



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Estimação de um Modelo de Escolha de Caminhos em Transportes Colectivos Usando Informação de Bilhética

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação

Autor

André Filipe Rosária Gomes

Orientador

**Professor Doutor Gonçalo Homem de Almeida Rodriguez
Correia**

Co-Orientador

Professor Doutor Luís Miguel Garrido Martinez

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação constituiu um grande desafio, não só pelo seu carácter inovador, mas também por ser o meu primeiro grande trabalho científico.

O meu primeiro e principal agradecimento vai por isso para o orientador principal deste trabalho, o Professor Gonçalo Correia, cuja orientação, paciência, disponibilidade e trabalho investido nesta dissertação foram essenciais para a sua realização. Vários foram os conhecimentos transmitidos e conselhos oferecidos que agradeço com toda a estima, para além das várias conversas interessantes que contribuem para o meu crescimento científico.

Em segundo lugar quero agradecer ao meu co-orientador, o Professor Luís Martinez do Instituto Superior Técnico e à JMV Consultores, pela disponibilização dos dados da OTLIS e do relatório de mobilidade em transportes colectivos na AML, a base para a realização deste trabalho e por todo o acompanhamento e ajuda que me prestou, sempre pronta e preciosa.

Quero também agradecer à minha casa, a Real República do Ras Tepartha, e aos meus irmãos com quem partilhei esta experiência única de vivência muito positiva e que me proporcionou as melhores condições para a realização deste trabalho. Guardo memórias muito alegres e aprendi muito na nossa casa.

Um agradecimento também para todos os meus colegas e amigos da Universidade de Coimbra com quem privei que felizmente são demasiados para aqui enumerar. Aos professores pelo conhecimento transmitido que contribuiu para a realização desta dissertação. Aos amigos de sempre que estão sempre lá.

E à minha família, por tudo.

André Gomes

RESUMO

Os sistemas de transporte colectivo das grandes cidades enfrentam actualmente dois desafios quase contraditórios. Por um lado existe dificuldade em responder a toda a procura como evidenciam as lotações nas horas de ponta e principais percursos e estações, e por outro as condições económicas e ambientais exigem à sociedade uma mudança de atitude que conduza a um uso mais generalizado do transporte colectivo em detrimento do transporte individual, mudança essa que só irá ocorrer se os transportes colectivos aumentarem a sua atractividade e conveniência.

Mas as acções a adoptar para conseguir esse aumento de atractividade não são claras nem iguais para todos os sistemas de transportes. Para a sua determinação é comum o estudo estatístico da população e das características do sistema de transportes em conjunto com a realização de inquéritos aos utilizadores para determinar as suas preferências. Estas informações são usadas na criação de modelos de escolha de caminhos que permitem um conhecimento mais preciso dos factores mais importantes para os utilizadores e que determinam as suas escolhas no que respeita as várias alternativas de modo e caminhos dentro do sistema.

O objectivo desta dissertação foi a determinação de um modelo de escolha de caminhos em transporte colectivo na cidade de Lisboa, usando um modelo de escolha discreta do tipo Logit Multinomial. A sua estimação foi feita através de dados de preferências reveladas, recolhidos de forma automática e em massa na operação do sistema de bilhética integrada sem contacto da cidade de Lisboa através de *smart cards* individuais.

O modelo foi construído com base em variáveis de nível de serviço a partir da base de dados disponibilizada, cuja organização é também tratada neste estudo, usando-se as variáveis geralmente utilizadas neste âmbito como o tempo de viagem a bordo, o número de transbordos, o tempo de deslocação a pé no transbordo entre outras. Foram também usadas variáveis socioeconómicas como a percentagem de jovens residentes na zona de origem da viagem.

Os resultados obtidos indicam que os critérios mais importantes na escolha de caminhos para os utilizadores do sistema de Lisboa são o número de alternativas de viagem dentro do mesmo modo, o tempo de viagem a bordo, o número de transbordos e o tempo de deslocação a pé nos transbordos. A análise dos resultados indica que existe uma preferência dos utilizadores pelas características do Metropolitano, favorecendo os caminhos que se façam neste modo. Outra evidência é a alta penalização conferida ao transbordo em autocarro, que é percebida como quatro vezes mais incómoda que um transbordo no Metropolitano.

ABSTRACT

Nowadays Public transit systems in large cities are facing two almost contradictory challenges. On one hand, there is a great difficulty in satisfying the demand as evidenced by the full stations and vehicles in peak-hour, and on the other hand the economic and environmental challenges of nowadays require from the society a change of attitude that leads to a more widespread use of public transit systems instead of private transport, but that change will only happen if public transit systems can rise their appeal and convenience for most users.

The course of action required to achieve this increase in appeal is not by all means clear nor is the same for every other transit system. In order to determine that course of action it is common to carry out studies on the statistics of the population and the features of the transit system together with a survey among the users to determine their preferences. This information is used in the construction of route choice models that enable a precise understanding of the most important factors for the users' satisfaction and the factors that rule their decision in using each transit mode and route choice.

The goal of this dissertation was the determination of a route choice model for the public transit system in the city of Lisbon, using a discrete choice model with a Multinomial Logit design. Its estimation was based in mass data of revealed preferences nature collected automatically in the operation of the automated fare collection system in use by all major public transport providers in Lisbon, through the use of individual *smart cards*.

The model was built mainly with the use of level of service variables derived from the data base provided, which we also explore in this work for its organization, being these variables common practice in other studies of this field, such as on-board time, number of transfers, walking time in transfers among others. We also used socioeconomic variables such as the percentage of young people residing in the home-end of the travel.

Results of the model estimation show that the most important criteria in the route choice process for the users of the Lisbon transit system are the number of available route alternatives, the on-board time, the number of transfers and the walking time in the transfers. The result analysis indicates the preference of the users for the rapid transit characteristics, favoring routes traveled by this mode. Another important observation is the high penalty given to the transfers in bus, which is perceived as four times more tiresome than a single transfer in the rapid transit.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE QUADROS.....	vi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento Geral	1
1.2 Objectivo.....	2
1.3 Estrutura da Dissertação	3
2 ESTADO DA ARTE.....	1
2.1 Modelos de Escolha Discreta.....	1
2.1.1 O modelo Matemático Logit	4
2.1.2 Estimação do Modelo Logit Multinomial.....	6
2.2 Modelos de Escolha de caminhos	12
2.3 Sistemas de Bilhética.....	20
2.3.1 Smart Card	20
2.3.2 Sistema de Bilhética Sem Contacto.....	21
2.3.3 Bilhética Integrada.....	23
2.3.4 Experiência internacionais	23
2.3.5 Vantagens.....	25
2.3.6 Potencialidades.....	26
2.3.7 Críticas	27
3 SISTEMA DE BILHÉTICA DE LISBOA.....	28
3.1 Enquadramento	28
3.1.1 Mobilidade em Lisboa	28
3.1.2 Operadores	30
3.1.3 Intermodalidade	31
3.2 Base de dados.....	31
4 CONSTRUÇÃO DE UM MODELO DE ESCOLHA DE CAMINHOS EM TRANSPORTES COLECTIVOS	44
4.1 Metodologia	45
4.2 Estimação do modelo.....	49
4.3 Resultados.....	54
5 CONCLUSÕES	62
6 BIBLIOGRAFIA	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Gráfico da curva Logit (Fonte: Train, 2002)	6
Figura 2.2 - Gráfico de uma função logarítmica	8
Figura 2.3 - Mapeamento da relação entre o pseudo- R^2 e o R^2 (Fonte: Domencich e McFadden, 1975)	11
Figura 3.1 - Distribuição de passageiros por título de transporte (Fonte: Relatório de contas do Metropolitano de Lisboa 2011).....	30
Figura 3.2 - Distribuição tarifária por passageiro na Carris em 2012 (Fonte: Relatório de contas da Carris 2012).....	31
Figura 3.3 - Número de viagens por utilizador por dia (Fonte: Bilhética OTLIS; Tratamento JMV CONSULTORES)	33
Figura 3.4 - Média de transbordos por viagem (Fonte: Bilhética OTLIS; Tratamento JMV CONSULTORES).....	33
Figura 3.5 - Número de operadores utilizador por viagem (Fonte: Bilhética OTLIS; Tratamento JMV CONSULTORES)	34
Figura 3.6 - Estatísticas de mobilidade por suporte de título (Fonte: Bilhética OTLIS; Tratamento JMV CONSULTORES)	36
Figura 3.7 - Frequência de utilização do cartão Viva Viagem em dias por semana (Fonte: Bilhética OTLIS; Tratamento JMV CONSULTORES).....	37
Figura 3.8 - Frequência de utilização do cartão Lisboa Viva em dias por semana (Fonte: Bilhética OTLIS; Tratamento JMV CONSULTORES).....	37
Figura 3.9 - Diagrama espaço-tempo ilustrador da informação contida na base de dados das viagens.....	39
Figura 3.10 - Distribuição de zonas pela cidade de Lisboa.....	40
Figura 3.11 - Distribuição de paragens pela cidade de Lisboa.....	41
Figura 3.12 - Distribuição modal das viagens realizadas dentro da cidade de Lisboa	42

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Algumas das variáveis consideradas por Gonçalves (2012).....	16
Quadro 3.1 - Estatística de utilização do cartão Viva em Maio de 2012 (Fonte: Bilhética OTLIS; Tratamento JMV CONSULTORES).....	32
Quadro 3.2 - Informação disponível na base de dados de bilhética da OTLIS.....	34
Quadro 3.3 - Agregação de viagens por par O/D e distribuição modal.....	42
Quadro 4.1 - Variáveis explicativas usadas na formulação do modelo.....	46
Quadro 4.2 - Ajuste estatístico do modelo: Teste do pseudo- R^2	49
Quadro 4.3 - Comparação do valor obtido de pseudo- R^2 com outros estudos.....	50
Quadro 4.4 - Comparação de escolhas reais vs previsão oferecida pelo modelo.....	50
Quadro 4.5 - Percentagem de acertos do modelo.....	51
Quadro 4.6 - Comparação do valor obtido de acertos global com outros estudos.....	51
Quadro 4.7 - Resultados da estimação do modelo.....	52
Quadro 4.8 - <i>Trade-offs</i> calculados entre alguns atributos do modelo.....	58
Quadro 4.9 - Comparação do valor obtido para o <i>trade-off</i> do transbordo pelo tempo a bordo com outros estudos.....	59
Quadro 4.10 - Comparação do valor obtido para o <i>trade-off</i> do tempo de deslocação a pé pelo tempo a bordo, para o autocarro, com outros estudos.....	61

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento Geral

Um grande desafio dos transportes colectivos (TC) actualmente é a sua atractividade e conveniência para a população em geral. Para um sistema ser atractivo ele tem de ser planeado de forma muito eficaz e de maneira que responda às preferências e necessidades dos cidadãos. Com o novo paradigma da sustentabilidade que se impõe em todos os domínios, e não apenas na frente ambiental, mas também na vertente económica e social, sendo o sistema de transportes um dos pontos chave da competitividade das economias desenvolvidas, é de maior importância a modernização dos sistemas de transportes tanto a nível de infraestruturas como de gestão e planeamento da oferta e serviços. Estudos mostram que as infraestruturas de transporte são, nas maiores metrópoles do mundo, o maior problema a nível de infraestruturas públicas e a maior prioridade de investimento pois apresentam o maior potencial de ganhos de competitividade (Siemens AG CC, 2010) através da sua melhoria e modernização.

O papel do planeador ganha cada vez mais destaque, e com os modernos sistemas de bilhética com bases de dados unificadas de todas as viagens de todos os operadores de uma zona urbana, passa-se de um planeamento baseado em inquéritos e estimativas, de amostragens muitas vezes demasiado limitadas e realização muito onerosa, para um planeamento objectivo em que podemos analisar com enorme detalhe e extensão o comportamento dos utilizadores através da sua utilização do sistema, designadas como preferências reveladas.

É assim possível estudar quais os atributos mais importantes do desenho do sistema de TC para a população geral e para vários estratos socioeconómicos ou zonas específicas da cidade e região. Isto é importante pois torna possível um melhor conhecimento sobre que mudanças operar para obter mais atractividade para o sistema, se baixando o preço ou o tempo de viagem, aumentando a frequência, promovendo a intermodalidade ou o foco na melhoria de um determinado modo, ou perceber quão penalizador é o transbordo. Deseja-se então conseguir ferramentas que assistam na criação de um sistema mais eficaz e atractivo, que potencie a sua utilização generalizada e a qualidade do serviço prestado.

No presente cenário de crise financeira e recessão económica em Portugal, que tantas mudanças tem trazido no quotidiano do País, verifica-se que infelizmente os hábitos de transporte dos Portugueses em relação aos TC não sofreram grandes mudanças. O transporte individual (TI), automóvel, continua a ser o mais popular e utilizado, muitas vezes de forma ineficaz como nas deslocações para o trabalho em que o condutor viaja sozinho no seu troço diário casa-trabalho, causando ainda graves problemas de congestionamento e poluição que

afectam negativamente não só a economia e ambiente mas também a qualidade de vida de toda a população.

Posto tudo isto, seria de esperar uma mudança de paradigma com as pessoas procurando cada vez mais os TC, mas de facto a estatística de utilização na Área Metropolitana de Lisboa (AML) revela uma diminuição do número de viagens diárias no total dos operadores, sendo que o grande aumento do desemprego pode explicar esta queda pois a população activa é a maior utilizadora, mas demonstra também que o transporte colectivo em Lisboa ainda não tem características que permitam a atração de novos utilizadores.

