

# ARTIGO

## PREVISÃO DA DEMANDA DE VIAGENS PARA ANÁLISES DE INVESTIMENTO PELO MÉTODO DE CRESCIMENTO COM RESTRIÇÃO

**Yaeko Yamashita**

Mestrado em Transportes Urbanos  
Departamento de Engenharia Civil  
Universidade de Brasília

---

### RESUMO

O principal objetivo deste estudo é investigar a possibilidade de simular através de procedimentos simples os resultados de um modelo de equilíbrio com demanda elástica para previsão de viagens em análise de investimentos. Será introduzida uma restrição de velocidade para o crescimento das viagens, juntamente com um modelo inelástico para todos os pares de origem-destino. É uma técnica voltada para estudos de demanda em áreas urbanas congestionadas, analisadas sob enfoque temporal, utilizando o software NES. A proposta é inicialmente testada em modelos simplificados representados por um par de origem-destino para melhor compreensão do método, e posteriormente aplicada para a rede da cidade de Cardiff - Reino Unido.

### ABSTRACT

The main objective of this study is to investigate the possibility of approximating equilibrium transport models in simplified forms with respect to elasticity and growth properties. The investigation presented here is relevant to both urban and non-urban demand analysis, with special emphasis placed on congested urban conditions. A general equilibrium framework for demand analysis within temporal context is initially proposed. A computer program NES which implements an elastic equilibrium assignment model is used. The approach is initially tested for a simplified single link representation of the system and later extended to a network context, using Cardiff-UK data base.

## 1. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, os métodos de análise de investimentos em transportes nas áreas urbanas têm se realizado de diversas formas. Na era dos grandes estudos, predominantemente nas décadas de 60 e 70, os tradicionais modelos de “quatro etapas” de planejamento foram amplamente utilizados. Esses modelos contemplavam um grande potencial de simulação de respostas dos usuários, utilizando projeções de variáveis exógenas (Ortuzar & Willumsen, 1990). A demanda elástica associada a esses modelos resulta da possibilidade da mudança de rotas, modos e distribuição das viagens. O número total de viagens do sistema considerado no estudo, na maioria das vezes é simulado segundo um modelo inelástico.

Em áreas não urbanas, particularmente onde a intensidade do uso do solo é baixa e a escala de investimento não é grande, um modelo de especificações mais simples poderia ser adotado. Essas simplificações poderiam ser assumidas através de modelos inelásticos, tanto no ano base quanto nas suas projeções. Nos modelos de demanda elástica, o investimento realizado tem a capacidade de produzir mais viagens, independente de como estas acontecem.

Existem alguns problemas que a simulação do modelo inelástico poderia causar. O primeiro, seria de não representar o comportamento do usuário de forma realística nas áreas urbanas congestionadas devido à existência de tráfego gerado. O segundo, seria devido ao resultado da previsão ser inconsistente com as capacidades das vias nos anos futuros, resultando assim, em um erro de previsão que pode ter conseqüências na avaliação do projeto a ser investido. Em tais situações, uma solução simplificada poderia ser utilizada através da introdução de algumas restrições em relação ao seu crescimento depois de um determinado tempo, de acordo com um critério. Essa medida poderia ser adotada juntamente com um modelo elástico para aproximar um modelo apropriado, porém muito mais complexo. Portanto, o objetivo dessa pesquisa seria investigar a possibilidade de simular o modelo de equilíbrio com formas simplificadas em relação a elasticidade da demanda em função do custo da viagem e ao seu crescimento dentro de um contexto temporal.

Alguns trabalhos como os de Hounsell (1989), Emmerson (1992), Van Vuren e Davies (1992) e Rogers (1991) têm utilizados técnicas de restrição de

crescimento de demanda. Entre as formas de restrição de crescimento utilizadas, citam-se, por exemplo, a definição de uma velocidade mínima ou de uma capacidade máxima a ser atingida em um dado arco ou rota. Uma vez alcançada essa velocidade ou capacidade, o crescimento do número de viagens é estagnado. Porém, estes estudos não tentam comprovar a validade da introdução destas restrições através de comparações com resultados obtidos a partir de modelo elásticos.

