

RESENHA

URBAN TRAVEL DEMAND MODELING: FROM INDIVIDUAL CHOICES TO GENERAL EQUILIBRIUM¹

Hugo Pietrantonio

Departamento de Engenharia de Transportes
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Aos que acompanham os trabalhos de Norbert Oppenheim (Professor da CUNY-City University of New York) ao longo dos anos, este livro pode ser considerado um resultado esperado e bem-vindo. As pesquisas de Oppenheim nunca limitaram-se aos enfoques dominantes na teoria e na prática da Engenharia de Transportes, em particular nos aspectos relacionados com os Modelos de Planejamento de Transportes, e sempre manifestaram uma forte vinculação às tradições da Engenharia e Economia, simultaneamente. Por este motivo, era de esperar-se que um livro vindo desta veia trouxesse novidades, e este é o caso, apesar do tom didático e introdutório assumido pelo livro em boa parte do texto (finalidade ao qual ele também pode servir se o leitor estiver disposto a abandonar algumas técnicas antigas, de certa forma ultrapassadas, e adotar a abordagem geral proposta pelo Autor).

Especificamente no que se refere ao enfoque tradicional, embora revele um resultado superior ao que os trabalhos de pesquisas do Autor permitiam antever, o livro de Oppenheim não chega a ser um exemplo

¹Oppenheim, N. (1995) - "On the Integrability Problem in Discrete Spatial Activity Systems with Site and Network Externalities". *Regional Science and Urban Economics* vol.25, no.1, pp.85-108.

de profundidade e atualização. Entretanto, é um livro valioso por incorporar temas importantes que estiveram ausentes de outras publicações até então (salvo raras exceções). É também um esforço interessante de unificação de apresentação de temas tradicionais diversos em Planejamento de Transportes (tratados sistematicamente ao longo dos seus capítulos) e de integração das técnicas da prática em Engenharia de Transportes com a Teoria Econômica tradicional (talvez o resultado mais desejado, como faz pensar a escolha de seu subtítulo, mas também o fruto menos amadurecido, entre os que o Autor colheu e ofereceu).

O livro, com seus nove capítulos, pode ser dividido em quatro partes: os dois capítulos iniciais são introdutórios, apresentando conceitos básicos para os Modelos de Planejamento de Transportes atuais (são, aliás, complementados por um apêndice sucinto mas bem organizado sobre matemática, estatística e economia); os quatro capítulos seguintes tratam das formulações hoje tradicionais para análise de modelos de redes em Planejamento de Transportes (como os modelos de escolha de rota ou rota/modo/destino, para transporte privado ou público, com escolhas de rotas determinísticas ou estocásticas, sem ou com congestionamento); o capítulo 7 trata da calibração de modelos de Planejamento de Transportes (de uma maneira única e teoricamente bem desenvolvida); os dois capítulos finais tratam dos problemas mais gerais e avançados e seu tratamento em modelos que consideram transportes e atividades de forma integrada (o tema de pesquisa tão querido ao Autor, com seu enfoque pessoal) e que determinam simultaneamente as políticas ótimas de transportes (talvez a categoria de modelos mais adequada para analisar os problemas atualmente em discussão).

A parte inicial é simples e eficaz. No capítulo 1 são primeiro apresentadas as opções metodológicas fundamentais do procedimento tradicional de Planejamento de Transportes: a divisão da área de estudo em zonas de tráfego e a utilização das redes matemáticas para descrever sua infra-estrutura de transportes (o que serve também ao propósito de introduzir a terminologia e a notação básica que será empregada ao longo do livro). Em segundo, são apresentados o enfoque de previsão

da demanda de transportes em 4 etapas e os modelos utilizados nas suas versões mais comuns e recentes (modelos de geração de viagens por análise de categorias ou regressão, modelos gravitacionais de distribuição de viagens, modelos de divisão modal multinomiais, procedimentos de alocação de tráfego baseados em caminhos ótimos e representação do congestionamento ...). A apresentação é bastante simples e, além do papel introdutório, tem o objetivo de preparar os dois itens finais do capítulo que apresentam a perspectiva do Autor: uma crítica ao enfoque tradicional (eminentemente teórica ...) e a apresentação da abordagem chamada de *trip consumer approach* (que busca a integração com a visão microeconômica tradicional na Teoria Econômica).