É então necessário objetivar medidas que alterem o paradigma de utilização dos TC nas nossas cidades, tornando-os mais atractivos, acessíveis e inclusivos, medidas estas baseadas em métodos científicos bem fundamentados e formulados de forma a conduzir um processo eficiente de modernização dos sistemas de transporte com uma gestão e planeamento frutíferos e economicamente bem-sucedido.

1.2 Objectivo

O principal objectivo desta dissertação é a formulação de um modelo de escolha de caminhos em TC para a cidade de Lisboa, usando um modelo de escolha discreta do tipo Logit Multinomial, baseando-se a sua estimação em dados recolhidos pelo sistema de bilhética sem contacto de Lisboa. Este sistema foi inicialmente aplicado ao Metropolitano de Lisboa em 2002 e tem desde então crescido e sido adoptado pelos muitos operadores de TC da AML, entre os quais todos os operadores públicos e alguns privados (Fertagus e Metropolitano Sul do Tejo).

Uma valência muito importante deste sistema é a sua capacidade de guardar com grande detalhe os dados das transacções feitas em todo o sistema de transportes, de forma contínua no tempo. Isto significa que o sistema é uma fonte de informação preciosa para os engenheiros de transportes estudarem e criarem soluções para a melhoria e evolução do sistema, que de outra forma só seria obtida com um elevado custo económico e esforço de organização e realização de inquéritos.

Há algum tempo que se especula e teoriza sobre as potencialidades dos dados destes sistemas de bilhética, nomeadamente a sua aplicação na estimação de vários tipos de modelos, mas na verdade os estudos realizados até agora focam-se mais no tratamento e complementação desses dados, muitas vezes incompletos e inconsistentes na sua forma inicial, do que propriamente na construção de aplicações inovadoras.

Assim, pretende-se também mostrar a natureza dos dados e a sua organização e analisar a viabilidade e alcance do seu uso na construção de um modelo, especificamente um de escolha

de caminhos em transporte coletivo, assim como tentar perceber as eventuais lacunas a suprir para a obtenção de melhores resultados que permitam a sua utilização e integração em mecanismos definidos de gestão e planeamento da oferta e rede de TC.

1.3 Estrutura da Dissertação

A dissertação está organizada em 5 capítulos. O presente capítulo é a introdução à dissertação, os motivos que a originaram e o âmbito em que enquadra, definindo-se os objectivos do trabalho e apresentado-se a estrutura do documento para uma mais fácil leitura e entendimento da realização e organização do mesmo.

O capítulo 2, intitulado “Estado da arte”, está dividido em três sub-capítulos intitulados Modelos de Escolha Discreta, Modelos de Escolha de Caminhos e Sistemas de Bilhética. No primeiro é feita uma revisão dos conhecimentos base que sustentam o trabalho a desenvolver e que serão aplicados na construção e cálculo do modelo de escolha discreta e na análise dos resultados. No segundo sub-capítulo é feita uma revisão dos trabalhos mais relevantes e recentes em modelos de escolha de caminhos de forma a referenciar e contextualizar as opções tomadas na organização dos dados e escolha de variáveis do modelo. No terceiro sub-capítulo, Sistemas de Bilhética, são explicados os conceitos de *smart card*, sistemas de bilhética sem contacto e de bilhética integrada que caracterizam os modernos sistemas de bilhética de TC urbanos. Referem-se ainda algumas experiências internacionais destes sistemas e apresentam-se as suas principais vantagens, críticas e potencialidades.

O capítulo 3, “Sistema de bilhética de Lisboa”, inicia-se com um enquadramento da cidade de Lisboa e região envolvente, o seu sistema de mobilidade e as características do sistema de transporte colectivo como os cartões Viva e os operadores. Prossegue-se para uma introdução à base de dados do sistema de bilhética com as estatísticas gerais de uso do sistema de transportes para o mês de Maio de 2012 e uma explicação acerca da organização dessa base de dados. É descrito o processo de tratamento dos dados e a sua integração num Sistema de Informação Geográfica (SIG) com outras informações de forma a obter somente os dados de viagens efectuadas no interior da cidade de Lisboa.

O capítulo 4, “Construção de um modelo de escolha de caminhos em transportes colectivos”, divide-se em 3 sub-capítulos nos quais se descreve o processo de construção e estimação do modelo e a análise de resultados. No primeiro sub-capítulo, metodologia, define-se e fundamenta-se a formulação do modelo Logit Multinomial e o seu funcionamento, e caracterizam-se as variáveis que o compõem. No segundo sub-capítulo, estimação do modelo, apresentam-se os resultados obtidos no exercício de modelação e analisa-se a qualidade do ajuste aos dados e a significância dos atributos considerados, comparando-se com os resultados conseguidos noutros estudos. No último sub-capítulo, resultados, faz-se uma

análise e interpretação dos valores obtidos para os coeficientes dos atributos e calculados alguns *trade-offs*, comparando-se mais uma vez com os resultados de outros autores.

Por fim no capítulo 5, “Conclusões”, são anunciados os critérios mais importantes na escolha de caminhos no sistema de TC de Lisboa segundo os resultados obtidos pelo nosso modelo e a nossa interpretação dos mesmos. Avalia-se o trabalho realizado e apresentam-se as conclusões e indicações para melhoria do sistema de transportes de Lisboa, do sistema de bilhética sem contacto e do modelo de escolha de caminhos desenvolvido. Por fim dá-se algumas ideias e orientações para a continuação deste estudo e para trabalhos futuros no âmbito dos sistemas de bilhética sem contacto e possíveis aplicações.

2 ESTADO DA ARTE

O capítulo de estado da arte desta dissertação foi dividido em 3 subcapítulos. No primeiro são apresentados os modelos de escolha discreta e a teoria de utilidade estocástica, os seus princípios e formulações, desenvolvendo-se esta matéria de acordo com a pertinência e enquadramento da dissertação. Assim, fez-se uma revisão de conceitos e características do modelo Logit, descreveu-se o modo de estimação do Logit Multinomial, a obtenção de dados por preferências reveladas (PR) e preferências declaradas (PD) e a calibração do modelo por máxima verosimilhança a partir desses dados. Por fim apresenta-se o teste de ajuste do pseudo- R^2 e o teste de significância das variáveis explicativas que serão utilizados para a validação do modelo.

No segundo subcapítulo introduziu-se o problema de escolha de caminhos em TC urbanos com uma descrição muito breve da história do desenvolvimento de soluções para o mesmo. De seguida apresentam-se alguns artigos que sustentam a hipótese multicritério na construção de modelos de escolha de caminhos e nota-se as abordagens usadas para obtenção de dados de base ao modelo. Por fim é feita uma referência mais pormenorizada a artigos recentes e inovadores na mistura de dados de PR e PD e uso de variáveis topológicas da rede e outras referentes às infraestruturas e aos veículos.

No último subcapítulo apresentam-se os modernos sistemas de bilhética sem contacto e os *smart cards*, com uma descrição do seu funcionamento e organização e explora-se o conceito de bilhética integrada num sistema de transportes intermodal. São enumerados alguns dos sistemas internacionais mais relevantes, com especial destaque para o *Oyster card* de Londres, terminando com um resumo das vantagens, potencialidades e críticas a estes sistemas.

2.1 Modelos de Escolha Discreta

Em qualquer domínio da ciência é recorrente o uso de modelos para estudar e explicar fenómenos reais. Para a resolução de problemas práticos é muitas vezes necessário uso de modelos matemáticos, existindo variadas abordagens para diversos campos e aplicações mas a filosofia base é comum, existindo de facto uma linguagem matemática universal para tratar os mais variados problemas.

O objectivo de um modelo matemático é a representação quantitativa, o mais fiel possível, de um sistema real, a sua forma, funcionamento e a sua orgânica, ou seja, a maneira como ele responde a modificações e estímulos. Um modelo pode ser real ou abstracto, sendo os modelos matemáticos em essência modelos abstractos que se expressam por equações ou

considerações matemáticas. O desafio em sistemas complexos consiste, não só numa correcta e fiel ilustração das várias características da realidade que se modela, mas também a decisão de quais as características que são determinantes para uma representação correcta e quais podem ser desprezadas sem influenciarem significativamente os resultados obtidos em comparação com a realidade. Este facto deve-se a que num sistema complexo existem inúmeras características a governar o seu funcionamento, algumas delas até de difícil identificação, pretendendo-se algum grau de simplificação sem perda de fidelidade. No caso particular deste trabalho este problema coloca-se na forma da escolha dos atributos (variáveis explicativas) que são estatisticamente significativas para explicar as escolhas dos utilizadores do sistema de TC de Lisboa.

O exercício da construção do modelo matemático é interessante e importante pois implica uma análise extensa dos dados disponíveis e da realidade que se pretende estudar, tornando possível uma reflexão acerca da qualidade da informação à disposição, da sua organização e de eventuais erros cometidos aquando da sua agregação, sendo assim é também uma aprendizagem para o investigador ou profissional positiva para o futuro. Esse conhecimento pode ainda ser usado na melhoria do sistema em estudo e da recolha de informação, no caso dos sistemas de transporte e particularmente os que fazem uso de bilhética electrónica e unificada, que são ainda sistemas jovens e passíveis de muita evolução e desenvolvimento, procurando-se uma melhor organização do sistema e um melhor funcionamento da bilhética e das suas possibilidades.

Quando os modelos matemáticos se dedicam ao estudo da escolha ou decisão de um agente (pessoa, grupo, empresa, etc.), eles denominam-se de modelos de escolha (*choice modelling*), e encontramos nesta área dois tipos básicos de modelos que se diferenciam pela natureza da hipótese e dados em causa. Teremos assim modelos de escolha discreta (*discrete choice models*) e modelos de regressão (*regression analysis*). Um exemplo do primeiro será, como é o caso deste estudo, a escolha de um modo de transporte enquanto um exemplo do segundo seria o estudo da quantidade óptima de produção com vista a maximização de lucro. No primeiro caso a hipótese assenta numa escolha única do agente entre vários modos de transporte, ou seja, o agente escolhe apenas uma hipótese de um conjunto finito. Assim, a diferença fundamental é que num modelo de escolha discreta procuramos qual a melhor das alternativas enquanto num modelo contínuo queremos determinar quanto é o valor de uma variável.

Estes modelos começaram a ser desenvolvidos nos anos 60 por Marschak na área de economia, com um modelo de maximização de utilidade estocástica. McFadden introduziu em 1968 o Logit Multinomial, continuando o estudo neste campo ao longo da sua carreira, seguido depois por outros autores, valhendo-lhe o prémio nobel da economia em 2000. Vários tipos de modelos para além do Logit foram desenvolvidos e aplicados à área de sistemas de

transportes, notavelmente por autores como Moshe Ben-Akiva e Steven Lerman ou Kenneth Train, que escreveram os dois manuais mais usados no estudo de modelos de escolha discreta

Um modelo de escolha discreta é então um modelo matemático que tenta simular as condições em que o agente toma a decisão face a um conjunto finito de escolhas, sendo possível escolher apenas uma delas. Este modelo baseia-se na Teoria de Utilidade Estocástica, tendo cada alternativa uma utilidade (probabilística) para o decisor, a qual ele procura maximizar. Há ainda uma variedade de preferências dentro do universo dos decisores, escolhendo cada um a que lhe apresentar uma maior utilidade. Nos modelos de escolha discreta a gama de alternativas deve ser tão extensa quanto possível, isto é, devem estar contempladas no modelo todas as alternativas existentes na realidade (casos em que se apresentam as alternativas mais comuns seguidas de uma opção geral “outro” são muito menos conclusivos por exemplo), e elas devem ser mutuamente exclusivas, significando que ao escolher uma alternativa não há qualquer sobreposição como uma outra disponível.

A utilidade de cada alternativa j é descrita como uma função matemática geralmente linear que resulta numa valor escalar (Ben-Akiva e Lerman, 1985), constituída por:

- Um termo determinístico (V_j), função dos seus atributos conhecidos;
- Um termo aleatório (ε_j), cuja dimensão depende do rigor da informação utilizada para a calibração e da variedade de preferências na população. Ele representa o erro entre a utilidade real e a calculada deterministicamente para a alternativa j ;

$$U_j = V_j + \varepsilon_j = \alpha_j + \beta_{1j}X_{1j} + \beta_{2j}X_{2j} + (\dots) + \beta_{aj}X_{aj} + \varepsilon_j \quad (1)$$

em que:

- j - alternativa
- a - número de atributos observados das alternativas

Cada um dos atributos X_{aj} tem um parâmetro associado β_{aj} que corresponde à sua importância (peso) relativamente aos outros atributos na utilidade das alternativas. Os atributos mais comuns na modelação de escolha de transportes são tempo de viagem, preço, número de transbordos, conforto entre outros.

A formulação aditiva da função utilidade implica duas coisas:

- A utilidade é compensatória, isto é, os defeitos num dos atributos são compensáveis por virtudes noutros;
- Os contributos dos vários atributos são independentes, isto é, o peso relativo de cada um deles (dado pelo seu coeficiente) é independente do valor que tome qualquer dos outros atributos.

