

Calibração do modelo semi-compensatório de escolha modal

Eiji Kawamoto

Departamento de Transportes

Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo

RESUMO

Dois são os objetivos deste trabalho: o primeiro é apresentar uma maneira de calibrar o modelo Semi-compensatório do comportamento de escolha do usuário de transporte de passageiros, e o segundo, relatar um resultado preliminar de calibração. Esse novo modelo foi concebido e desenvolvido a partir do pressuposto de que a escolha do meio de locomoção se faz através da avaliação das utilidades intrínsecas das alternativas disponíveis e das utilidades atribuídas às quantias que se “desembolsam” em cada alternativa. A forma não convencional do modelo (não-compensatório e determinístico) requereu a concepção e o desenvolvimento de um processo para a sua calibração: uma aplicação da técnica de maximização da verossimilhança. Esse processo foi aplicado a dados referentes a um grupo de 95 pessoas (50 funcionários da Escola de Engenharia de São Carlos-USP e 45 funcionários do DER-SP, Regional de Campinas). O resultado da calibração mostrou-se satisfatório, pois aproximadamente 85% das escolhas preditas pelo modelo calibrado coincidiram com as escolhas realizadas pelo grupo estudado.

ABSTRACT

There are two objectives in this paper: the first one is to present an alternative way to calibrate travel behaviour models with semi-compensatory structures; the second one is to analyse some preliminary results of a calibration exercise. This new model has been developed based upon the following assumption: the choice of transport mode is made on the basis of the assessment of the intrinsic utilities of available transport alternatives and the utilities attached to the amount

of money needed to travel in each of these alternatives. The non-conventional structure of the model (non-compensatory and deterministic) has required the conception and development of a calibration process: an application of the maximum likelihood estimation technique. This process has been applied to a data base which consisted of information obtained from a group of 95 users (50 of them were staff of the São Carlos Engineering School and the remaining were staff of the São Paulo State Highway Department. The calibration result was considered satisfactory as approximately 85% of the choices predicted by the model has coincided with the observed ones.

1. Introdução

Modelo Semi-Compensatório é o nome atribuído a uma classe de modelos comportamentais desagregados que visam representar o comportamento de escolha, tanto do modo de viagem quanto da rota, dos usuários de transportes. Os modelos comportamentais desagregados podem ser divididos em três classes: compensatórios, não-compensatórios e semi-compensatórios.

Os modelos incluídos na primeira classe têm como pressuposto fundamental a idéia de que a percepção da utilidade (ou desutilidade) de um modo de viagem, por um indivíduo, depende de um conjunto de atributos relativos ao modo e ao próprio usuário, e que o indivíduo escolhe entre os modos disponíveis aquele associado a maior utilidade. Supor que

a percepção da utilidade de um modo de viagem possa ser representada matematicamente como uma função do conjunto de atributos tais como tempo de viagem, conforto, custo, renda, etc., equivale a supor que todos os atributos sejam compensatórios entre si. Segundo esse raciocínio, o efeito do aumento do custo monetário do uso de um modo de transporte, por exemplo, pode ser anulado pelo efeito da diminuição do tempo de viagem ou pelo aumento do conforto. Essa tem sido a idéia dominante na área de escolha do modo de viagem. Os modelos Logit e Probit (ver, por exemplo, DOMENCICH & McFADDEN, 1975) são os representantes mais conhecidos entre os modelos compensatórios. Nestes, a utilidade percebida é comumente expressa como uma função linear dos atri-

butos, embora outras formas funcionais possam ser empregadas.