No capítulo 2 é feita uma revisão da Teoria da Utilidade Aleatória e da sua aplicação ao estudo dos modelos de escolha discreta usuais. Novamente, a apresentação é feita em um nível bastante simples (complementada, matematicamente, por 5 apêndices que deduzem de forma mais detalhada os principais resultados apresentados). Inicialmente, o Autor apresenta a idéia de hierarquia de decisões e a relação entre a probabilidade de escolha e a proporção da demanda para uma alternativa. A seguir, o conceito de utilidade familiar à Teoria Econômica tradicional é apresentado de forma *ad hoc* (e, a rigor, imprecisa visto que a expressão utilizada corresponderia a um conceito de função de utilidade indireta condicional, e não da função de utilidade direta convencional). Então, são revistos os aspectos principais da aplicação da Teoria da Utilidade Aleatória aos modelos de escolha discreta (incluindo os modelos Logit multinomiais, a previsão de escolhas esperadas agregadas com base na sua utilização, a medida de utilidade esperada derivada e suas propriedades, os modelos Logit hierárquicos ou aninhados, aspectos de aplicação dos modelos Logit multinomiais e as propriedades derivadas). Por fim, o procedimento básico que será utilizado pelo Autor para a previsão do comportamento agregado da demanda por transportes com base em modelos de escolha discreta, ao longo de todo o livro, é exemplificado com a introdução do conceito de consumidor (viajante, no caso) representativo e solução do seu problema de decisão correspondente.

A opção por um nível de apresentação bastante simples é uma via perigosa para apresentar conceitos e procedimentos básicos e, em certa medida, inovadores. Embora traga benefícios óbvios para a legibilidade do texto em um contato introdutório com o tema, esta opção pode ser considerada inadequada para firmar uma visão alternativa (como a desenvolvida pelo Autor ao longo do livro). A leitura dos capítulos iniciais revela, de antemão, que não se deve esperar a profundidade teórica ou prática de livros fundamentais, como os de Ben-Akiva e Lerman ou de Ortúzar e Willumsen. Não revela, entretanto, que alguns tópicos merecerão tratamentos interessantes que aconselham a perseverar no esforço de leitura, mesmo para uma pessoa mais exigente ou de conhecimento mais avançado na área.

Os capítulos da parte seguinte, que cobrem o conteúdo tradicional dos livros sobre modelagem em Planejamento de Transportes, já conterão bons frutos a colher. Cada par de capítulos, 3 e 4, 5 e 6, respectivamente, são dedicados aos problemas sem e com congestionamento. Em ambos os casos, o capítulo inicial trata com detalhe os modelos de escolha de rotas e o seguinte estende os resultados para modelos combinados (de forma genérica), concebendo modelos simultâneos. Mesmo tomando como referência um ótimo livro sobre o tema, como o de Sheffi (que cobre o mesmo conteúdo que estes capítulos porém com mais profundidade e detalhe), a apresentação acrescenta diversos aspectos de interesse (independente de aderir-se ao enfoque geral do Autor).

O capítulo 3 é o primeiro exemplo prático do estilo do livro. O enfoque geral proposto pelo Autor é aplicado aos problemas de alocação de tráfego em redes de transportes sem congestionamento (i.e., em que os atributos de viagem podem ser considerados apenas função da escolha de rota e não do nível de utilização de cada trecho da rede de transportes), examinando a alocação de viagens em redes com transporte privado e transporte público dentro do arcabouço da escolha discreta entre rotas alternativas. Para todos os casos tratados, o Autor apresenta uma caracterização geral do problema e um algoritmo prático de resolução (Pape&Moore, Dial e Spiess&Florian, respectivamente) mas sua principal preocupação é a de mostrar a possibilidade de derivação

dos resultados a partir da maximização da medida de excedente do viajante (*traveller surplus*) ou das funções de utilidade (direta ou indireta) consistentes com a Teoria da Utilidade Aleatória.