A partir da expressão descrita anteriormente e dos princípios definidos para a Teoria da Utilidade Estocástica, temos que um decisor escolherá uma alternativa i se for observada a seguinte condição:

$$U_i \geq U_j, \forall i \neq j \quad (2)$$

Daqui torna-se claro que a escala da utilidade não é importante: é possível somar uma constante de ambos os lados que o resultado permanece o mesmo. Note-se ainda que a utilidade não tem unidades. Desenvolvendo esta relação a partir do que vimos anteriormente temos que:

$$V_i + \varepsilon_i \geq V_j + \varepsilon_j, i \neq j$$

$$\varepsilon_j - \varepsilon_i \leq V_i - V_j, i \neq j$$

Assim a probabilidade de o agente escolher a alternativa i é:

$$P_i = P(\varepsilon_j - \varepsilon_i \leq V_i - V_j), i \neq j \quad (3)$$

Podem ser assumidas várias distribuições estatísticas para o termo aleatório (ε), resultando em diferentes modelos de escolha discreta, que permitem um cálculo exacto da probabilidade de escolha de cada alternativa, como o Logit, Nested Logit, Probit, Mixed Logit, etc.

2.1.1 O modelo Matemático Logit

O modelo Logit é o mais comumente usado e de mais fácil utilização pois a fórmula para calcular as probabilidades é fechada (não é necessário integração) e é de fácil interpretação e computação. As hipóteses tomadas quanto aos termos aleatórios ε são as seguintes:

- Os termos de erro são independentes e com a mesma distribuição e parâmetros para todas as alternativas em presença;
- A distribuição dos termos de erro é a de Gumbel;
- O termo de erro toma valores pequenos em comparação com o valor da parte determinística da utilidade das alternativas.

Destas considerações temos a implicação de que a diferença entre os termos de erro, $\varepsilon = \varepsilon_j - \varepsilon_i$, segue uma distribuição logística (Ben-Akiva e Lerman, 1985). Assim, temos que a função densidade ($f(\varepsilon)$) e a função de distribuição cumulativa ($F(\varepsilon)$) são dadas por:

$$f(\mathcal{E}) = \frac{1}{1 + e^{-\mu\mathcal{E}}} \quad (4)$$

$$F(\mathcal{E}) = \frac{\mu e^{-\mu\mathcal{E}}}{(1 + e^{-\mu\mathcal{E}})^2} \quad (5)$$

Foi determinado a partir destas funções que a probabilidade da escolha de uma alternativa i contra uma outra j (escolha binomial) se reduzia à seguinte expressão:

$$\begin{aligned} P(i) &= P(U_i \geq U_j) \\ &= P(V_i + \mathcal{E}_i \geq V_j + \mathcal{E}_j) = P(\mathcal{E} \leq V_i - V_j) \\ &\Rightarrow P(i) = \frac{e^{V_i}}{e^{V_j}} \end{aligned}$$

Constituindo esta última a fórmula essencial do modelo Logit Binomial, sendo que para um modelo Logit Multinomial, com mais do que duas alternativas de escolha, ela vem

$$P(i) = \frac{e^{V_i}}{\sum_j e^{V_j}} \quad (6)$$

pois a fórmula para calcular as probabilidades é fechada (não é necessário integração) e é de fácil interpretação e computação.

A principal desvantagem do modelo Logit é ele implicar o princípio da Independência de Alternativas Irrelevantes (Train, 2002), que se pode definir como: “O rácio das probabilidades de duas alternativas não é afectado pela presença ou ausência de outras no conjunto de escolha”.

Deste princípio resulta que, se A e B forem duas alternativas de probabilidades não nula numa escolha em que há várias alternativas disponíveis além destas duas temos que por aplicação do Logit:

$$\frac{P_A}{P_B} = \frac{\frac{e^{V_A}}{\sum_j e^{V_j}}}{\frac{e^{V_B}}{\sum_j e^{V_j}}} = \frac{e^{V_A}}{e^{V_B}} \quad (7)$$

Esta é uma consideração forte podendo ser em alguns casos demasiado restritiva quando as alternativas são muito parecidas. Nos casos em que há alternativas claramente relacionadas (isto é, que partilham parte da sua utilidade) o Logit não deve ser usado, optando-se por outros tipos de Logit ou outros modelos.

No entanto, é também este princípio que, ao simplificar a formulação do Logit, permite obter uma curva de probabilidades de escolha muito intuitiva:

$$\frac{P_A}{P_B} = \frac{e^{V_A}}{e^{V_B}} \Rightarrow \ln\left(\frac{P_A}{P_B}\right) = \ln\left(\frac{e^{V_A}}{e^{V_B}}\right) \Rightarrow \ln\left(\frac{P_A}{P_B}\right) = \ln(e^{V_A}) - \ln(e^{V_B}) \Rightarrow \ln\left(\frac{P_A}{P_B}\right) = V_A - V_B$$

Assim, a relação entre a probabilidade e a utilidade representável tem a forma de S como se ilustra na figura 2.1:

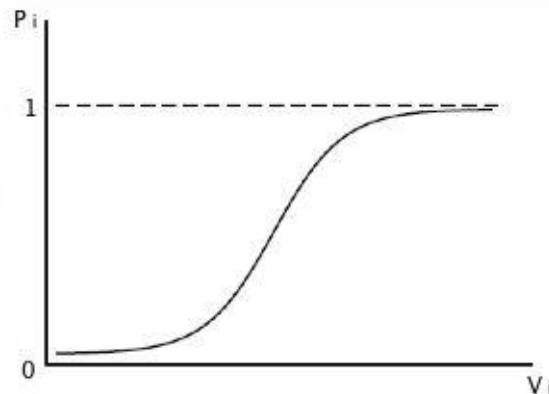


Figura 2.1 - Gráfico da curva Logit (Fonte: Train, 2002)

Isto implica que, para uma alternativa com uma utilidade muito baixa comparada com outras, um pequeno aumento na sua utilidade não terá muito efeito na sua probabilidade de escolha. Já para uma alternativa com uma utilidade perto de 0.5, logo uma probabilidade de escolha de 50%, o cenário é oposto pois é aí que uma alteração na utilidade da alternativa influencia mais a sua probabilidade de escolha em relação às outras (Ciarlini, 2008).

2.1.2 Estimação do Modelo Logit Multinomial

$$V_j = \alpha_j + \beta_{1j}X_{1j} + (\dots) + \beta_{aj}X_{aj}$$

Tão importante quanto a escolha do modelo mais adequado a cada estudo de caso é a correcta formulação do modelo em si, que consiste numa criteriosa definição das alternativas de escolha e as suas funções utilidade (V_j). Tome-se por exemplo os vários modos de transporte e todas as condições que cada um deles oferece, em que cada modo seria uma alternativa e as

condições de serviço seriam traduzidas através da função utilidade. Aqui importa, como já foi referido anteriormente, ter o máximo de alternativas existentes para se obter um resultado fiel à realidade. Na definição da função utilidade pretende-se simular tão bem quanto possível o comportamento dos decisores quando confrontados com as várias alternativas. Procura-se então ter as variáveis explicativas (X_{aj}) que apresentam significância estatística e determinar o seu peso (β_{aj}) na função utilidade, chamando-se a este processo matemático a calibração do modelo.

Para a calibração do modelo precisamos de dados a partir dos quais podemos inferir o comportamento das pessoas que utilizam o sistema. Estes dados surgem quase sempre na forma de inquéritos realizados aos utilizadores e elaborados pelos investigadores, dividindo-se em dois tipos:

- Preferências Declaradas
- Preferências Reveladas

No primeiro tipo de inquéritos, PD, o objectivo é obter uma declaração de comportamento em face de uma série de alternativas que o decisor pode não ter ainda experienciado, para se descobrir qual a sua reacção a uma mudança no sistema. Normalmente, estes inquéritos são realizados na fase de preparação de medidas de modificação da oferta de transportes (mudança de preços, introdução de novos modos ou serviços) e procuram saber a resposta dos utilizadores perante essas situações hipotéticas para estudar a adequação e aceitação das mudanças.

No segundo tipo, PR, o objectivo dos inquéritos é obter informação acerca do comportamento actual dos decisores assim como informação sobre as alternativas que estas têm à sua disposição. A operação de recolha mais usada para este efeito corresponde a inquéritos O/D em que se pretende saber, para cada par O/D, quantas pessoas viajam por cada modo e caminhos. Para cada um desses modos e caminhos são medidos os valores das variáveis explicativas da função utilidade, por exemplo tempo de viagem e de espera, preço do título de transporte, número de transbordos, etc.

A visão comum na comparação entre os dois modelos é que os baseados em PR se ajustam melhores aos dados, conseguindo maiores valores nos índices de ajuste, uma vez que são dados reais acerca de situações conhecidas e experienciadas e possuem tipicamente amostras de dimensão superior às de PD que permitem uma melhor representação de escala. Por seu lado, os modelos baseados em PD conseguem modelar atributos que não estão ainda em uso ou aplicação, permitindo a obtenção de importantes indicadores de utilização do sistema e de previsão de procura, tendo no entanto várias limitações. Assim, uma alternativa mais interessante e promissora é a junção de ambos os tipos de dados na formulação de modelos

mistos de PR/PD que juntam as mais valias das duas abordagens, através de um criterioso e rigoroso planeamento e implementação dos modelos (Brownstone et al, 2000).

Quanto às variáveis explicativas, refira-se que de maneira geral elas se enquadram num de dois tipos:

- Variáveis SDC (*Socio-demographic Characteristics*) – do indivíduo, por exemplo idade, rendimento, género, etc.
- Atributos – da alternativa, por exemplo custo do título de transporte, tempo de viagem, etc.

A sua principal diferença é que os atributos variam entre as várias alternativas para um mesmo indivíduo decisor, mas as variáveis SDC apresentam o mesmo valor em todas as alternativas para o dito indivíduo.

Apesar de a função utilidade ser linear nos seus parâmetros, as variáveis explicativas que a constituem podem ter um efeito linear na utilidade ou não. Apesar de usualmente a natureza dos atributos ser linear, eles podem ser alterados se o investigador assumir que a sua importância varia com o seu valor. É usual usar por exemplo o logaritmo do tempo ou custo como variáveis explicativas. Isto faz com que uma variação destes atributos tenha um maior impacto para valores baixos do que para valores altos, como se ilustra na figura 2.2:

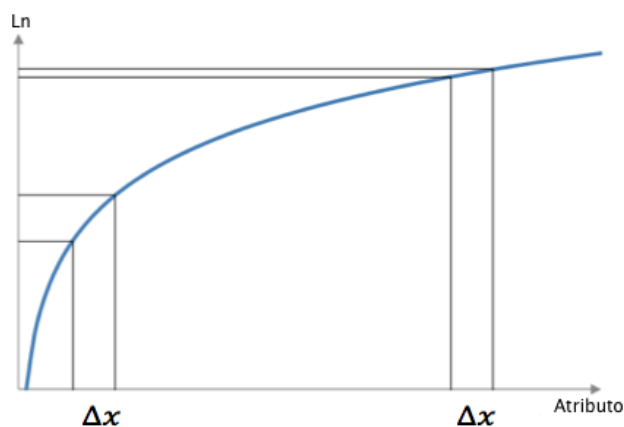


Figura 2.2 - Gráfico de uma função logarítmica

Para além das variáveis explicativas, a função utilidade apresenta ainda uma constante específica da alternativa (α_j). Esta constante é usada para medir a diferença de utilidade entre a alternativa em questão e a alternativa de referência que não é medida pelas variáveis explicativas consideradas.

Para o sistema de equações que representa o modelo ser resolúvel, duas condições têm que ser observadas:

- Apenas as variáveis dos atributos podem entrar em todas as alternativas, as variáveis SDC só podem entrar em $j - 1$ alternativas, sendo j igual ao número total de alternativas.
- Só podem haver $j - 1$ constantes específicas de alternativa nas funções de utilidade.

Assim o que se faz é considerar uma alternativa como referência e medir a utilidades das outras em relação a ela. Nesta alternativa referência não entram a constante específica da alternativa (α_j) nem as variáveis SDC. A escolha de qual a alternativa deve ser referência é uma decisão do analista e não tem qualquer efeito sobre o resultado, uma vez que os coeficientes serão diferentes mas as probabilidades serão as mesmas, obtendo-se no fim a mesma ordenação para a utilidade das alternativas.

Após a correcta formulação das funções utilidade e de termos os dados das variáveis explicativas podemos proceder ao cálculo do modelo.

Vejamos em primeiro lugar, como introdução, um modelo Logit Binomial com apenas uma variável explicativa:

$$\begin{aligned}V_A &= \alpha + \beta \cdot X_A \\V_B &= \beta \cdot X_B\end{aligned}$$

Este é um caso especial pois a sua estimação consiste simplesmente num exercício de regressão pelo Método dos Mínimos Quadrados, resultando no valor de α e β . Através do valor do R^2 obtido inferimos acerca da qualidade do ajuste entre os resultados obtidos e os dados que temos, medindo-se assim imediatamente a validade dos resultados.

Para o caso de um modelo Logit Multinomial assim como muitos outros modelos estatísticos, com várias alternativas e variáveis explicativas, a estimação é mais complexa fazendo-se por máxima verosimilhança, que consiste em encontrar os parâmetros da função utilidade que maximizam a probabilidade de se observar uma determinada amostra que foi obtida na realidade. Aplica-se então a função de verosimilhança:

$$Max(L^*) = \prod_{n=1}^N \prod_{j \in C_n} P_n(j)^{y_{jn}} \quad (8)$$

onde:

- N é o tamanho da amostra, tipicamente o universo de entrevistados;

- C_n é o conjunto de alternativas;
- $P_n(j)$ é a probabilidade do entrevistado n escolher a alternativa j ;
- y_{jn} é uma variável binária que vale 1 quando o entrevistado escolhe a alternativa j e 0 caso contrário.