Outros modelos têm sido sugeridos como alternativas viáveis para a análise do comportamento de escolha. Eles são baseados na idéia de (TVERSKY, 1972) que a escolha se processa mediante avaliação de cada atributo isoladamente, e não de todos os atributos em conjunto. Em cada estágio do processo de escolha, um dos aspectos é destacado, e todas as alternativas que não satisfizerem o aspecto são eliminadas; o processo continua até restar apenas uma alternativa. Os defensores dessa idéia argumentam que um único atributo pode impedir que um indivíduo viaje de um determinado modo. Um custo monetário percebido pelo indivíduo como muito elevado ou um tempo de viagem percebido como muito longo podem inviabilizar a utilização do modo, simplesmente porque tanto o seu orçamento como o seu tempo disponível para viagens são limitados. Assim, um modo percebido como muito caro, por exemplo, não seria utilizado pelo indivíduo, mesmo que ele fosse muito mais rápido ou muito mais confortável. Não se estaria, portanto, verificando a compensação entre atributos. Daí a denominação “modelo não-compensató-

rio”. Entre os modelos não-compensatórios, citam-se os modelos Lexicográfico, Conjuntivo, Disjuntivo, etc. (para maiores detalhes, ver FOERSTER, 1979 e GOLOB & RICHARDSON, 1981).

Embora modelos não-compensatórios permitam explicar alguns comportamentos de escolha não explicáveis pelos modelos compensatórios, eles também esbarram em algumas dificuldades: o valor do custo da viagem, por exemplo, isolado do contexto sócio-econômico, não diz muita coisa; um dado custo monetário, que uma pessoa pobre percebe como alto, pode ser percebido como baixo por uma pessoa rica. Dessa forma, a eliminação de modos alternativos de viagem, com base num valor limite para o custo pode levar a um erro de previsão da escolha. Portanto, de um lado, é importante admitir que não há compensação entre alguns atributos, como é o caso do custo monetário com o tempo de viagem ou o conforto. Mas por outro lado é preciso reconhecer que alguns atributos influenciam a percepção de outros, ou seja, que existem atributos que são compensatórios, como acontece com o custo e a renda.

A premissa básica do modelo

semi-compensatório é a de que o homem percebe e distingue dois tipos de utilidades: a) utilidade intrínseca ao modo, que é uma função de rapidez, conforto e segurança; e b) utilidade do dinheiro desembolsado para uso do modo, sendo que esta depende basicamente da situação sócio-econômica do usuário. Além disso, supõe-se que a compensação entre atributos ocorra somente entre os atributos que compõem cada uma das utilidades. Por exemplo, este modelo pressupõe que a diminuição da rapidez possa ser compensada por um maior conforto; e que uma pessoa seja indiferente a alta dos preços, desde que o seu salário seja também aumentado (para maiores detalhes ver KAWAMOTO, 1987).

2. Comportamento subjacente ao modelo Semi-compensatório

No contexto onde a viagem é considerada uma atividade intermediária, fornecendo suporte a outras atividades, as pessoas desejam minimizar os efeitos inerentes a locomoção, principalmente a perda de tempo e o desgaste físico. O ponto fundamental desta teoria está no pressuposto de que esse desejo é comum a todos,

independentemente da situação sócio-econômica. Quanto maiores forem a rapidez e o conforto oferecidos por um modo na transposição de uma dada distância, maior será a utilidade intrínseca percebida ou atribuída ao modo. Porém, na maioria das vezes, existe o custo monetário associado ao uso do modo de viagem. A utilidade atribuída, por um indivíduo, a uma dada quantia depende entre outros, da quantia em si, da renda e do número de pessoas que dependem da renda. Assim, o uso do modo intrinsecamente mais útil passa a ser uma questão de comparação entre a utilidade intrínseca do modo e a utilidade do dinheiro despendido para seu uso. Caso a utilidade intrínseca seja maior que a utilidade do dinheiro, o modo será empregado; caso contrário, o modo será considerado inviável e o objeto de análise passará a ser o modo cuja utilidade intrínseca seja a segunda maior, e assim por diante.