A descrição dos algoritmos é sumária e é fornecida sem uma dedução formal, mas são apresentados exemplos de resolução para todos os casos. Além disso, o algoritmo de Spiess&Florian (que é utilizado como iteração no EMME2, um dos *softwares* mais populares de Planejamento de Transportes hoje) está descrito pela primeira vez em um livro introdutório (dado que o livro de Sheffi não discute algoritmos para redes com transporte público e o livro de Ortúzar e Willumsen prefere uma apresentação genérica contrastando a formulação de Spiess&Florian com a menos famosa de seus patrícios DeCea&Fernandez). A apresentação do algoritmo de Dial está feita de forma bastante mais detalhada no livro de Sheffi (e está significativamente desatualizada para a discussão dos modelos estocásticos de escolha de rotas). Entretanto, sua descrição serve aos objetivos do Autor e permite também contrastar a forma de representação da aleatoriedade que poderia ser chamada de extrínseca, relacionada com os efeitos não observáveis que afetam a desutilidade ou impedância de viagem (característica tipicamente incorporada aos modelos de escolha discreta), com a aleatoriedade que poderia ser chamada de intrínseca, relacionada com a previsão de escolha entre linha de transporte público tomando o primeiro veículo de um conjunto atrativo de linhas (o Autor chama o algoritmo de Spiess&Florian de determinístico e propõe em um exercício sua extensão para incorporar a aleatoriedade extrínseca). A determinação do conjunto atrativo de linhas, um problema básico na análise de redes com transporte público, não é claramente tratado ou sequer identificado (limitando-se o mérito do Autor em não omitir esta classe de problemas).

O capítulo 4 é a extensão trivial do capítulo anterior ao contexto mais geral dos modelos combinados de escolha em Planejamento de Transportes (modo/rota, destino/modo/rota e viagem/destino/modo/rota). Na verdade, os modelos combinados foram originalmente propostos no contexto com congestionamento (que é examinado nos

capítulos posteriores) e, neste contexto sem congestionamento, apenas provêm uma justificativa para a estrutura seqüencial do procedimento tradicional em etapas. O Autor estende a abordagem de escolha discreta para a geração e distribuição de viagens (de uma maneira formal, ignorando as relações tradicionais entre atividades localizadas e geração/distribuição de viagens, que são a justificativa para os modelos gravitacionais vinculados). A abordagem do Autor trata destas categorias de problemas sem dificuldades e fornece uma justificativa melhorada para as antigas formulações de maximização de entropia, estendidas a um contexto mais simples (sem congestionamento).

Novamente, a ênfase do Autor está na demonstração de que os problemas podem ser derivados das formulações de maximização da medida (generalizada) do excedente do viajante ou das funções de utilidade consistentes com a Teoria da Utilidade Aleatória. No entanto, sua exposição não revela qualquer grau de consciência dos problemas específicos da análise de redes multimodais (característica típica da tradição norte-americana). Por exemplo, o problema de identificação dos caminhos ótimos para cada alternativa modal exige a definição de novos conceitos (pelo menos a distinção entre modos de usuário ou de viagem e modos físicos ou de transporte) e coloca novos problemas (como definir as sub-redes modais e identificar os caminhos ótimos utilizando cada modo de viagem).

O passo relevante seguinte está no capítulo 5, e sua seqüência no capítulo 6, em que a representação do congestionamento como externalidade de rede leva aos modelos de escolha de rotas atualmente mais aceitos. Entretanto, os trabalhos de pesquisa do Autor, que concentraram-se no efeito das externalidades localizadas, trazem um ponto de vista particular e uma direção óbvia de generalização das formulações hoje tradicionais, que me parece interessante (o que aliás anuncia-se desde o primeiro capítulo, em que a apresentação do modelo gravitacional inclui parâmetros de sensibilidade à escala da produção e atração de atividades nas zonas, que normalmente seriam assumidos iguais a 1 nas apresentações mais convencionais e será objeto do capítulo 8). Aqui, a importância relativa dos capítulos inverte-se, visto que os problemas

apresentados no capítulo 5 são apenas blocos necessários a construir uma formulação mais geral (incluindo pelo menos a interação entre modos privados e públicos ou então as economias ou deseconomias de aglomeração).