Apresenta-se na seção 2 a explicação do método e como ele foi implementado, mostrando ainda como é simulado o comportamento elástico, através de viagens geradas quando um investimento é realizado. Com o objetivo de exemplificar o procedimento, apresenta-se na seção 3 uma aplicação para uma rede simplificada. A seguir, a rede da cidade de Cardiff - Reino Unido é utilizada como extensão do estudo da seção anterior. E por último, é apresentado um comentário final do método estudado.

## 2. MÉTODO DE CRESCIMENTO COM RESTRIÇÃO

A previsão da demanda de viagens numa rede viária para análise de investimentos é realizada para o tempo de vida útil, que seria em torno de 20 a 30 anos. Considerando que o índice de crescimento anual do número de viagens fosse constante, no final de algumas décadas, esse número poderia ser tal que a capacidade viária não comporte mais. Esse tipo de previsão, poderia estar superestimando a demanda de viagens e conseqüentemente, também o benefício, o que seria problemático para análise de investimentos. Foi adotado aqui, para o método de crescimento com restrição, um critério similar ao do Hounsell (1989), onde a velocidade média do percurso mínimo para cada par de origem e destino é calculada após atingir o equilíbrio e comparada a um valor limite especificado. Valor esse que seria, a velocidade média limite que um usuário de transporte privado mudaria de modo, destino, rota ou deixaria de realizar a viagem. Caso este limite seja atingido por um par de O/D, a demanda no mesmo para de crescer, não mais contribuindo para o aumento do número total de viagens para a análise durante a vida útil do projeto.

A introdução da restrição do crescimento da demanda será aplicado na alocação de viagens utilizando modelos de equilíbrio. A restrição considerada acima é introduzida a um modelo de demanda inelástica (insensível à alteração de custo de viagem em um par de O/D), para que seja

evitado um crescimento excessivo de viagens, resultando em benefícios superestimados. Esse procedimento poderia ser representado pela seguinte condição:

$$\text{Se } V_{Mij} \leq V_{ml} \Rightarrow \frac{dT_{ij}}{dt} = \text{Cte} \quad \text{ou} \quad \frac{d^2T_{ij}}{dt^2} = 0$$

Onde

$V_{Mij}$  é a velocidade média de percurso mínimo para o par  $ij$ ;

$V_{ml}$  é a velocidade média limite de crescimento da demanda;

$T_{ij}$  é o número de viagens da origem  $i$  para o destino  $j$ ;

$dT_{ij}/dt$  é o índice de crescimento anual constante da demanda  $T_{ij}$  no ano  $t$ ;

$d^2T_{ij}/dt^2$  é a derivada segunda de  $T_{ij}$  com relação a  $t$ .

Considera-se que nesta pesquisa não faz parte do objetivo, um estudo de limite de velocidade tolerável aos usuários de transporte privado para transferirem a um modo alternativo ou deixarem de realizar a viagem.

## 2.1. Simulação do Modelo Elástico

A simulação do modelo elástico (demanda sensível à alteração do custo de viagem em um par de O/D) será realizada através da introdução em uma rede simplificada representada por um par de O/D, de uma velocidade média limite. O critério de estabelecer o limite de crescimento de viagens em um par de O/D, através da velocidade média ( $V_{ml}$ ) é ilustrado na Figura 1. O crescimento do número de viagens, aqui representado pelo seu correspondente volume de tráfego (veículos/hora), devido aos efeitos das variáveis exógenas corresponde as linhas verticais representadas pelos valores de  $T_0, T_1, \dots, T_n$  para os anos  $t_0, t_1, \dots, t_n$ , ilustrados na Figura 1. Os volumes de tráfego apresentados pela linha vertical (demanda inelástica) representam um crescimento do número de viagens sem restrições na velocidade média da rota em um par de O/D. Esse aumento seria dado por um índice de crescimento constante de veículos e os valores correspondentes aos números de viagens seriam representados pelas posições  $T_0, T_1, \dots, T_n$  na Figura 1. A restrição de crescimento por limite de velocidade média da rota é introduzida através das curvas de custo  $S^1$  e  $S^2$ . A curva  $S^1$  diz respeito ao sistema de referência, representando a situação da rede viária sem melhoria, enquanto que  $S^2$  refere-se ao sistema com o investimento.

