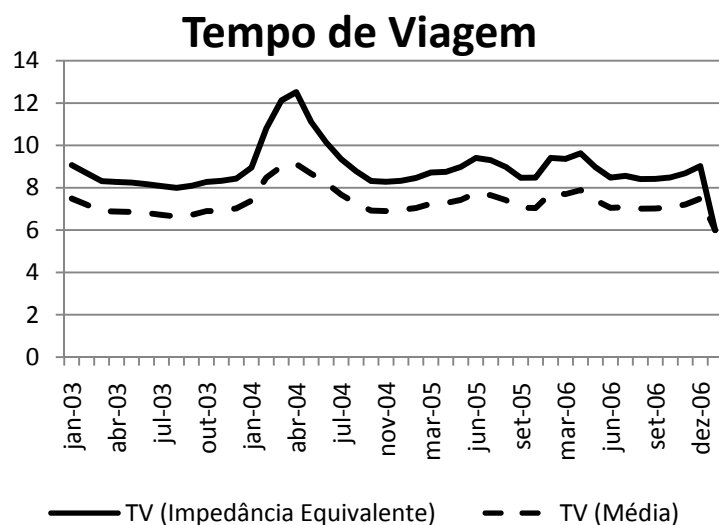
com a metodologia proposta, a cada mês correspondeu um destino virtual  $j$ . A primeira etapa consistiu em estimar os parâmetros das distribuições de probabilidades do tempo de viagem para cada destino  $j$  a partir de suas distribuições de frequência.

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. Uma restrição na simulação foi introduzida no modelo para que o tempo de viagem não fosse simulado como inferior ao tempo de viagem do limite legal de velocidade.

## 5.2 Análise

O início do ano de 2004 se caracterizou por uma degradação muito expressiva da ligação rodoviária entre Montes Claros e Belo Horizonte. O tempo de viagem, que se situava no entorno de 7 horas de viagem, 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 horas 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 horas 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 nove horas de viagem, um aumento de 30%. Por sua vez, o desvio-padrão atingiu, em maio de 2003, a mais de uma hora, mesmo não tendo sido o mês de maior média, 8:48 horas contra 9:16 horas em março do mesmo ano.

No início de 2004, não foi rara a ocorrência de tempos de viagem superiores a 10 horas. No mês de março, por exemplo, cerca de 12 % das observações foram superiores. Importante observar que, ainda assim, ocorreram tempos de viagem inferiores a sete horas, o que indica a dispersão ocorrida. O tempo de viagem equivalente obtido mostrou que a queda da confiabilidade, de 61,9 % em fevereiro, 51,7% em março e 50,2 % em abril de 2004, enquanto que, em 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%.



**Figura 3:** Evolução do tempo de viagem ponderado

O tempo de viagem ponderado 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 horas, em abril de 2004, correspondendo a uma média de 9:07 horas, o que significa uma correção de 3:21 horas ou 37,22%, para incorporar os efeitos da queda na confiabilidade, que foi de 50,2%.

Verificou-se, então, que nas condições extremas de degradação da rede de transportes em estudo, o tempo de viagem alcançou uma média de 9:07 horas, correspondendo a uma elevação de cerca de 37% em relação ao tempo de viagem médio nas melhores condições de operação. Utilizando-se a o tempo de viagem ponderado, verificou-se que a queda de confiabilidade propiciou um aumento da impedância observada a partir do tempo de viagem de mais 10% em tempo equivalente.

## **6. CONCLUSÕES**

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.

O estabelecimento dos limites de tempo de viagem com conotação de exequibilidade 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 do método proposto 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**

- Asakura, Y. (1998). "Reliability Measures Variable flow," in *Transportation Networks: Recent Methodological Advances: Selected Proceedings of the 4th EURO transportation Meeting* (M. G. H. Bell) Ed. Oxford: Pergamon Press, 1998, pp. 273-287.
- AVV (2004). Nota Mobility (Dutch: Nota Mobiliteit), AVV Transport Research Centre, Dutch Ministry of Transport, Public Works and Water Management, <<http://www.notamobiliteit.nl>>.

- Bates, J., Polak, J., Jones, P. e Cook, A. (2001). The valuation of reliability for personal travel. *Transportation Research Part E* vol 37. p.p 191-229;
- Batley, R. (2007). Marginal valuations of travel time and scheduling, and the reliability premium. *Transportation Research Part E* vol 43. pp. 387- 408.
- Bonsall, P. (2000). Travelers' response to uncertainty. In. *Reliability in Transport Networks* (Bell, N.G.H e Cassir, C.), pp. 1-10. RSP, Inglaterra.
- Fan, Y.Y., Kalaba, R.E. e Moore, J.E. (2005). Arriving on time. *Journal of Optimization Theory and Applications* v. 127, pp. 497-513.
- Liu, H.X., Recker, W. e Chen, A. (2004). Uncovering the contribution of travel time reliability to dynamic route choice using real-time loop data. *Transportation Research Part A*, v 38, pp. 435-453.
- Lyman, K. (2007). Travel time reliability in regional transportation planning. Dissertação de Mestrado, Universidade de Portland.
- Nicholson, A. e Du, Z. (1997). Degradable transportation systems: an integrated equilibrium model. *Transportation Research Part B*, v31. pp. 209-223.
- Park, M., Kim, S., Park, C. e Chon, K. (2007). Transportation network design considering travel time reliability. *Proceedings Intelligent Transportation Systems Conference*, Seattle, pp. 496-502.
- Recker, W., Chung, Y., Park, J., Wang, L. , Chen, A. , Ji, Z. , Liu, H. , Horrocks, M. e Oh, J. (2005). Considering risk-taking behavior in travel time reliability. Institute of Transportation Studies, University of California.
- Small, K. (1982). The scheduling of consumer activities: work trips. *American Economic Review* 72 (3), pp. 251-260.
- Sumalee, A. e Watling, D. (2003). Travel time reliability in a network with dependent link nodes and partial driver response. *Journal of the Eastern Asia for Transportation Studies* v 5, pp. 1686-1701.
- Taylor, M.A.P., Sekhar, S.V.C. e D'Este, G.M. (2006). Application of accessibility based methods for vulnerability analysis of strategic road networks. *Network Spatial Economics*, v 6, pp. 267-291.
- Teixeira Filho, J.L.L. (2009). Análise da variabilidade do tempo de viagem como fator de impacto nos custos logísticos do transporte de carga. Tese de Doutorado apresentada no Programa de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- 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](http://www.ops.fhwa.dot.gov/publications/tt_reliability/index.htm)> (acessado em 30/01/2006).
- Uno, N., Iida, Y. , Murakami, N. e Nakagawa, S. (2004). A practical approach to correct bus probe data for evaluating travel time reliability of Road network. *European Transport Conference*, Strasbourg, pp. 49-67.
- Van Lint, J.W.C., Van Zuylen, H.J. e Tu, H. (2008). Travel time unreliability on freeways: Why measures based on variance tell only half the story. *Transportation Research Part A*, v. 42, pp. 258-277.