Usando o logaritmo da verosimilhança podemos simplificar a função anterior sem alterar a solução:

$$\text{Max}(L) = \sum_{n=1}^N \sum_{j \in C_n} y_{jn} \times \ln(P_n(j)) \quad (9)$$

Num cenário em que temos várias opções para um modelo e queremos estudar mais do que uma formulação, podemos considerar que ao maior valor da função verosimilhança corresponde o modelo mais adequado. No entanto, esse valor não nos permite medir o ajuste do modelo aos dados, sendo necessário para esse efeito recorrer a testes estatísticos para quantificar o grau de confiança nos resultados retirados da análise do modelo. Estes testes devem ser feitos em dois níveis: o geral do modelo na sua globalidade e ajuste aos dados, e o pontual de cada variável explicativa e o seu nível de significância para o modelo.

Para o modelo geral é usual comparar os valores do índice de verosimilhança:

$$\rho^2 = 1 - \frac{L(*)}{L(0)} \quad (10)$$

em que:

- $L(0)$ - logaritmo da verosimilhança de um modelo com todos os coeficientes igual a zero;
- $L(*)$ – logaritmo da verosimilhança de um modelo com todos os coeficientes estimados.

Este índice é uma medida informal do ajuste do modelo através do cálculo de uma fracção do logaritmo da verosimilhança inicial do modelo. Esta medida é análoga ao R^2 usado em regressões lineares, por isso é chamado usualmente de pseudo- R^2 . No entanto os valores de ρ^2 não seguem uma relação linear com os valores de R^2 de uma regressão linear, mas foi estabelecida uma relação empírica entre os dois indicadores por Domencich e McFadden que se encontra mapeada na figura 2.3:

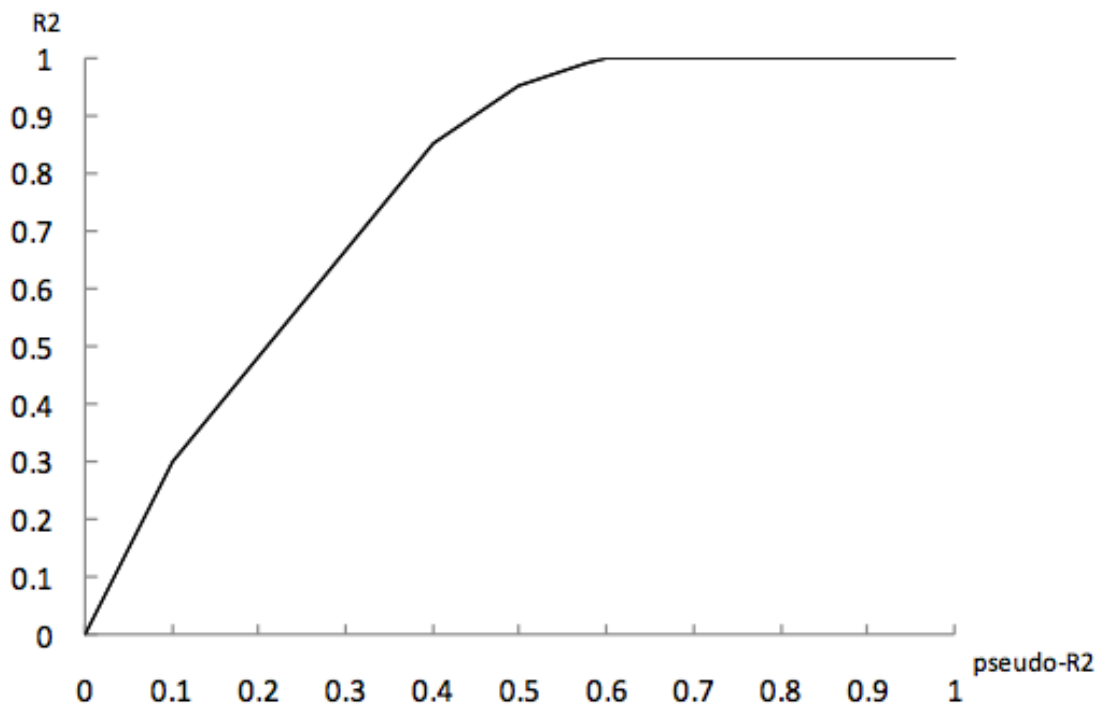


Figura 2.3 - Mapeamento da relação entre o pseudo-R² e o R² (Fonte: Domencich e McFadden, 1975)

Desta relação podemos ver que um valor de pseudo-R² de 0,2 já corresponde a um bom valor de R² para um modelo real, sendo que um valor de 0,4 é um resultado excelente.

Uma comparação mais interessante para medir o ajuste do modelo é o cálculo do pseudo-R² com $L(c)$ em vez de $L(0)$, sendo $L(c)$ o logaritmo da verosimilhança de um modelo apenas com constantes específicas das alternativas, que é o melhor modelo que podemos ajustar sem usar variáveis explicativas.

Para estudar o nível de significância das variáveis explicativas podemos usar o teste t de Student. Este teste é usado para testar a hipótese de que um parâmetro seja igual a um determinado valor. Esse valor é geralmente zero uma vez que assim o teste consiste em verificar a hipótese de que os pesos da função utilidade são nulos, ou seja, se a variável explicativa correspondente a cada peso é relevante ou não para o modelo. O teste é válido assintoticamente, i.e., para grandes amostras. A sua formulação é a seguinte:

$$\begin{aligned} H_0: \beta_i &= 0 \\ H_1: \beta_i &\neq 0 \\ Z &= \frac{\beta_i - 0}{\sqrt{\text{var}(\beta_i)}} \end{aligned}$$

Para determinar se rejeitamos ou não a hipótese do coeficiente ser nulo temos de comparar a estatística do teste (Z) com um nível de confiança. O nível de confiança escolhido indica-nos o valor crítico mínimo para que a hipótese seja rejeitada. Estes valores críticos são percentis de uma distribuição normal padrão, que para testes de “duas caudas”, com nível de significância de 20%, 10% e 5%, resultam nos valores de $\pm 1,282$, $\pm 1,645$ e $\pm 1,96$ respectivamente.

Os resultados obtidos nos testes estatísticos são importantes para a validação do trabalho realizado pelo investigador e para medir a qualidade do modelo e o nível de confiança na análise dos resultados e conclusões. Eles são também importantes para a calibração do trabalho, possibilitando uma reflexão e análise das variáveis explicativas escolhidas, indicando quais se adequam melhor e as que não acrescentam nada ao modelo.

2.2 Modelos de Escolha de caminhos

O problema da escolha de caminhos é basilar na engenharia e planeamento de transportes, constando o quarto e último passo do Modelo Clássico de Transportes, o passo de atribuição/afecção de tráfego, da sua resolução. Nesse passo estuda-se de que forma as viagens entre pares origem-destino (O/D), que foram determinadas no 2º passo e desagregadas por modo de transporte no 3º passo, se distribuem pelos vários arcos da rede. Este problema é de maior complexidade em TC pois existem várias redes a ter em conta, uma vez que a rede do serviço de metro por exemplo é distinta da rede dos vários serviços de autocarro, que por sua vez, apesar de partilhar a infraestrutura viária com o TI, apresenta uma rede restringida e mutável de acordo com o universo de carreiras oferecido.

O estudo da afecção de tráfego, ou por outras palavras da distribuição do tráfego por caminhos em TC, divide-se então em várias camadas, estando num primeiro nível directamente ligada à escolha do modo de transporte. Esta variedade de substratos implica também diferentes abordagens no estudo do processo de decisão dos utilizadores da rede para os caminhos de transporte, apresentando os TC de natureza intraurbana características especiais a que se deve atentar para uma solução eficaz do problema.

Os primeiros métodos aplicados no exercício da afecção de tráfego baseavam-se em dois princípios, o do “tudo-ou-nada”, em que o tráfego entre um par O/D se dava sempre pelo caminho mais curto ou com menor custo (minimização da função de custo) sem considerações do nível de fluxo e congestionamento, e o princípio de Wardrop ou do equilíbrio, em que a distribuição de tráfego entre o par O/D se dá para que o tempo (ou custo) de viagem seja o mínimo possível, tendo em conta as condições de circulação na rede, i.e., considera o efeito do tráfego.

O primeiro princípio aplica-se sobretudo ao tráfego interurbano enquanto o segundo é mais indicado para tráfego urbano, devido às diferentes características das vias, rede, tipo de condução e procura. No entanto ambos os princípios se dirigem maioritariamente à distribuição do tráfego por TI, que funciona numa óptica de afectação de veículos e não de passageiros. Este foco é natural uma vez que o surgimento destes métodos e do próprio estudo da afectação de tráfego se deu nos Estados Unidos da América com o aparecimento das auto-estradas e vias rápidas.

Inicialmente utilizaram-se modelos matemáticos lineares que como referido atrás baseavam-se num critério de minimização de custo ou tempo de viagem, ou seja, eram modelos básicos que tentavam emular as escolhas dos utilizadores através de um único critério. Por mais pertinente que este critério fosse, este facto é a maior deficiência deste tipo de modelos, que não oferecem poder explicativo. Por outro lado o seu uso era mais direccionado para questões operacionais e de planeamento de curto prazo para alterações à rede, pelo que o conhecimento real das motivações e preferências dos utilizadores não era tão importante, especialmente para o TI que é mais flexível. A utilização de um critério de custo generalizado, apesar de englobar sobre uma medida monetária critérios de tempo, custo e distância, não deixa de ser um critério singular no que diz respeito à formulação do modelo, e não se apresentando estas diferentes características de forma desagregada volta-se ao mesmo problema do critério único.

Jansson e Ridderstolpe desenvolveram um modelo na premissa da minimização do “tempo generalizado” composto de tempo de viagem pesado nas suas várias componentes e tarifa, convertida para tempo (Jansson, 1992). O modelo é baseado apenas nos horários estabelecidos pelo operador, nas estatísticas de médias de utilização e tempos de viagem e nas tarifas cobradas. Os resultados obtidos pelos autores mostram que o modelo desenvolvido não acrescenta nada aos modelos de previsão desenvolvidos anteriormente baseados em apenas um critério.

Há muitos estudos que apontam para o facto que a escolha entre vários caminhos paralelos depende de muitas variáveis como tempo de viagem dentro de veículo, tempo de viagem a pé, tempo de transbordo, número de transbordos, tarifas, frequência de serviço e a irregularidade do percurso (Jansson, 1992). Ao mesmo tempo indicam também que os métodos tradicionais usados em planeamento de transportes urbanos não resolviam o problema de escolha de caminhos em sistemas intermodais.

Ainda outra limitação dos modelos iniciais era o seu alcance no que diz respeito à complexidade e dimensão da rede e da amostra a estudar. Uma rede real urbana tem demasiados arcos e curvas de fluxo-tempo para ser analisado matematicamente com rigor com o pequeno poder de processamento da altura, e a própria conversão da rede para a simplificação em arcos e nós é muito extensa tornando difícil a aplicação de princípios de equilíbrio.

Para resolver esse problema começaram a aparecer métodos heurísticos para a resolução de problemas de equilíbrio em sistemas complexos que facilitavam o cálculo, como o método incremental. Estes métodos eram mais rápidos, tinham uma aplicação e programação fácil mas apresentavam o defeito de resultarem em soluções aproximadas e não exactas. No entanto esta evolução não resolveu a falha dos modelos lineares, a falta de poder explicativo que permitisse uma análise de comportamento dos utilizadores.

Chega-se então aos modelos de escolha discreta aplicados à escolha de caminhos, permitindo a utilização de inúmeras variáveis e resultando em diferentes pesos e significâncias destas, que permitem uma verdadeira análise das preferências dos utilizadores e uma refinação do modelo e dos critérios utilizados em busca do melhor ajuste. Seja baseado em dados de PR ou PD, descritos no subcapítulo anterior, a utilização destes modelos é uma alteração de paradigma e um grande avanço em relação às origens do estudo de afectação de tráfego, principalmente para o sector dos TC.

Num sistema intermodal a utilização de um modelo de escolha discreta é muito vantajosa pois permite personalizar a modelação para cada um dos modos de transporte ou combinação deles através de diferentes funções utilidade e variáveis próprias, e o seu processamento é muito rápido mesmo para grandes quantidades de dados. Assim, o desafio neste tipo de modelos é, em primeiro lugar, a recolha de dados que lhe servem de base e em segundo lugar a escolha das variáveis, i.e., a maneira como se incorporam no modelo os ditos dados.

No que respeita à recolha de dados, importa que esta seja cuidadosamente planeada tendo em conta os objectivos do estudo. Actualmente a informação necessária não se esgota na quantificação do tráfego entre as várias zonas de uma cidade e a respectiva distribuição modal. Os mais recentes estudos estão a focar-se também nas condições das infraestruturas de transporte, nas características dos veículos, nos mapas e diagramas da rede de transportes, para além das clássicas informações acerca do nível de serviço e características sociodemográficas dos utilizadores dos TC e da população em geral. Idealmente, estes dados seriam obtidos numa junção de PD e PR com a informação da rede e do serviço prestado por cada operador.