3. Representação matemática das utilidades

A utilidade intrínseca a um modo de viagem será aqui expressa em função apenas do tempo de viagem (T), da razão entre o esforço físico despendido na viagem e a duração da mesma

(E) e da distância em linha reta (D) entre a origem e o destino da viagem. A utilidade do dinheiro, por sua vez, será descrita em função do preço ou custo de uso (P), da renda familiar (R) e do número de pessoas (N) que dependem da renda. A quantificação da utilidade intrínseca e da utilidade do dinheiro foi feita mediante regra multiplicativa. A esse respeito, LOUVIERE (1978) afirma que algumas pesquisas sugerem a grande aceitabilidade da regra multiplicativa como representativa da percepção de um conjunto de atributos. Na realidade, porém, não se sabe ainda como as diferentes variáveis se associam para eliciar uma determinada sensação. O que se sabe, através de inúmeros experimentos realizados no campo da psicofísica, é que a resposta (sensação) a um dado atributo do estímulo, mantendo-se todos os demais fixos, parece seguir a Lei de Potência. A lei estabelece que a relação entre a magnitude do estímulo, E, e a magnitude da sensação eliciada por ele, S, é uma função potência do tipo $S = k \cdot E^n$, onde n é o expoente que caracteriza a modalidade sensória em questão. Se a lei é válida para cada um dos atributos, então pode ser demonstrado que a resposta a um estímulo

com vários atributos segue uma função multiplicativa do tipo $S = k \cdot E_1^{n_1} \cdot E_2^{n_2} \cdot E_3^{n_3} \dots$ (maiores detalhes podem ser encontradas em KAWAMOTO, 1988 e 1989a). Assim, a função utilidade intrínseca do modo de viagem (U_{im}) e a função utilidade do dinheiro (U_{sm}) serão representadas conforme mostram as expressões (1) e (2), respectivamente.

$$U_{im} = K_i \cdot D^a \cdot T_m^b \cdot E_m^c \quad (1)$$

$$U_{sm} = K_s \cdot P_s^d \cdot R^e \cdot N^f \quad (2)$$

onde, K_i , a, b, c, K_s , d, e, f são constantes.

4. Calibração do Modelo Semi-Compensatório

Calibrar um modelo matemático significa estimar todos os seus parâmetros com base num conjunto de dados referentes a variáveis incorporadas no modelo, de maneira a torná-lo apto a reproduzir, ao menos parcialmente e no âmbito do conjunto de dados utilizados, o objeto que o modelo procura representar. Geralmente os modelos comportamentais desagregados do tipo compensatório buscam representar a tendência de um indivíduo ou de um conjunto homogêneo de indivíduos escolher uma determinada alternativa. Essa tendência é comu-

mente traduzida em termos de probabilidade de escolha.

A principal dificuldade encontrada na calibração foi causada pela inexistência desse objeto diretamente ligado a escolha de uma alternativa. De fato, sendo o modelo Semi-compensatório uma representação do processo de escolha, e não da escolha em si, ele foi inicialmente concebido e desenvolvido como determinístico (posteriormente, KAWAMOTO (1989b), propôs um modelo probabilístico baseado no princípio do Semi-Compensatório) exatamente para deixar explícito no modelo, as suposições com relação ao mecanismo que está subjacente ao comportamento de escolha. Isso, embora possibilite uma melhor compreensão do comportamento de escolha, faz com que perca em simplicidade operacional.

Uma outra solução alternativa cogitada foi o emprego da técnica de regressão linear múltipla. A idéia era igualar as duas funções utilidade, a intrínseca e a do dinheiro. Uma das variáveis seria considerada dependente e as demais independentes. Mas, para isso, seria necessário que os dados coletados refletissem o estado de indiferença entre essas duas utilidades. Os entrevistados precisa-

riam declarar pelo menos uma das combinações de atributos que tornam as duas utilidades indiferentes. Isso não seria uma tarefa fácil e, nem tampouco as respostas seriam confiáveis, uma vez que as pessoas estariam raciocinando sobre uma situação hipotética e não sobre aquela realmente vivida.

Resolveu-se, então, calibrar o modelo com base nos dados de escolhas realizadas. Os parâmetros do modelo seriam, portanto, estimados de maneira a reproduzir as escolhas realizadas pelos entrevistados.