Depois que a velocidade média limite for atingida, o volume de viagens no sistema de referência é mantido em  $T_{L1}$ , como também o custo que pode ser observado na Figura 1. Para o caso da simulação do investimento, o volume de viagens continua aumentando até  $T_{L2}$ . Essa característica permite simular um comportamento semelhante ao dos modelos de demanda elástica para os volumes entre  $T_{L1}$  e  $T_{L2}$ . Isso representaria as viagens geradas devido a diminuição de custo através do investimento.

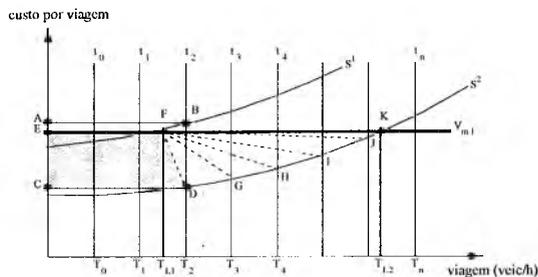


Figura 1 - Representação da restrição do crescimento da demanda pela velocidade média.

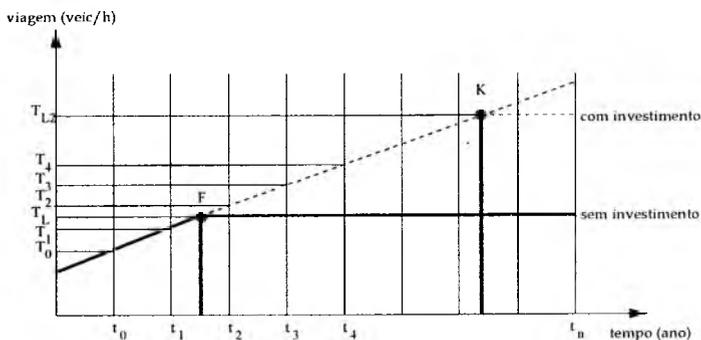


Figura 2 - Representação temporal da restrição do crescimento da demanda.

O critério estabelecido pode ser melhor compreendido através da Figura 2, onde o volume de tráfego (veic/h) é representado no eixo das ordenadas e o tempo, nas abscissas. Esse critério é aplicado ao modelo de demanda inelástica, sendo assim até o ponto F o crescimento do volume de tráfego se dá através de um índice de crescimento constante para uma situação sem

melhoria no sistema. O ponto F é quando a rota atinge a velocidade média limite ( $V_m$ ) estabelecida e a partir desse ponto o crescimento do volume de tráfego ( $T_{L1}$ ) nesse par de O/D para de crescer, estabilizando no tempo. Porém, uma vez a melhoria implementada permite ao sistema um crescimento do volume de tráfego até o ponto K, quando atinge a velocidade média limite ( $V_m$ ) estabelecida. Assim, após esse ponto o sistema manterá o volume de tráfego constante ( $T_{L2}$ ) para esse par de O/D.

Como resultado da aproximação do modelo de demanda elástica, quando a velocidade permitida é atingida no caso  $S^2$ , que simula a situação após o investimento, nenhum benefício adicional é trazido depois desse período. Isso se dá em função do custo ser o mesmo para as situações antes e depois do investimento. Por exemplo, o benefício obtido sem o limite de velocidade para o crescimento com demanda inelástica no ano  $t_2$  é representado pela área ABDC (Mackie & Bonsal, 1989; Williams, 1977). Com a introdução do limite de velocidade a área hachurada EFDC da Figura 1 representa o benefício derivado pelo investimento de um modelo de demanda elástico. Depois do tempo correspondente ao volume  $T_{L2}$ , o benefício adicional será zero, uma vez que os custos se mantêm os mesmos. Isso representaria que o investimento não traria nenhum benefício a mais, a partir do momento em que a velocidade média na rota atingisse o limite determinado.