Quanto à escolha das variáveis a integrar nas funções utilidade, ela depende muito da recolha de dados que foi feita. A visão corrente é que o processo de escolha é gerido por vários factores, com diferentes pesos para cada utilizador mas com um impacto mais ou menos constante. O critério de menor tempo de viagem ou menor custo continua a ser o mais importante, no entanto ele não é sempre determinante. Um utilizador pode optar por uma solução mais lenta se esta apresentar vantagens como maior conforto, menor tempo de espera ou de viagem a pé e a não necessidade de efectuar transbordo. Aqui revela-se a importância de uma base de dados rica e do uso de vários critérios, que para além de permitir o estudo

destes factores que são por vezes negligenciados, torna possível um melhor ajuste do modelo que o torna menos tendencioso uma vez que o efeito de absorção das variáveis dominantes é diminuído.

O âmbito desta dissertação é unilateralmente o estudo do processo de escolha de caminhos, apesar de a abordagem tomada se orientar a partir de uma escolha de modos, que na verdade são processos intrinsecamente ligados como sugere aliás o funcionamento orgânico do modelo tradicional de transportes. Podemos então encontrar alguns pontos comuns entre a modelação de escolha de caminhos e a modelação de escolha modal, e estabelecer paralelismos (limitados) entre resultados.

A respeito da construção de modelos de escolha modal, Jorge Gonçalves realizou um trabalho de larga extensão e elevado detalhe na sua tese de doutoramento em que, a partir de dados recolhidos pelo Instituto Nacional de Estatística (INE) em 2000 num inquérito à mobilidade na Área Metropolitana do Porto juntos com dados socioeconómicos da população e dados da estrutura urbana, desenvolveu vários modelos de escolha discreta, mais precisamente Logit Multinomiais, com o objectivo de realizar análises exploratórias para identificação dos atributos mais relevantes para a escolha de modos de transporte mais sustentáveis (Gonçalves, 2012).

O estudo envolveu um tratamento de dados considerável, com manipulação em SIG de informação relativamente à oferta de TC e da oferta de estacionamento existente na área urbana do Porto, para além de uma refinação dos dados do estudo de mobilidade, que foi feito por entrevista directa e que originalmente apresentava 213,727 inquéritos que correspondiam a 506,715 viagens, num período entre Abril e Junho de 2000, sendo que a amostra final ficou reduzida a 95,426 viagens, entre 694 pares O/D. A rede de TC em 2000 na AMP era composta por operadores de autocarro privados e públicos e transporte ferroviário.

Nesse estudo, o principal foco eram as variações de atractividade que várias variáveis causavam entre os TC e o TI, nomeadamente o motociclo e o automóvel e ainda a alternativa de deslocação a pé. Esse objectivo levou à formulação de um modelo base composto por quatro variáveis: Variável binária de licença de condução; Variável binária sobre o número de automóveis disponíveis diariamente no agregado familiar per capita; Variável contínua de distância mais curta entre os centróides de Geração-Atração da viagem; Variável binária que tomava o valor 1 para distâncias mais entre os centróides de Geração-Atração até 1,0 km.

Esse modelo de base obteve um ajuste positivo, mas as variáveis de base consideradas não servem o propósito da análise da escolha de caminhos, e a própria abordagem de comparação entre o TI e colectivo, para determinar os factores que tornavam o TC mais atractivo e as políticas que poderiam limitar o automóvel, afastam-se bastante no seu princípio das orientações tomadas nesta dissertação em que se analisam apenas os TC e as escolhas dentro

do uso desses modos de Lisboa, ou seja, não há a consideração do TI nem se coloca a problemática da escolha Individual Versus Colectivo, estando o nosso foco a jusante disso.

Apesar disto, o trabalho de Gonçalves (2012) apresenta ainda assim orientações muito interessantes no que respeita à definição de variáveis que adicionou posteriormente ao modelo base. Elas são separadas por categorias, sendo que muitas delas têm interesse para a modelação de escolha de caminhos, no caso de existirem dados para as construir. No quadro 2.1 estão algumas das variáveis que Gonçalves utilizou nas várias formulações de Logit Multinomial, separadas em variáveis socioeconómicas, variáveis caracterizadoras da viagem e variáveis caracterizadoras das políticas de transporte colectivo.

Quadro 2.1 - Algumas das variáveis consideradas por Gonçalves (2012)

Socioeconómicas	Caracterizadoras da viagem	Políticas de transporte colectivo
Género	Duração total da viagem percebida	Razão de tempo de viagem por autocarro pelo tempo de viagem por automóvel
Idade	Distância entre as zonas O/D	Frequência média horária de autocarro
Nível de instrução	Motivo da viagem	Velocidade comercial equivalente dos autocarros
Rendimento líquido mensal do agregado	Número total de viagens diárias	

Inúmeros resultados são apresentados com a formulação de vários modelos para várias combinações de modos, conseguindo o autor excelentes resultados que vão de acordo com os resultados obtidos comumente no que respeita aos critérios mais importantes para a escolha modal, mas a conclusão mais imediata a tirar e também mais surpreendente é a de que a frequência média horária do autocarro tem nesse estudo pouca influência para a utilidade das alternativas (Gonçalves, 2012), contrariando a ideia comum a respeito da influência das variáveis de nível de serviço.

Para analisar a importância dos diferentes factores de nível de serviço na escolha de caminhos em transporte público, Pursula e Weurlander realizaram um estudo na cidade de Helsínquia com a realização de uma pesquisa da escolha de caminhos para pares de zonas O/D com duas alternativas de viagem que apresentavam diferenças no tempo total de viagem, número de transbordos, possibilidade de viajar sentado, tempo de deslocação a pé, tempo de espera e tarifa (Pursula e Weurlander, 1999).

A pesquisa era composta por 2 partes. A primeira era uma pesquisa de PR, na forma de um inquérito realizado a bordo, e a segunda era uma pesquisa de PD feita entre as mesmas pessoas através de correspondência. O sistema de Helsínquia é composto principalmente por

autocarros mas incluí também alguns comboios. A combinação dos dois tipos de pesquisa foi útil pois flexibilizou a análise dos critérios possíveis e no seu alcance, sendo possível por exemplo considerar a tarifa que não era discriminada na pesquisa de PR pois ela era igual em todas as alternativas de viagem no sistema de transporte público de Helsínquia.

Os investigadores consideraram apenas 8 zonas para pares O/D e a maior parte dos questionários foram feitos na hora de ponta da manhã. Na pesquisa de PR foram obtidas 562 participações e, dessas pessoas, 294 responderam à pesquisa de PD. Modelos Logit foram calculados a partir dos dados de PR e de PD e um Nested Logit foi calculado a partir da combinação dos dados de PR e PD. Os modelos estimados indicam claramente que os critérios de nível de serviço mais importantes são transbordos, tempo de deslocação a pé, tempo de espera e disponibilidade de assento. O estudo faz um contributo interessante na importância dos transbordos em transporte público.

Para além desse estudo, uma abordagem muito interessante de um modelo de escolha discreta para escolha de caminhos com uma base de dados mista foi feito para a cidade de Singapura e o seu complexo sistema de transporte, que inclui oferta de autocarros, metro e tram (Lam e Xie, 2002). Neste estudo foi criado um modelo a partir de dados de PR e PD, em que se analisou os resultados de uma formulação de PR puro, PD puro, e uma última de mistura dos dados. Os dados de PR foram obtidos através de cerca de 6000 entrevistas domiciliárias enquanto os dados de PD se conseguiram por pesquisa em estações contando com 307 respostas.

Na análise dos dados de PR das entrevistas Lam e Xie observaram vários factores que influenciam a escolha do modo de transporte:

- Características socioeconómicas: tipo de habitação, disponibilidade de veículo próprio, idade, género e emprego;
- Motivo da viagem;
- Características da localidade: localização e rendimento.

Os autores consideraram as variáveis habituais neste tipo de modelos como distância de viagem a pé, número de transbordos, tarifa e extensão de percursos. O tempo de viagem não foi incluído como variável, os investigadores deixaram que as constantes específicas das alternativas capturassem a utilidade relacionada com tempo ou rapidez da viagem. Duas variáveis inovadoras que foram incluídas no modelo foram o número total de estações/paragens do percurso e a proporção da viagem que se realiza em Metro.

Nos resultados do modelo observaram que o melhor ajuste se conseguiu com o modelo de PR, apesar de haverem claras vantagens a ter uma base de dados com origem em PR e PD. A respeito das variáveis, a mais significativa para a utilidade é o tempo de viagem total, seguida

da proporção de viagem realizada em Metro, enquanto os critérios mais significativos para a desutilidade são a distância percorrida a pé e o número de transbordos. O modelo indica assim que a escolha de caminhos para os utilizadores depende de um *trade-off* entre tempo de viagem e outros factores. Outros estudos já tinham apresentado esta mesma conclusão: “Ao avaliar alternativas disponíveis de caminhos e a planear para o caminho mais utilizado, o tempo de viagem é, no entanto, por vezes negociado entre outros critérios (...) (incluindo) distância percorrida a pé num transbordo, tipo de serviço de comboio, custo de viagem (Chiu et al., 2005), escadas (Daamen et al., 2005), paragens intermédias (Bovy e Hoogendoorn-Lanser, 2005), complexidade de percurso (Heye e Timpf, 2003), ou disponibilidade de assento (Pursula e Weurlander, 1999). A minimização de transbordos é outro critério proeminente na escolha de caminhos e pode geralmente ser preferido em relação ao critério do caminho mais rápido” (traduzido de Hochmair, 2009).

Outra corrente moderna foca-se na influência da topologia da rede e no desenho de mapas na escolha de caminhos. Hartwig Hochmair realizou um estudo baseado num inquérito online, usando um modelo de escolha discreta para a análise de como o design de mapas e informação funcional da rede na cidade de Viena afecta as variáveis *proxy* consideradas, usando um mapa esquemático, um mapa topológico real, um mapa com *headways* e um mapa com horários de partida (Hochmair, 2009). Os critérios *proxy* mais significativos na escolha de caminhos nesse modelo são a distância do percurso, número de transbordos e o número de paragens em alguns casos. Um critério interessante que é usado para estudar a influência da topologia da rede é o ângulo de desvio entre a direcção da estação de destino e a direcção do ponto a um terço do percurso.

Nesse estudo uma organização interessante dos resultados foi feita separando as alternativas de caminhos entre par O/D em grupos de caminhos mais curtos, caminhos com o mínimo de transbordos e caminhos com o mínimo de paragens. No entanto o objectivo deste trabalho é a análise dos vários tipos de mapas e a sua influência na escolha dos utilizadores e não a formulação de um rigoroso modelo de escolha de caminhos, utilizando uma amostra reduzida, pelo que a sua metodologia não apresenta muita relevância no âmbito desta dissertação.

Ainda acerca da influência dos mapas e topologia da rede, um interessante estudo foi feito por Sebastián Raveau com o objectivo de formular um modelo de escolha de caminhos topológico para o metro da cidade de Santiago do Chile, incorporando variáveis relacionadas com a topologia da rede a complementar as tradicionais variáveis derivadas de nível de serviço e características socioeconómicas e demográficas dos utilizadores (Raveau, 2010). O modelo foi construído com base num inquérito O/D para horários de ponta da manhã e tarde, com uma amostra muito extensa, no entanto limitada a pares O/D chave pré-definidos em vez da totalidade da rede. Quanto aos mapas, os investigadores usaram duas versões, uma georreferenciada com distâncias reais e outra, disponível nas estações, esquemática e distorcida, uma aproximação para leitura fácil da rede.

O modelo é um Logit Multinomial e conta com as tradicionais variáveis de tempo de viagem em veículo, tempo de espera, tempo de viagem a pé e número de transbordos. Ele tem uma abordagem inovadora ao usar variáveis em relação às características das infraestruturas e veículos como a não existência de elevadores, necessidade de subir para aceder ou sair ao cais, a taxa de ocupação dos veículos, a impossibilidade de embarcar no primeiro veículo e viajar sentado. Quanto às características topológicas, são empregadas as variáveis de custo angular, percurso regride para a origem e percurso afasta-se do destino.

Os autores conseguiram bons resultados, tendo criado dois modelos, um para os dados conseguidos com o mapa georreferenciado e outro para o mapa real. Em ambos a maior significância nas variáveis tradicionais foi para o tempo de viagem em veículo (variável mais significativa dos modelos), seguida pelo tempo de viagem a pé e número de transbordos. Estes resultados são transversais a toda a bibliografia, até no que diz respeito aos valores da estatística de teste, mas o que destaca este estudo são os resultados obtidos para o resto das variáveis, que para além de terem todas elas significância estatística com um intervalo de confiança de 95%, apresentam o sinal esperado e um nível de significância muito alto, sendo que a variável de não existência de elevadores é a 2ª mais significativa de ambos os modelos (Raveau, 2010).

Um desenvolvimento deste trabalho foi efectuado em parceria com Zhan Guo para estabelecer uma comparação entre Santiago e Londres usando o mesmo modelo e metodologia de trabalho (Raveau e Guo, 2012). Esta cooperação é relevante pois na literatura é corrente fazerem-se comparações entre algumas variáveis como o tempo de viagem, mas estas baseiam-se invariavelmente em diferentes modelos e abordagens. Resultados comparativos interessantes foram obtidos como por exemplo o facto dos utilizadores de Londres preferirem passar mais tempo a andar, enquanto em Santiago os utilizadores preferirem estar mais tempo à espera, e apesar disso, ambos manifestam a mesma aversão ao tempo perdido em transbordos. Já em Santiago os utilizadores estão mais dispostos a viajar em carruagens lotadas do que em Londres (Raveau e Guo, 2012).