De acordo com o exposto na Seção 2, se um indivíduo dispõe, por exemplo, de três modos alternativos de viagem, ele é capaz de ordená-los segundo a magnitude da utilidade intrínseca percebida e saber se a alternativa com a qual ele habitualmente viaja é a melhor (1), a intermediária (2) ou a pior delas (3).

Se a alternativa empregada é a melhor das três, o valor da função utilidade intrínseca correspondente aos atributos dessa alternativa (U_{i1}) deve, também, ser o maior de todos ($U_{i1} > U_{i2}$ e $U_{i1} > U_{i3}$) e, além disso, esse valor deve ser maior que o valor da função utilidade do dinheiro corres-

pondente ao desembolso nessa alternativa ($U_{s1} < U_{i1}$).

De maneira similar, se a alternativa empregada é a intermediária (2), então os valores da função utilidade correspondentes aos atributos das alternativas (U_{i1} , U_{i2} e U_{i3}) e os valores da função utilidade do dinheiro correspondentes aos respectivos desembolsos (U_{s1} , U_{s2} e U_{s3}) devem satisfazer às seguintes relações:

- a) $U_{i1} > U_{i2}$; b) $U_{i2} > U_{i3}$;
 c) $U_{s1} > U_{i1}$; d) $U_{i2} > U_{s2}$.

Finalmente, se o indivíduo pode apenas usar a pior das três alternativas, os valores das funções utilidades devem satisfazer as seguintes desigualdades:

- a) $U_{i1} > U_{i3}$; b) $U_{i2} > U_{i3}$;
 c) $U_{s1} > U_{i1}$; d) $U_{s2} > U_{i2}$;
 e) $U_{i3} > U_{s3}$.

Foi adotado o seguinte procedimento para se encontrar os valores dos parâmetros das funções utilidade que tornam verdadeiras as desigualdades acima descritas, para a maioria dos indivíduos da amostra: a) definir uma função p que possa indicar se uma desigualdade está satisfeita ou não; b) maximizar a quantidade de desigualdades satisfeitas. O item a) foi resolvido com o auxílio de uma função do tipo

$$p = \frac{U_x}{U_x + U_y},$$

a qual pode ser transformada em

$$p = \frac{e^{\text{Ln}(U_x)}}{e^{\text{Ln}(U_x)} + e^{\text{Ln}(U_y)}} = \frac{1}{1 + e^{\text{Ln}(U_y) - \text{Ln}(U_x)}}$$

onde, U_x e U_y são funções utilidade e e é a base do logaritmo natural. Note-se que: p assume valores entre 0 e 1; que $p > 0.5$ significa que $U_x > U_y$, e, que $p < 0.5$ implica em $U_x < U_y$.

A principal vantagem de se usar a função transformada é que ela possibilita o uso de programas de computador destinados a calibração do modelo Logit, os quais já estão bastante difundidos. Basta que pequenas alterações sejam feitas no programa, de tal forma que as variáveis de entrada não sejam os atributos de viagem ou do viajante, e sim o logaritmo natural desses atributos. Caso o programa seja um pacote fechado, as alterações poderão ser feitas no conjunto de dados de entrada.

Pretendendo-se que um maior número possível de desigualdades sejam verdadeiras, é necessário que o numerador de p seja a parte maior da desigualdade e que o produto M de todas as ps seja o máximo. Matematicamente, a p pode ser interpretada como

sendo a probabilidade de que realmente $\text{LN}(U_x)$ seja maior do que $\text{LN}(U_y)$. Como a função logarítmica é estritamente crescente, $\text{LN}(U_x) > \text{LN}(U_y) \Leftrightarrow (U_x) > (U_y)$. Assim, o produto de todas as p_s , M , é equivalente a probabilidade de todas as desigualdades serem satisfeitas simultaneamente com um determinado conjunto de coeficientes. Portanto, a calibração se fará no sentido de se obter o conjunto de coeficientes que maximize essa probabilidade. O procedimento é o de maximização da verossimilhança (maiores detalhes sobre o procedimento podem ser encontradas em BURFORD, 1968). Assim, a técnica da maximização da verossimilhança foi aplicada, apesar de p ser uma função determinística.