### 3. APLICAÇÃO DO MÉTODO PARA MODELOS DE REDES SIMPLIFICADAS

Para poder entender melhor o método e auxiliar na compreensão de uma análise de rede, é utilizado para simular, um modelo simplificado com apenas uma origem e um destino. Podemos verificar os resultados quantitativos e qualitativos desse método através da Figura 3 onde a demanda de viagens é mostrada por um período de 30 anos. A função de demanda utilizada é representada por:

$$V=D(C,X, \zeta)$$

3.1

e a função de custo por:

$$C = S(V, \tau)$$

3.2

onde:

C : custo generalizado da viagem entre uma origem e um destino;

X : conjunto de variáveis exógenas que determinam a demanda;

V : volume de viagem por unidade de tempo;

$\zeta$  e  $\tau$  : conjunto de parâmetros que caracterizam a função de custo e demanda.

Algumas combinações foram realizadas para verificar a existência da similaridade dos resultados derivados de um modelo de demanda elástica com inelástica com restrição proposto nessa pesquisa, testando diferentes valores de elasticidade de demanda ( $E_d$ ) com diversos limites de velocidade média. Foram utilizados como restrição de crescimento um limite de velocidade média de 15 e 20 km/h. Essa solução é comparada com os resultados derivados considerando as demandas com elasticidade de 0,75 e 1,0.

Observa-se na Figura 3 que pode-se aproximar satisfatoriamente a variação temporal do volume de viagens para um modelo elástico com  $E_d = 0,75$ , utilizando-se um modelo inelástico com um limite de crescimento de demanda fixado para uma velocidade média limite de 15 km/h. Uma aproximação ainda melhor foi obtida para o caso com elasticidade de demanda  $E_d = 1,0$  e velocidade média limite de 20 km/h.

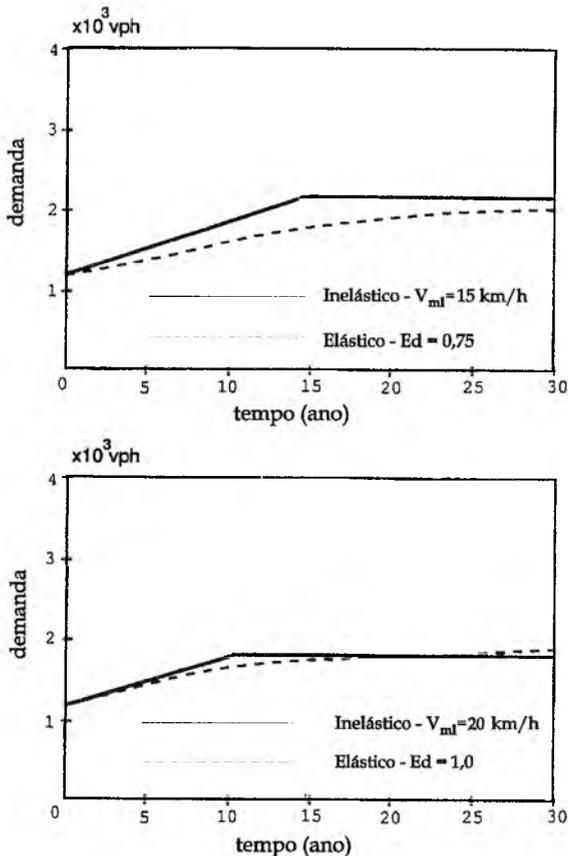


Figura 3 - Variação da demanda de viagens no tempo para combinações de  $V_{ml}$  e  $E_d$ .

#### 4. APLICAÇÃO DO MÉTODO PARA A CIDADE DE CARDIFF

A rede da cidade de Cardiff - Reino Unido, foi utilizada como extensão dos estudos da seção anterior. Optou-se por essa rede devido à disponibilidade de dados e de resultados de estudos com modelos de demanda elástica utilizando métodos de equilíbrio. Essa base de dados e os resultados foram obtidos por Yamashita (1993). Como a grande maioria das cidades tradicionais, Cardiff tem o problema de congestionamento nas horas do pico nas áreas centrais. É uma cidade com 300 mil habitantes, onde a população cresceu a uma taxa de 3% no início da década de 90. O volume de tráfego aumentou de 39% entre 85 e 90, com uma taxa de crescimento de aproximadamente 5% no final da década de 80. Uma matriz de O/D foi utilizada com um total de 230.435 viagens por hora, nos períodos de pico.