A apresentação do Autor segue de forma bastante próxima a exposição do problema sem congestionamento (na minha opinião, mais do que seria desejável e mesmo possível) e repousa sobre a contribuição original de Beckman (ao invés de partir dos princípios de Wardrop, por exemplo, que seria a referência inicial para a maioria dos autores modernos em Engenharia). No contexto determinístico em redes com transporte privado, a formulação original de otimização de Beckman é enunciada de início e a sua correspondência com o princípio de escolha entre rotas enunciado no caso sem congestionamento é demonstrada a partir da análise das condições de Karush-Kuhn-Tucker do problema de otimização (que equivalem ao primeiro princípio ou princípio de equilíbrio do usuário de Wardrop), isto para o caso com função de desempenho separável. Já a discussão sobre o caso com aleatoriedade extrínseca em redes com transporte privado parte de um ponto de vista não tradicional, a formulação como um problema de ponto fixo, antes de apresentar a formulação de otimização baseada em Fisk, que ajusta-se adequadamente ao quadro geral proposto pelo Autor. Novamente, é enfocado o problema correspondente em redes com transporte público (e aleatoriedade intrínseca) e congestionamento nas ligações (também não encontrada em outros livros com este nível de abordagem). Para todos os problemas básicos são apresentados os algoritmos hoje clássicos (de Frank-Wolfe e de Evans, ou a extensão do algoritmo de Spiess&Florian) e sua utilização é demonstrada em exemplos ilustrativos.

O capítulo 6 apresenta, então, a extensão para o contexto dos modelos combinados em redes com congestionamento. A apresentação dos problemas equivalentes de otimização traduz os antigos resultados originalmente obtidos nas formulações de maximização de entropia (como as desenvolvidas por Boyce, que aliás assina a apresentação do livro) para o quadro geral de referência do Autor: a maximização da

medida (generalizada) de excedente do viajante representativo ou das funções de utilidade direta ou indireta consistentes com a Teoria da Utilidade Aleatória. O Autor prefere iniciar pela apresentação de um modelo combinado de escolha de destino e rota, que acrescenta externalidades localizadas (ao invés de modo e rota, como foi a abordagem original de Evans e a ordem utilizada no livro de Sheffi) e trata também a extensão aos casos com modos de transporte público (com pouca ênfase à interdependência entre modos). A maior parte dos resultados citados sobre os modelos ou algoritmos descritos é apresentada sem demonstração ou referência adequada, mas há novamente exemplos ilustrativos que permitem verificar a aplicação dos procedimentos. A apresentação deste processo de generalização chega a ser feito de forma mecânica e pouco interpretativa.

Os capítulos 5 e 6 são, na minha opinião, pontos fracos da proposta teórica do Autor: sua visão não é correntemente aceita no meio acadêmico ou profissional (pelo contrário, difere das posições usualmente adotadas) nem é rigorosamente demonstrada em seus trabalhos de pesquisa ou neste texto (o Autor desenvolveu os argumentos apresentados em Oppenheim/95, artigo publicado após a edição do livro). A alternativa utilizada, além de ser menos geral e menos adequada do ponto de vista teórico e didático, mantém encoberta a diferença entre a função objetivo do viajante representativo e a medida de benefício ou custo social mensurada no mercado de transportes (que são coincidentes no caso sem externalidades, mas apenas neste caso). A posição usual é de que a medida teórica de custo ou benefício social não se altera em função da existência de externalidades, apenas seu valor é alterado em função do fato de ter-se uma solução de equilíbrio diferente para o problema de alocação de tráfego (o Autor não menciona este aspecto e parece, mesmo, não ter consciência deste fato e de suas implicações). Portanto, a interpretação da função de Beckman como uma medida de benefício ou custo social (além de ser a função objetivo do viajante representativo) é uma liberalidade do Autor, que não tem fundamentação teórica.