Estes resultados são válidos no seio dos sistemas de metro das cidades de Santiago e Londres, e mostram que não deve ser assumida sem a devida investigação a sua aplicabilidade a qualquer outro sistema. De facto, a revisão bibliográfica ao desenvolvimento de modelos de escolha de caminhos sugere que este é um processo multicritério, dependente de muitos factores como infraestruturas, qualidade dos veículos, utilização, topologia e complexidade da rede, informação fornecida, características socioeconómicas e demográficas da população aderente e a própria cultura local.

A principal conclusão a retirar da pesquisa bibliográfica é que, apesar de existirem vários estudos na área da escolha de caminhos, com uma grande variedade de contextos e

metodologias, entre vários tipos de modelo quase todos de escolha discreta, e dados oriundos de pesquisas de PD e PR, não existem ainda estudos de escolha de caminhos em TC urbanos usando dados de PR com origem em sistemas de bilhética sem contacto, ou seja, a potencialidade de aplicações dos *smart cards* está ainda por ser estudada. Até agora a maior parte dos estudos feitos a partir destas bases de dados concentra-se na determinação de paragem de origem (Ma, 2012), estabelecer padrões de procura (Bouman, 2012) e distribuição de fluxo de passageiros (Li, 2012). Todos estes estudos são muito recentes e concentram-se no tratamento ou complementação da informação constantes das bases de dados dos sistemas de bilhética, uma vez que muitos destes não foram pensados e desenhados para a compilação de dados (Ma, 2012).

2.3 Sistemas de Bilhética

Os modernos sistemas de transporte apresentam um modelo de bilhética electrónico que se começa a tornar universal devido à sua flexibilidade, conforto e acrescidas funcionalidades. Estes sistemas são materializados em dois elementos principais: os cartões inteligentes (*smart card*) e uma central de informação, podendo a comunicação entre os dois ser feita de várias formas e em inúmeros pontos.

2.3.1 Smart Card

São cartões que se distinguem pela sua capacidade de processamento e armazenamento de dados e interfaces de comunicação com um sistema central, através de circuitos e, em alguns casos, microprocessadores integrados. Estes cartões são tipicamente no tamanho padronizado comum de qualquer cartão de crédito. São feitos de plástico ou papel e são usados para identificação, autenticação, armazenamento de dados e processamento de aplicações. Têm inúmeras aplicações: Finanças, identificação, transporte público, segurança informática, escolar, sistema de saúde, etc. Existem dois tipos principais de *smart cards* no que respeita à sua interface de comunicação: com contacto e sem contacto (*contactless*).

Os primeiros a surgir foram os cartões de contacto, com um chip dourado, tendo aparecido nos anos 70. O primeiro uso em massa foi em cartões telefónicos para pagamento em cabines telefónicas Francesas, sendo actualmente o seu uso mais ubíquo nos cartões de débito e crédito e nos cartões *SIM*.

Os cartões *contactless* encontram-se em plena expansão, tendo sido introduzidos em 1996. Estes não precisam de contacto físico com um terminal para operarem, estando equipados com uma antena que capacita a comunicação sem toque a uma distância máxima de 10 cm. São usados preferencialmente onde as transacções têm que ser feitas rapidamente, como em

validações de sistemas de transporte ou identificação em grandes organizações e empresas (Wikipedia (A), 2013):

2.3.2 Sistema de Bilhética Sem Contacto

No ano de 1996 iniciou-se a exploração do primeiro sistema de bilhética sem contacto (SBSC), através do *Seoul Transportation Card*, na Coreia do Sul (Wikipedia (G), 2013). Este foi o primeiro sistema a usar *smart cards* sem contacto, impulsionando a tecnologia que está cada vez mais presente nos sistemas de transporte colectivo.

Antes desta experiência em Seul, os sistemas de transporte funcionavam com uma cobrança manual de tarifas (Wikipedia (C), 2013), fosse com a compra de títulos em balcões operados por funcionários ou com o pagamento a ser feito ao condutor no início da viagem. Estes sistemas eram naturalmente pouco eficazes e flexíveis, sendo ainda inferiores ao nível da fluidez do trânsito, tempo de viagem e segurança. Um avanço neste sistema foi a utilização de cartões com banda magnética com viagens pré-pagas (Smart Card Alliance, 2011), cuja validação é feita em leitores electrónicos, agilizando assim o processo. No entanto este desenvolvimento não é suficiente para caracterizar o sistema como de cobrança automática, pois a venda de cartões continuava em muitos casos a ser feita manualmente e não por máquinas automáticas, e estes cartões não são recarregáveis nem apresentam as possibilidades de gestão de informação de um sistema automático com *smart card*.

A mudança para estes novos sistemas, mais do que por necessidade ou inadequação do sistema manual, é devida a quatro benefícios gerais que estes podem trazer: redução de custos, melhoria de nível de serviço, flexibilidade de política tarifária e aumento de receitas (McDonald, 2000). Estas no entanto não devem ser tomadas como garantidas, existindo vários exemplos de experiências em que os resultados obtidos ficaram aquém das projecções, exigindo então um estudo, planeamento e implementação criteriosa dos sistemas e tecnologias usadas, assim como uma correcta operação e gestão dos mesmos.

Os SBSC em aplicação hoje em dia são muito robustos podendo desempenhar funções de venda, validação e inspecção de títulos de transporte, cálculo e cobrança de tarifa, estatística, contabilidade e gestão de actividades. Estes sistemas são normalmente compostos pelos seguintes elementos (Wikipedia (B), 2013):

- Nível 0. Suporte de validação
- Nível 1. Terminais de leitura e habilitação de cartões
- Nível 2. Controlador de estação/paragem
- Nível 3. Servidor central
- Nível 4. Câmara de contas

Suporte de validação: Os mais comuns são os *smart cards* sem contacto, mas existem outros tipos e alguns sistemas suportam mais do que um género de título.

Terminais de leitura e habilitação de cartões: Computadores e máquinas automáticas usadas para compra de viagens e cartões e para a validação dos mesmos e entrada no cais. Podem aparecer em várias formas como:

- Balcões operados por funcionários;
- Terminal de venda de títulos;
- Portões de validação;
- Validadores simples;
- Validadores dentro de veículos;
- Validadores de inspectores e motoristas.

Controlador de estação: Computador responsável pela agregação de informação dos terminais de cada estação/paragem e a sua comunicação ao servidor central.

Servidor central: Servidor e *software* responsável pela gestão e supervisão do SBSC. Ele faz a gestão das tarifas e dos cartões em circulação e elabora relatórios de utilização, finanças e desempenho.

Câmara de contas: Em sistemas multimodais ou com vários operadores que partilham o mesmo cartão existe um último nível onde se faz a gestão financeira do sistema:

- Contabilidade e distribuição de fundos e receitas;
- Relatórios globais do sistema.

A aplicação destes sistemas de bilhética é normalmente da responsabilidade de grandes operadores públicos, representando grandes investimentos, mas é comum operadores privados locais seguirem os públicos e aderirem ao sistema, dadas as vantagens deste e a atractividade da interoperabilidade e intermodalidade para os utilizadores, que promove a fácil e comoda deslocação em TC. A utilidade do SBSC é mais notória em sistemas complexos e de grande dimensão, com vários operadores e modos de transporte, uma vez que promove a unificação do sistema e uma simplificação burocrática com a utilização de apenas um cartão para toda a rede, sendo especialmente vantajoso para os utilizadores. De facto, uma grande vantagem da utilização de *smart cards* num sistema SBSC é a chamada Bilhética Integrada

2.3.3 Bilhética Integrada

A bilhética integrada é a verdadeira realização da interoperabilidade e intermodalidade. O conceito é independente dos sistemas de bilhética sem contacto que usam *smart cards* (Wikipedia (D), 2013), mas estes proporcionam condições técnicas e institucionais que permitem uma fácil e eficaz implementação, tanto que só com o seu advento se tornou comum este paradigma de unificação de transportes no que diz respeito à bilhética. Ela consiste em definir um intervalo de tempo e/ou espaço para a validade de um título de viagem, ou seja, num esquema de bilhética integrada um usuário tem, por exemplo, meia hora a partir da primeira validação em que pode mudar de modo de transporte ou de carreira ou operador sem ter que usar outro título de viagem, podendo revalidar o título inicial quantas vezes for necessário nessa janela de tempo. O usuário está assim a pagar uma viagem quando utiliza um título, e não uma etapa numa carreira ou transporte singular como em sistemas de transporte antigos.

Esta modalidade não acrescenta muito para quem possui um passe mensal a não ser o facto de poder se mover por toda a rede utilizando apenas um cartão e tarifário, mas para clientes não habituais, que apenas compram títulos pontuais, é um avanço muito grande no acesso aos transportes e à rede urbana no seu todo. Os modelos em que a integração é permitida variam de acordo com as características do sistema e dependem dos acordos entre os vários operadores de transporte, se existirem vários. As cidades de Lisboa e Porto são exemplos de sistemas de transporte que funcionam com bilhética integrada.

As vantagens desta modalidade são claras, principalmente para os utilizadores, que para além de pouparem num cenário em que usam mais do que um transporte ou carreira, tem ainda a vantagem de precisar de apenas um cartão para usarem vários serviços, que por força do seu funcionamento integrado serão em principio articulados no que diz respeito a horários e plataformas de embarque, tornando todo o sistema de transporte colectivo mais atractivo, confortável e económico. Para os operadores as vantagens serão, graças ao aumento da atractividade do seu produto, um aumento do número de utilizadores dos transportes e da cota de detentores de *smart cards* e um maior nível de serviço (McDonald, 2000).

2.3.4 Experiência internacionais

Já foi referido o aparecimento dos sistemas de bilhética sem contacto e com eles os sistemas que usam *smart cards*, inicialmente em 1996 com o *Upass* na cidade de Seul, e que vão-se tornando gradualmente mais comuns em todo o mundo. Estes sistemas apresentam muita variedade entre si, não só tecnológica mas também administrativa e operacional, uma vez que os sistemas são desenhados em casa sítio para infraestruturas únicas e operados por diferentes órgãos e com diferentes objectivos no seu horizonte. Alguns casos são bem

conhecidos pela sua dimensão ou medidas inovadoras, entre eles podemos destacar os seguintes:

- *Ov-chipkaart*, o cartão válido para todos os transportes públicos da Holanda, lançado em 2005, é o suporte de validação único de todos os modos de transporte que abrange excepto os comboios onde ainda é possível comprar bilhetes de papel (Wikipedia (J), 2013; *Ov-chipkaart*, 2013). Com ele é possível viajar de autocarro intercidades e urbanos, comboios, tram e metro, incluindo todos os operadores públicos do país. O sistema de bilhética é gerido por uma iniciativa colectiva dos principais operadores de transportes urbanos e nacionais, denominada *Trans Link Systems* (TLS). Um estudo foi feito baseado nos dados de bilhética deste sistema para o reconhecimento de padrões de procura a partir de dados em massa (Bouman, 2012)
- *Upass*, na cidade de Seul, é a evolução do original e primeiro cartão sem contacto do mundo, o *Seoul Transportation Card* (Wikipedia (G), 2013). O seu uso é muito abrangente, sendo válido nos autocarros de Seul e de todas as províncias vizinhas, no metro de Seul, comboios de transporte para aeroportos vizinhos e alguns autocarros intercidades das províncias vizinhas. Além disso, grandes bancos emitem cartões *Upass* com valência de cartão de débito/crédito
- *Octopus Card*, um cartão sem contacto de pré-carregamento utilizado em Hong Kong que foi lançado em 1997 (Wikipedia (I), 2013; *Octopus Card*, 2013). É utilizado para realizar pagamentos electrónicos em todos os transportes públicos da cidade e também em lojas, supermercados, restaurantes, parquímetros e parques de estacionamento, entre outros. É um dos sistemas mais abrangentes e usados no mundo, existindo mais de 20 milhões de cartões em circulação, quase o triplo da população de Hong Kong.
- *Oyster card* utilizado na grande Londres, que é detalhado a seguir por ser talvez o caso mais interessante e onde mais investigação tem sido feita.

Oyster card

Londres dispõe de um sistema público de bilhética sem contacto desde Julho de 2003 (Wikipedia (H), 2013; *Oyster Card*, 2013) denominado *Oyster Card* que pode ser usado nos autocarros e *trams* urbanos, metro, metro ligeiro, comboios urbanos e nacionais na zona tarifária de Londres e em alguns transportes fluviais.

Em Junho de 2012 mais de 80% de todas as viagens na rede eram feitas com o cartão. Usa a tecnologia MIFARE, num corpo de plástico tanto para as títulos de passe como viagens individuais. Nas viagens individuais o *Oyster Card* funciona num sistema semelhante ao Zapping do Cartão Viva, em que o utilizador carrega dinheiro que lhe é debitado quando utiliza o cartão, mas apresenta mais funcionalidades pois pode ser carregado através da

internet por uma conta pessoal do *Oyster card*, que permite ainda aceder a um histórico de viagens do cartão e saldo.