A implementação do mecanismo de limite de velocidade média considerado nesse estudo, é feita através da verificação da velocidade média na rota para cada par de origem-destino  $i-j$  no início de cada ano. O seguinte critério é imposto para impedir o crescimento de viagens: quando a velocidade média para o percurso mínimo entre  $i$  e  $j$  for menor ou igual ao limite  $V_{mi}$ , nenhum crescimento de demanda para este par de O/D a partir desse ano é permitido. Esta restrição de crescimento para o caso de um modelo de demanda inelástica, foi implementada no programa NES-Network Equilibrium System (Yamashita, 1993) que realiza uma redistribuição e realocação regido pelo primeiro princípio de Wardrop. O programa foi executado para um período de 25 anos para a opção de modelo inelástico com restrição de velocidade média. Os resultados foram comparados com aqueles obtidos com o mesmo programa NES, utilizando-se a opção de um modelo de demanda elástica com diferentes elasticidades de demanda ( $E_d = 0,125, 0,25, 0,50$ ). Diferentes elasticidades foram testadas por não ter um valor da elasticidade da demanda calibrada para a cidade.

A influência do uso do mecanismo de limite de velocidade foi estudado na rede viária da cidade de Cardiff, simulando três diferentes políticas de melhoramento. O tempo de vida do projeto considerado neste estudo é de 25 anos com um índice de crescimento anual de viagens de 5%.

#### 4.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA REDE VIÁRIA DA CIDADE DE CARDIFF

A Figura 4 mostra a evolução temporal da demanda total para várias combinações de valores de limite de velocidade média e de elasticidades. Verifica-se, também para um contexto de rede, que pode-se aproximar satisfatoriamente os resultados de modelos de equilíbrio com demanda elástica, utilizando-se modelos inelásticos com restrição de crescimento de demanda. Para baixos limites de velocidade média ( $V_{mi} = 15$  km/h), o resultado se assemelha bastante aos obtidos de modelo inelástico sem restrição ( $E_d = 0,0$ ). Essa semelhança se explica pelo fato da rede ainda não estar muito congestionada a ponto das velocidades médias entre os pares de O/D caírem abaixo de 15 km/h. A semelhança com o modelo elástico com  $E_d = 0,125$  se dá em função da mesma ser bastante baixa, significando ter pouco impacto em relação às alterações de custo. Isso também se explica pelo fato da rede não apresentar ainda um índice de congestionamento alto a ponto das velocidades médias entre os pares de O/D caírem abaixo de 15 km/h.

Para o caso do limite de velocidade média ser de 20 km/h, os resultados se mostram mais sensíveis à restrição de crescimento e o comportamento da curva de demanda se assemelha mais com a obtida pelo modelo elástico de  $E_d = 0,25$ , se distanciando do modelo inelástico sem restrição. O mesmo fato com maior efeito é percebido para uma velocidade limite maior de 30 km/h comparado com o modelo elástico com  $E_d = 0,50$ . Este último exemplo é puramente acadêmico, e serve para demonstrar a eficiência do método proposto. No entanto seria irreal assumir que o limite de velocidade para o usuário mudar de rota, modo destino ou deixar de realizar viagens na prática seja de 30km/h. Como o limite da velocidade média é alto, uma porcentagem maior de pares de O/D atendem à restrição de velocidade média, resultando, assim, em um impacto muito maior nos resultados obtidos do modelo de demanda inelástica.

Os resultados obtidos para as demais políticas de investimento foram muito semelhantes aos da Figura 4 e não serão apresentados neste trabalho.