O capítulo isolado da parte seguinte (7), que trata da calibração dos modelos de Planejamento de Transportes (chamado de Estimativa dos Parâmetros dos Modelos, como seria conveniente em uma terminologia estatística ou econométrica) volta, entretanto, a oferecer uma contribuição positiva e original ao contexto dos textos didáticos.

Embora não trate especificamente dos métodos usuais de calibração dos diferentes tipos de modelos utilizados em Planejamento de Transportes (que, aliás, não foram tratados no livro com exceção da discussão no capítulo 1), a contribuição do Autor é novamente singular por acrescentar observações interessantes à exposição usual sobre a estimativa de parâmetros dos modelos a partir do método de maximização de verossimilhança (com dados desagregados ou agregados). A contribuição mais interessante é a discussão sobre a base teórica dos procedimentos de calibração baseados no princípio de máxima entropia ou mínima informação, que não pode ser encontrada em outros livros do gênero. Na verdade, o princípio teórico fundamental não está adequadamente exposto e relacionado com os pontos de vista referentes em Estatística ou Econometria mas, pelo menos, o método é apresentado como uma alternativa ao de maximização de verossimilhança (com equivalência de resultados onde este último é hoje operacional e aplicável em um contexto mais amplo). Novamente os resultados mais especializados são muitas vezes apresentados sem demonstração ou referências adequadas mas são fornecidos exemplos ilustrativos sobre a utilização dos procedimentos.

Do ponto de vista prático, que não parece ter preocupado o Autor, existiriam críticas diversas que poderiam ser postas: a falta de discussão sobre a calibração das funções de desempenho ou a não apresentação dos procedimentos baseados em mínimos quadrados (em particular os aplicáveis às especificações linearizáveis, que poderiam ser resolvidos com pacotes estatísticos amplamente disponíveis e conhecidos e mereceriam pelo menos uma menção e crítica, se não uma recomendação). Entretanto, face à perspectiva assumida pelo Autor, a discussão não seria nunca colocada nos termos usuais das calibração dos modelos convencionais usados em Planejamento de Transportes e

somente poder-se-ia esperar uma apresentação de técnicas de utilização geral (tarefa que este capítulo cumpre de forma bastante satisfatória).

A parte final é também inovadora e merecedora de atenção especial. O capítulo 8 trata dos modelos integrados de atividades e transportes e o capítulo 9 trata da oferta ótima de transportes (ambos temas de atualidade e importância indiscutível).

Naturalmente, a inclusão de geração/distribuição de viagens nos modelos combinados simultâneos apresentados no capítulo 6 (ainda que de maneira mecânica e formal, como simples generalização da aplicação dos modelos de escolha discreta hierárquicos, desprovidos de conteúdo específico no que se refere às teorias de localização de atividades urbanas) cobrem um passo essencial no que se refere ao que normalmente é relacionado ao conceito de modelos integrados de atividades e transportes. Entretanto, o conteúdo precípua do capítulo 8 é de natureza complementar e trata do contexto em que há transações intermediárias entre atividades (i.e., usuários fazem compras em estabelecimentos que suprem usuários, e eventualmente realizam transações entre si, sendo os custos de transportes endógenos em função do uso da infra-estrutura de transportes e também determinantes da distribuição da demanda dos usuários e da oferta dos estabelecimentos). Neste capítulo, a apresentação é baseada em um modelo simples (com apenas um produto e sem a ligação entre distribuição de emprego e população) e as formulações mais gerais (com produção, atacado, varejo e consumo, além de diversos produtos) são apenas mencionadas e deixa muito a desejar se for lembrada a grande tradição dos modelos integrados de uso do solo e transportes (como o modelo de Lowry, no contexto urbano, ou o modelo de Leontief, no contexto regional, discutidos no livro de De La Barra, por exemplo). O capítulo reflete os trabalhos do Autor que buscaram integrar externalidades localizadas e os fluxos de transporte de carga aos modelos derivados da visão mais convencional mas a descrição é novamente feita de forma mecânica e pouco interpretativa.