5. Dados e processamento

A coleta de dados foi realizada, em São Carlos e em Campinas, pelos alunos da pós-graduação da área de transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, na disciplina Análise de Demanda por Transporte. O método empregado na coleta foi o da entrevista no local de trabalho. Em São Carlos, o local de trabalho escolhido foi a Escola de Engenharia de São Carlos, e em Campinas, a sede do DER-SP,

Regional de Campinas. As principais razões que levaram a escolher esses dois locais foram a conveniência (os entrevistadores conhecem a maioria dos funcionários, o que facilita a coleta) e a confiabilidade das respostas (as respostas até poderiam ser conferidas).

A inclusão de Campinas nessa pesquisa teve como finalidade evitar que o modelo fosse calibrado apenas para pequenas distâncias. A distância de viagem dos funcionários da EESC varia de 0.5 a 5 km, com grande concentração em torno de 2 km, enquanto que a maioria dos funcionários do DER-Campinas viaja de 5 a 10 km, e alguns até 18 km.

Os dados coletados foram: modo de viagem utilizado, renda familiar, distância de viagem, número de dependentes, duração da viagem, custo da viagem e a ordem de preferência dos modos, caso todos eles fossem gratuitos. Os dados referentes a modos de viagem não utilizado pelo entrevistado foram estimados pois, muitos não sabiam responder e quando o faziam forneciam valores pouco confiáveis. O custo do uso de automóvel foi estimado supondo que: o usuário de automóvel leva em conta apenas o custo do combustível; com 1 litro de combustível percorre-se 7 km

na cidade; independente da distância percorrida, o automóvel consome um volume adicional de 0.3 litro (aquecimento do motor, saída da garagem, etc.). Com relação ao tempo de viagem, foi considerado que: a) automóvel requer 5 min além do tempo de percurso (velocidade média de 30 km/h); b) no ônibus, o tempo total é a soma de tempo de percurso (velocidade média de 15 km/h), caminhada para/do ponto de ônibus, e a metade do intervalo de tempo entre veículos sucessivos que servem a linha em questão; na caminhada o tempo de viagem foi estimada com base em velocidade de 5 km/h. Finalmente, foi assumido que a energia física que cada modo de viagem requer dos usuários é de 2.8 e 4.5 kcal/min, respectivamente para automóvel (dirigindo) e caminhada (estes valores estão citados em TRRL, Grã-Bretanha, 1980). Para ônibus, o valor adotado foi 2.5 kcal/min, que é aproximadamente a média ponderada dos diferentes tempos parciais que constituem o tempo total de viagem.

6. Resultado da calibração e considerações finais

A calibração foi realizada fixando-se o valor $K_i = 100,00$. Isso evita que os valores das utili-

dades sejam muito pequenos. O resultado da calibração está apresentado no Quadro 1. O valor médio de p , calculado para esses coeficientes, foi de 0,69. Para se ter uma idéia do significado deste valor, basta lembrar que cada desigualdade é satisfeita desde que $p > 0,5$. Considerando-se que os valores de p das desigualdades não satisfeitas são menores do que 0,5, a probabilidade média de $p = 0,69$ indica um bom nível de ajuste. Por sua vez, o valor da estatística t associado a cada um dos coeficientes indica que estes são significativamente diferentes de zero, para um nível de significância de 5%.