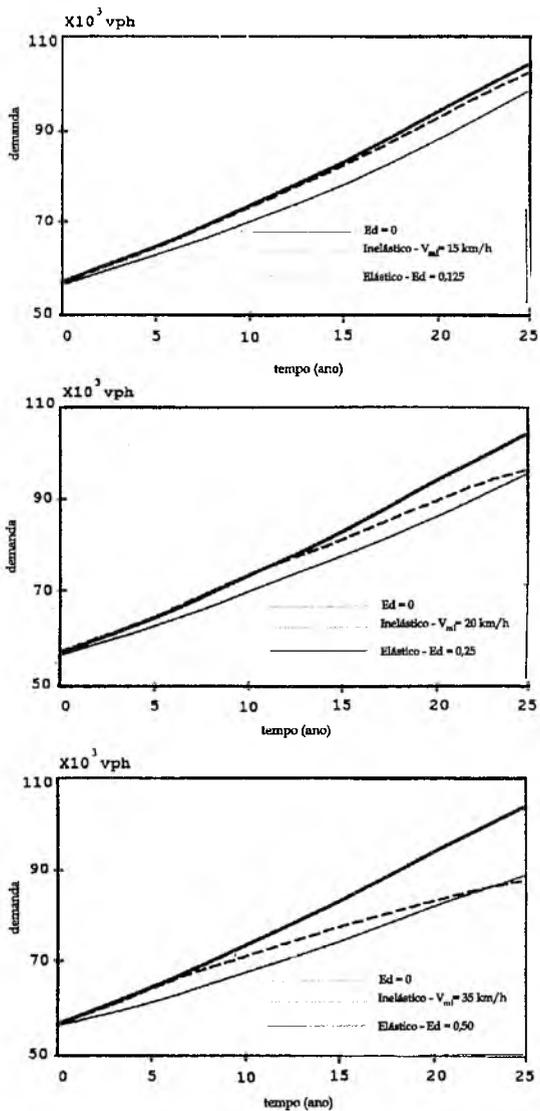


Figura 4 - Crescimento da demanda com limites de crescimento comparado com diferentes elasticidades

## 5. CONCLUSÃO

Tentou-se examinar as implicações de utilizar o método de restrição de crescimento das viagens aplicado juntamente com modelos de demanda inelástica. O principal objetivo foi identificar a situação onde um procedimento simples poderia aproximar os resultados obtidos através de um método teoricamente mais rigoroso representado pelos modelos de equilíbrio com demanda elástica.

Concluiu-se que uma correspondência aproximada entre os dois métodos pode ser obtida, porém maiores estudos numéricos e teóricos devem ser realizados com diferentes critérios ou funções de demanda. Sugere-se que um critério nas mesmas condições proposta nessa pesquisa poderia ser realizada, porém em vez da velocidade média poderia ser adotada uma velocidade ponderada em relação a distância para se obter uma semelhança ainda maior.

## BIBLIOGRAFIA

- EMMERSON, P. *Using elastic equilibrium assignment models for road schems.*  
In: PTRC - 20th Summer Annual Meeting, 1992..
- HOUNSELL, N.B. *Limits to traffic growth in congested urban networks.*  
Contractor Report 171 Transport and Road Research Laboratory, 1989.
- MACKIE, P.J., BONSALL, P.W. *Travellers response to road improvements: Implications for users benefits.* Traffic Engn. Control, v.30, n.9, p.411-416, 1989.
- ORTUZAR, J. D., WILLUMSEN, L.G. *Modelling transport.* John Wiley & Sons, 1990.
- ROGERS, K. *Congested assignment and matrix capping - Constraining the trip matrix to reflect network capacity.* Traffic Engn. Control, p.342-346, 1991.
- VAN VUREN, T., DAVIES, R. *The use of shadow networks in the determination of limits to traffic growth in heavily congested networks.* Traffic Engn. Control, p.411-416, 1992.
- WILLIAMS, H.C.W.L. *On the formation of travel demand models and economic measures of user benefit.* Environment and Planning, p.285-344, 1977.
- YAMASHITA, Y. *Highway investment analysis with equilibrium models.* PhD thesis, University of Wales, 1993.