O sistema tem bilhética integrada, sendo a validade mínima de uma viagem de 70 minutos, aumentando com o número de zonas viajadas. Mais uma vez em semelhança com o sistema de Lisboa, os utilizadores tem de passar o cartão à entrada e saída nos portões do metro, mas apenas tem de validar a entrada no *tram* e autocarro, dentro do veículo. Isto faz com que o conhecimento da paragem de saída nos autocarros e *trams* seja deficiente, como em maior parte dos sistemas de todo o mundo, sendo necessário um estudo para estimar onde cada viagem termina.

A entidade que gere o sistema, *Transport for London*, tem parcerias montadas com algumas instituições universitárias como o *University College London* (UCL, 2013) e *MIT*, e em conjunto tem usado a base de dados compilada para investigação estratégica, com o objectivo de obter um retrato fiel do comportamento e experiência dos passageiros sem o alto custo associado aos métodos tradicionais de colecta de dados de tráfego. Projectos mais específicos incluem estimação de matrizes O-D para o Metro de Londres (*London Underground*), análise de comportamento perante transbordo autocarro-autocarro e autocarro-metro, modelação e análise de mudanças às políticas tarifárias de toda a rede, e definição da qualidade do serviço prestado pelos Comboios Urbanos de Londres (*London Overground*).

2.3.5 Vantagens

A adopção dos SBSC com *smart cards* possibilita assim inúmeras vantagens aos utilizadores, operadores de transportes e instituição de governo local e regional, tais como (McDonald,2000; Blythe, 2004; Pelletier, 2009; Smart Card Alliance, 2011):

- Melhorias de desempenho, controlo e operação do sistema;
- Gestão mais imediata e flexível da área financeira;
- Armazenamento e organização de dados permite estudos de mercado e optimização de políticas, infraestrutura e tarifas;
- Pagamento simples, seguro e eficiente, sem o problema do troco de dinheiro;
- Possibilidade de pagamento avançado de variados títulos de transporte ou de carregamento de uma carteira virtual;
- Apenas um cartão para viajar num sistema de vários operadores e modos de transporte;
- Programas de lealdade e recompensa para utilizadores com atribuição de descontos, ofertas e promoções;
- Atendimento e serviço mais confiável e não dependente de factores humanos;
- Validação e embarque mais rápido e circulação mais segura;

- Integração com sistemas de Park & Ride e parques de estacionamento;
- Integração do cartão de viagem num cartão de crédito, tornando as transacções imediatas da conta bancária;
- Parcerias com outros serviços e estabelecimentos para atribuição de descontos e regalias.

2.3.6 Potencialidades

A função primária dos *smart cards* é, por herança dos seus antecessores e pela sua natureza, a cobrança de tarifas pelo uso de transportes. No entanto os sistemas de cobrança automática são uma grande evolução tecnológica que traz consigo várias potencialidades. Graças às características de comunicação e armazenamento digital de dados, e também de monitorização da rede, é possível uma intervenção cirúrgica na rede, tanto das infraestruturas, oferta de serviço e planeamento da rede que é baseada em tendências observadas e no comportamento dos utilizadores. Este conhecimento nunca será perfeito, mas é um avanço em relação aos métodos tradicionais (Pelletier, 2009) de estudos baseados em entrevistas de amostras, uma vez que se possuem dados do universo dos utilizadores.

Os dados guardados pelo sistema automático são separados por cartões e são de detalhe diferente em cada sistema. De acordo com a infraestrutura da rede e do seu funcionamento, e também da tecnologia do *smart card*, os dados disponíveis podem ser mais ou menos completos, tendo muitas vezes o planeador de fazer um tratamento da informação antes de a poder usar. Estes dados são muito úteis tanto para a operação diária do sistema de transportes como para o planeamento estratégico de longo prazo da rede. O estudo dos dados pode ser aplicado em três níveis de gestão (Pelletier, 2009):

- **Estratégico** – planeamento a longo prazo;
- **Táctico** – ajuste de oferta e desenvolvimento da rede;
- **Operacional** – estatísticas de utilização e indicadores de desempenho.

Um exemplo da aplicação destas ópticas de gestão, neste caso a nível táctico, é a implementação de políticas de tarifa flexível (McDonald, 2000), ao contrário do que a maioria dos operadores pratica actualmente com tarifas fixas ou baseadas em distâncias. Com estatísticas de utilização detalhada é possível diferenciar títulos de transporte para horas de ponta e normais, de forma a diminuir a lotação da hora de ponta e oferecer preços mais próximos do custo de operação.

Outras potencialidades dos *smart cards*, de relevância menor mas características dos mesmos, permitem tornar os cartões usados como títulos de transporte em cartões pessoais ricos em informação e aplicações. Existem de facto inúmeras possibilidades por explorar, sendo

notáveis as aplicações na área da saúde, escolar, identificação, portagens e estacionamento, comércio e financeira, sendo esta última bastante investigada.

2.3.7 Críticas

A introdução de sistemas de transporte automáticos usando *smart cards* apresenta inúmeras vantagens mas levanta também algumas críticas e preocupações, tanto do lado dos utilizadores como dos operadores.

Para os utilizadores, as maiores preocupações são a privacidade dos dados recolhidos e a segurança contra fraude. Estas preocupações são maiores em sistemas onde os cartões apresentam aplicações de identidade ou bancária, uma vez que os dados podem ser associados a pessoas. A troca de dados entre operadores e o seu uso para estudo levantam problemas de privacidade (Pelletier, 2009) e muita investigação já foi feita neste tema, concluindo-se que o seu uso e consulta deve ser limitado a planeadores e estes dados devem ser dissociados da identidade do detentor do cartão para garantir a privacidade e protecção de dados. Quanto ao risco de fraude, é uma preocupação maior quando o cartão se encontra associado a uma conta bancária (McDonald, 2000), mas considera-se que os *smart cards* apresentam boas funcionalidades de segurança e encriptação, especialmente os que funcionam com microprocessadores, garantindo bastante segurança no acto de pagamento e a uma eventual tentativa de acesso aos dados. Os operadores têm também incorporados sistemas de detecção de fraude e listas negras de cartões (Smart Card Alliance, 2011).

Do lado dos operadores, as preocupações são de natureza institucional e de organização. Num sistema composto por vários operadores, para se fazer uso das potencialidades dos *smart cards* e explorar os vários níveis de gestão, é necessário um conhecimento completo e correcto da rede, o que implica uma troca de dados completa entre os vários operadores e um compromisso de correcta gestão do sistema por cada operador. Estas relações exigem confiança e o cumprimento de regras comuns. Outra questão é a correcta contagem e distribuição de fundos e receitas pelos vários operadores que constituem o sistema central. A existência de uma organização superior e independente dos operadores deve ser assegurada para gerir a *câmara de contas* (McDonald, 2000) e importa mais uma vez aqui as parcerias de confiança.

3 SISTEMA DE BILHÉTICA DE LISBOA

3.1 Enquadramento

3.1.1 Mobilidade em Lisboa

Lisboa é a capital de Portugal, localiza-se junto à foz do rio Tejo e tem uma população de 547 631 habitantes segundo o censo de 2011, ocupando uma área de 83,84 km² (Wikipedia (E), 2013). É o centro da AML. Constituída por 18 municípios da Grande Lisboa e da Península de Setúbal e é o maior centro populacional de Portugal, com 2 819 433 habitantes, cerca de 25% da população do País. A região de Lisboa é a mais rica de Portugal mas a sua economia concentra-se sobretudo em serviços, sendo o principal centro financeiro de Portugal e o segundo da Península Ibérica. Lisboa é um grande Pólo turístico que continua em crescimento, atraindo cada vez mais turistas estrangeiros, devido sobretudo à vasta oferta cultural e as vistas cénicas. A cidade de Lisboa é caracterizada por um relevo acidentado, principalmente no seu centro histórico com as suas sete colinas e vales, sendo um importante factor condicionante da sua infraestruturas e sistema de transporte.

O sistema de transporte de Lisboa, no seu todo, tem como elementos principais as seguintes infraestruturas e modos de transporte:

- Pontes sobre o Tejo: ponte 25 de Abril e Ponte Vasco da Gama;
- Aeroporto da Portela;
- Porto de Lisboa e transportes fluviais entre as duas margens;
- Metropolitano (urbano) e comboio (suburbano e nacional);
- Eléctricos e elevadores, operados pela Carris no centro da cidade;
- Transportes rodoviários: autocarros, táxis e autoestradas;
- Percursos cicláveis.

No âmbito desta dissertação estudou-se o sistema de transportes colectivo de massa da cidade de Lisboa, ou seja, o serviço de metropolitano (Metropolitano de Lisboa), autocarros e eléctricos (Carris) e comboios (CP). Estes operadores estão ligados sobre um mesmo sistema de bilhética automático usando um *smart card* sem contacto, o cartão Lisboa Viva (títulos mensais) e os cartões 7 Colinas e Viva Viagem (títulos pontuais).

Sendo um sistema de transportes que contempla vários operadores, foi criada em 1996 uma entidade na forma de uma ACE (Agrupamento Complementar de Empresas), de seu nome OTLIS – Operadores de Transporte da Região de Lisboa (OTLIS, 2013) – com a missão de André Filipe Rosária Gomes

desenvolver e criar valor entre os operadores de transporte agrupados e aderentes com vista a uma melhoria da qualidade dos serviços oferecidos aos utilizadores e perseguindo uma eficiente e imparcial gestão dos sistemas centrais e recursos partilhados.

Uma grande aposta da OTLIS e dos operadores de transporte agrupados foi, desde o início, o desenvolvimento tecnológico dos serviços oferecidos, para a modernização do sistema de transporte e a implementação de um sistema de bilhética integrada sem contacto comum. A sua implementação começou em 2002 no Metropolitano de Lisboa, ao qual se seguiram a Carris e a Transtejo. Mais tarde aderiu também a CP e outros operadores menores, numa lógica de crescente agrupamento para atingir a implantação na totalidade do sistema de TC da AML. O principal objectivo do novo sistema era uma maior simplificação, eficiência e transparência do sistema de transportes, assim como uma redução de custos operacionais.

Este projecto foi concretizado usando a tecnologia calypso de *smart card* sem contacto, que usa microprocessadores para uma maior variedade de aplicações e segurança reforçada. Esta tecnologia foi materializada nos cartões Viva usados pela CP, Metropolitano de Lisboa, Carris, Fertagus, Transtejo, Soflusa e mais recentemente também a Scotturb.

O cartão Viva está disponível em dois formatos:

- **Lisboa Viva:** É um cartão híbrido, com chip e antena, com um corpo de plástico e pessoal e intransmissível. Destinado a utilizadores frequentes, permite o carregamento de títulos mensais de cada operador ou de combinações de vários (Navegante por exemplo), sendo também possível carregar outros títulos de viagem (até um máximo de 4). A validade do cartão varia entre 4 e 6 anos conforme o tipo de cliente e um prazo de garantia de 2 anos. O cartão pode ser carregado nos terminais automáticos nas estações de metro, nos balcões e também no multibanco. O cartão apresenta várias vantagens aos aderentes como descontos em museus de Lisboa, ginásios, zoológico, etc.
- **Viva Viagem/7 Colinas:** É um *smart card* sem contacto com microprocessadores e antena, feito de papel. Destina-se a utilizadores pouco frequentes e cujo uso consiste normalmente em apenas um modo de transporte. Nele podem ser carregados títulos de transporte do mesmo tipo sempre que se queira, mas o carregamento de um título diferente só é possível depois de gastos todos os títulos anteriores. Podem ser comprados títulos de viagem ou diários válidos na Carris e Metro ou então fazer um carregamento Zapping (o utilizador carrega o dinheiro que quiser no cartão) para usar em sistema de débito em qualquer dos operadores Carris, Metro, CP e Transtejo/Soflusa simultaneamente. O cartão custa 0,50€ e tem a validade de um ano.