Quadro 1. Resultado da calibração

Coefficientes	valor coef.	estatística t
K_i	100,00	---
a	1,03	7,3
b	-0,60	-18,1
c	-1,61	-15,2
K_s	3.680,00	16,6
d	1,05	17,0
e	-0,82	-9,4
f	0,35	4,7

As funções utilidade ajustadas aos dados tomam, então, a seguinte forma:

$$U_{im} = 100,0 \cdot \frac{D^{1,03}}{T^{0,60} \cdot E^{1,61}}$$

$$U_{sm} = 3.680,0 \cdot \frac{P^{1,05} \cdot N^{0,35}}{R^{0,82}}$$

onde:

- D distância entre origem e destino em linha reta, em quilômetros;
- T tempo de viagem porta-a-porta, em minutos;
- E dispêndio médio da energia física por minuto;
- P dinheiro desembolsado no modo, em US\$;
- R renda familiar, em US\$ e
- N número de pessoas na família.

Como se pode notar, todos os expoentes apresentaram sinais coerentes. Por exemplo, para um dado dispêndio de tempo (T) e energia física (E), quanto maior for a distância (D) transposta por um modo de viagem, maior é sua utilidade; logo, o sinal do expoente está correto. Outro exemplo: quanto maior for o número de pessoas (N) que dependem da mesma renda (R), maior é a utilidade da quantia (P) desembolsada. Quanto à magnitude dos expoentes, é difícil nesse estágio tecer qualquer consideração. Porém, parece bastante significativo a magnitude relativa do

expoente da energia física. Este indica que o fator de maior relevância na percepção da utilidade intrínseca do modo de viagem está ligado ao cansaço físico. Do lado da utilidade do dinheiro, o fator de menor importância é o número de dependentes da renda, e parece confirmar o ditado popular de que na casa onde comem cinco, comem seis.

O processo aqui apresentado mostrou ser uma boa alternativa para se calibrar o modelo Semi-compensatório. Pois, aproximadamente 85% das escolhas observadas foram reduzidas com o modelo calibrado. Vale lembrar, porém, que neste trabalho a pretensão não foi além de testar e mostrar o processo de calibração. Não é possível, nesse estágio, afirmar que os expoentes encontrados sejam característicos dos usuários de transporte, nem mesmo daqueles que viajam ao trabalho. O volume de dados utilizados na calibração foi relativamente pequeno justamente para evitar a demora na calibração. Para se obter expoentes mais confiáveis é necessário que os dados sejam mais numerosos.

7. Referências Bibliográficas

- BURNFORD, R.L. *Statistics: a computer approach*. Ohio: Charles E. Merrill, 1968.
- DOMENCICH, T.A. & McFADDEN, D. *Urban travel demand: a behavioral analysis*. Netherlands: American Elsevier, 1975.
- FOERSTER, J.F. Mode choice decision process models: a comparison of compensatory and non-compensatory structures. *Transportation Research*, London, nº 13A, p. 17-28, 1979.
- GOLOB, T.G. & RICHARDSON, A.J. Noncompensatory and discontinuous constructs in travel-behavior models. In: STOPHER, P.R. et al (Edit.) *New horizons in travel-behavior research*. Massachusetts: Lexington, 1981.
- KAWAMOTO, Eiji. *Um novo enfoque do processo de escolha em transporte com tratamento baseado na psicofísica multidimensional*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da USP, 1987. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes).
- KAWAMOTO, Eiji. Aplicação da psicofísica à análise de demanda por transporte de passageiros. In: II Encontro Nacional da ANPET, 1979, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 1979, p. 207-219.
- KAWAMOTO, Eiji et al. Mensuração da utilidade dos meios de transporte: uma abordagem psicofísica. *Psicologia: Teoria e Pesquisa*, [S.l.], nº 5, p. 277-296, 1988a.
- LOUVIERE, J. Psychological measurement of travel attributes. In: HENSHER, D. A., DALVI, Q. *Determinants of travel choice*. [S.l.]: Saxon, 1978, p. 148-186.
- GRÁ-BRETANHA. Department of Transport. Transport and Road Research Laboratory. *The demand for public transport*. Report of the international collaborative study of the factor affecting public transport patronage. London, 1980.
- TVERSKY, A. Elimination by aspects: a theory of choice. *Psychological Review*. [S.l.], v. 79, nº 4, p. 281-299, 1972.