Por fim, o capítulo 9 trata dos modelos normativos, de determinação da oferta ótima de transportes (infra-estrutura ou serviço), no contexto dos modelos discutidos em todo o livro (i.e., que incluem uma previsão do comportamento reativo da demanda). O Autor inicia por propor uma interessante taxonomia para classificação dos modelos normativos desta natureza em função da decisão de oferta tratada (as ligações da rede, o nível de serviço ou os preços), dos objetivos buscados (minimização de custos sociais de viagem ou de custos de oferta, maximização da demanda atendida), da representação da resposta dos viajantes (determinística ou estocástica), da presença ou ausência de externalidades, do horizonte de análise (curto, médio e longo prazo). Mais que um capítulo teórico e didático, o conteúdo apresentado é o de uma revisão dos trabalhos recentes que vêm sendo publicados sobre o tema. Entretanto, o Autor apresenta algumas formulações prototípicas que (somadas a revisão bibliográfica detalhada) servem como uma introdução interessante aos trabalhos que vêm sendo propostos até agora.

O passo inicial é a formulação do problema de determinação da oferta ótima como um problema de otimização em dois níveis (uma das formas mais comumente adotadas e a que exemplifica de forma mais direta os problemas computacionais que surgem quando a função de reação não tem uma forma analítica mas resulta de um problema de otimização auxiliar). A partir deste protótipo geral, o Autor apresenta formulações alternativas para 3 problemas básicos: o problema de seleção do conjunto ótimo de alterações em redes de ligações viárias (*Network Design Problem*, sem e com congestionamento), o problema de determinação das frequências ótimas de oferta em linhas de transporte público (com um enfoque global e considerando o comportamento reativo dos usuários na escolha de formas de viagem, mas dada a estrutura dos itinerários das linhas, outra dimensão de decisão crucial) e o problema de determinação dos valores ótimos de pedágios viários (*Road Pricing Problem*, no contexto com congestionamento, ou *Transportation Pricing Problem*, no caso de considerar simultaneamente as tarifas de transporte público). A apresentação está longe de tocar aspectos práticos da aplicação desta categoria de modelos e, apesar de já algo desatualizada

(e fatalmente teria de ser assim), é uma contribuição única relacionada aos problemas desta natureza (cujo conteúdo mais próximo somente seria encontrado em textos gerais de análise de sistemas de transportes, como é o caso de livro clássico de Manheim).

Em adição aos aspectos revistos até aqui, deve-se mencionar que todos os capítulos apresentam uma lista de exercícios, boa parte deles resolvidos no Apêndice B, além de exemplos numéricos diversos que são interessantes como aplicação dos procedimentos expostos, no seu corpo básico. Esta característica provavelmente decorre do uso do material deste livro nos cursos ministrados pelo Autor na CUNY e auxilia grandemente seu uso com fins didáticos. Entretanto, a dubiedade decorrente da busca de características adequadas a um livro introdutório mas com a opção por apresentar um enfoque alternativo (mesmo que, em grande parte, apenas conceitual e genérico) prejudica seu uso como um livro texto, em função do tratamento simples dos demais tópicos tratados.

Na verdade, esta dubiedade resolve-se se for entendido que o objetivo do Autor é o de apresentar seu enfoque geral para integração entre a prática da modelagem da Engenharia e a Teoria Econômica, mais que os princípios ou procedimentos específicos que apresenta de forma singela e resumida. No entanto, face ao conteúdo incluído (e à sua ausência em outros livros texto em Planejamento de Transportes), o livro torna-se uma referência complementar muito interessante para cursos de graduação (mesmo em inglês) ou especialmente de pós-graduação que tratem do assunto. Portanto, em que pesem as críticas enumeradas acima, trata-se de uma referência bastante útil.