3.1.2 Operadores

Metropolitano de Lisboa

O Metropolitano de Lisboa é uma empresa pública de transporte ferroviário, inaugurado em 1959, sendo o primeiro sistema de metropolitano de Portugal (MetroLisboa, 2013). A rede centra-se em Lisboa mas existem já duas estações em Odivelas e duas em Amadora, estando esta linha, a Azul, em expansão. A rede conta actualmente com 4 linhas e 55 estações, numa extensão de 43,2 km. O custo de uma viagem é de 1,40€ no tarifário de 2013 e é válido durante uma hora em toda a rede Metro e Carris podendo nesse espaço de tempo ser efectuado o transbordo gratuitamente. O serviço funciona das 06h30 às 01h00. Em 2011 (MetroLisboa, 2011) o Metro transportou 180,2 milhões de passageiros, com um percurso médio de 4,80 km e uma taxa de ocupação de 25,71%. A distribuição de passageiros por título de transporte está ilustrada na figura 3.1:

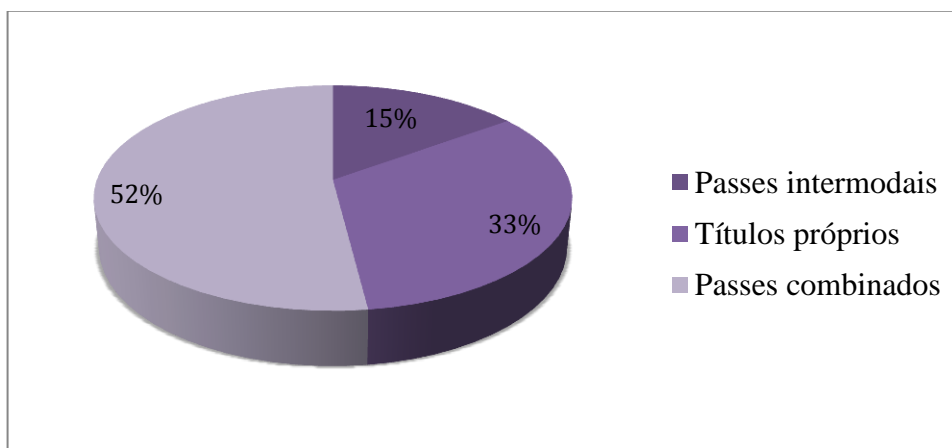


Figura 3.1 - Distribuição de passageiros por título de transporte (Fonte: Relatório de contas do Metropolitano de Lisboa 2011)

Carris

A Companhia de Carris de Ferro de Lisboa, mais conhecida simplesmente como Carris, é uma empresa pública de transporte de passageiros (Carris, 2013). Fundada em 1872, apresenta hoje uma grande variedade de veículos a operar na sua rede, com uma frota (Carris, 2012) de 635 autocarros, 57 eléctricos, 3 ascensores e 1 elevador. A oferta de carreiras é dividida em urbanas (60), suburbanas (16) e a rede da madrugada (7), numa extensão total de 677 km. O serviço é efectuado 24h por dia, dividindo-se em três escalões: diurno, nocturno e rede da madrugada. No tarifário de 2013, um título de viagem do cartão Viva válido para a rede Carris e Metro custa 1,40€ enquanto a tarifa a bordo (sem intermodalidade) custa 1,80€. Em 2012, a Carris transportou no total 182,7 milhões de pessoas, com um percurso médio de 3,26

km com uma taxa de ocupação de 19,08%. A distribuição tarifária por passageiros em 2012 está ilustrada na figura 3.2:

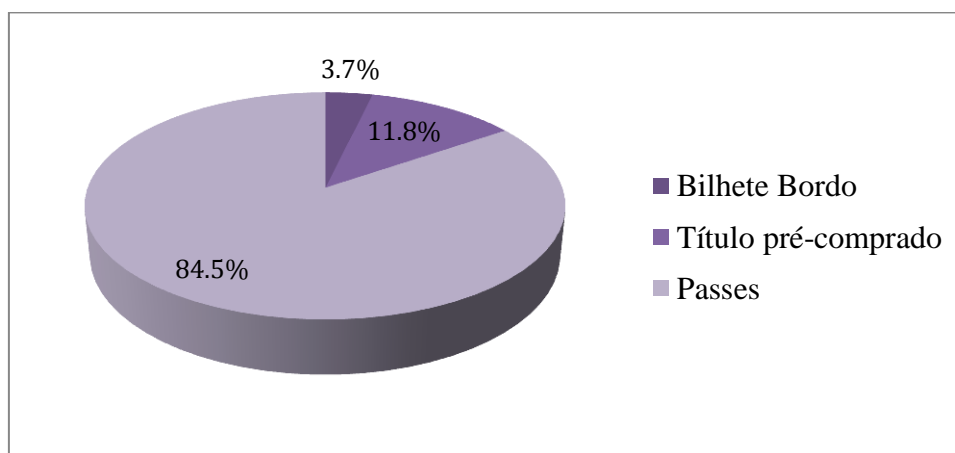


Figura 3.2 - Distribuição tarifária por passageiro na Carris em 2012 (Fonte: Relatório de contas da Carris 2012)

CP

A CP – Comboios de Portugal (CP, 2013), é uma empresa pública de transporte ferroviário, originalmente fundada em 1856. Actualmente divide-se em várias sub-empresas para gerir a oferta nacional e local, sendo a divisão que interessa neste estudo a CP Urbanos de Lisboa que faz transporte ferroviário de passageiros na área da Grande Lisboa. Oferece 4 linhas: Azambuja, Cascais, Sintra e Sado. A companhia transportou, em 2012 (CP, 2012), 77146 passageiros que correspondem a uma taxa de ocupação de 20,5%.

3.1.3 Intermodalidade

Por dia são registados mais de um milhão de validações no sistema de TC de Lisboa usando os cartões Viva. O uso intermodal de transportes públicos em Lisboa é hoje em dia uma realidade, cómoda e eficiente. Os terminais intermodais são naturalmente os pontos onde isto é mais visível pelas várias alternativas disponíveis no mesmo local e por representarem entradas na cidade de Lisboa, como o terminal do Cais do Sodré e Terreiro do Paço para passageiros de barco da margem Sul e Oriente, Sete Rios, Entre Campos e Roma/Areeiro para passageiros residentes na Grande Lisboa que chegam de comboio ou autocarro.

3.2 Base de dados

O trabalho desta dissertação, na análise e representação matemática dos comportamentos e preferências dos utilizadores dos vários TC da cidade de Lisboa, tem por base uma complexa

base de dados digital com informação segregada a detalhar cada viagem feita na rede. Esta base de dados é uma junção de dados dos vários operadores de Lisboa que utilizavam o cartão Viva à data da recolha em questão, o mês de Maio de 2012: Carris, CP, Fertagus, Metropolitano e Transtejo/Soflusa. Os principais números para este mês são apresentados no Quadro 3.1:

Quadro 3.1 - Estatística de utilização do cartão Viva em Maio de 2012 (Fonte: Bilhética OTLIS; Tratamento JMV CONSULTORES)

Maio de 2012	
Utilizadores	1 679 439
Validações	28 199 785
Viagens	20 493 999
Passageiros x Quilómetro	156 253 331
Extensão média por viagem	7 624 m

Esta base de dados é fornecida pela OTLIS, mas originalmente apresenta várias inconsistências na sua estrutura. Para a informação poder ser analisada transversalmente por algoritmos e cálculo automático é necessário um tratamento dos dados que uniformize a informação de todos os operadores. Este tratamento foi feito em trabalhos prévios por Luis Martinez e José Viegas (Viegas, 2012), com base em informação geográfica de carreiras e paragens e os dados de bilhética recolhidos pela OTLIS nos meses de Abril, Maio e Junho de 2012.

Estas deficiências a nível dos dados recolhidos pelos SBSC são recorrentes e estão presentes em quase todo o mundo. Em muitos deles os sistemas foram implantados sem uma visão de longo prazo, vindo apenas substituir o modo de cobrança antigo para um mais cómodo, ágil e fiável, não tendo sido projectados e implementados para a recolha de dados e para a planeamento do sistema. Na china, por exemplo, os sistemas não guardam o local de entrada e saída nos autocarros (Ma, 2012), tornando a análise dos dados muito difícil, pelo que a investigação em torno dos *smart cards* na China se centra na determinação do local de entrada e saída dos passageiros através de algoritmos e outras actividades de apoio como entrevistas nos transportes. Neste aspecto o sistema de Lisboa encontra-se bem à frente, pois apesar de não poder guardar a saída dos autocarros e comboios, que funcionam apenas com check-in, ele guarda o local de entrada e muitas outras informações que diminuem a necessidade do tratamento dos dados.

O tratamento e limpeza da base de dados é um processo complexo e que não respeita ao trabalho desta dissertação pelo que fazemos apenas referência às mais importantes acções:

- Estimação de distâncias percorridas em cada viagem;
- Estimação de paragem de saída;

- Limpeza de viagens fantasma e mal registadas;
- Definição de paragens vizinhas.

Dos resultados desse tratamento foram compilados dados para ilustrar estatisticamente o comportamento dos utilizadores no mês de Maio de 2012. O número de viagens que cada utilizador faz por dia está representado figura 3.3:

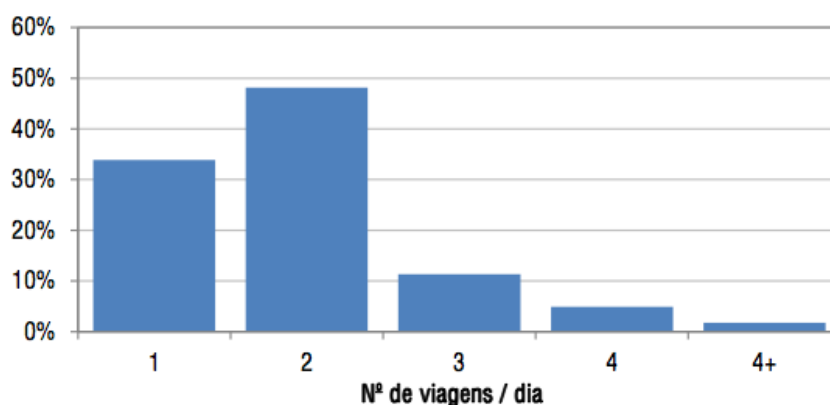


Figura 3.3 - Número de viagens por utilizador por dia (Fonte: Bilhética OTLIS; Tratamento JMV CONSULTORES)

Outra análise interessante, especialmente do ponto de vista do comportamento e dos hábitos dos utilizadores, é a média de transbordos por viagem que se apresenta na Figura 3.4:

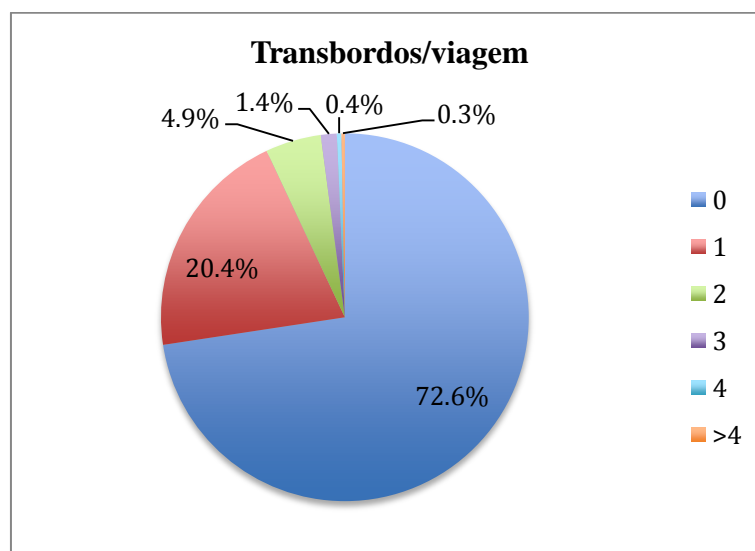


Figura 3.4 - Média de transbordos por viagem (Fonte: Bilhética OTLIS; Tratamento JMV CONSULTORES)

Observa-se que as viagens se realizam na maior parte sem transbordos, sendo que a percentagem para zero e um transbordo é de 93%, marginalizando as restantes situações.

Daqui surge a interrogação acerca da distribuição de operadores por viagem, apresentada na Figura 3.5:

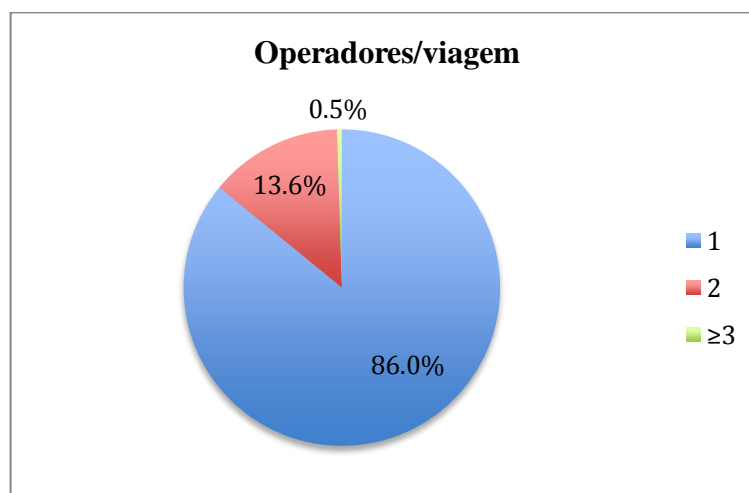


Figura 3.5 - Número de operadores utilizador por viagem (Fonte: Bilhética OTLIS; Tratamento JMV CONSULTORES)

O resultado aponta para uma grande maioria a utilizar apenas um operador por viagem, sendo a percentagem que usa mais que dois de todo residual.

Todos estes dados e outros mais constituem o substrato base de trabalho para a estimação do modelo de escolha de caminhos. Os algoritmos aplicados permitem também vários cálculos automáticos que adicionam ou retiram informação aos dados originais fornecidos pela OTLIS.

Sendo o objectivo da dissertação uma estimação inicial do modelo, tomou-se a primeira decisão operacional, que foi considerar para a estimação apenas a informação de um dia de viagens, ou seja, o estudo baseou-se na base de dados tratados da OTLIS de apenas um dia, o 3 de Maio de 2012. Como é regra em qualquer estudo da área de tráfego, o dia em causa é uma quinta-feira.

O ficheiro tinha então 16 separadores (colunas) de informação, que se apresentam no Quadro 3.2:

Quadro 3.2 - Informação disponível na base de dados de bilhética da OTLIS

Nº série do cartão	Tipo de cartão	Título	Data de validação
Operador	Tipo de Validação	Carreira	<i>Route</i>
Sentido	Nome da paragem inicial	Código da paragem inicial	Código da paragem final
Nome da paragem final	Distância euclidiana	Distância na rede	<i>Estimation type</i>

A maior parte delas são de explicação imediata pela sua designação mas outras poderão suscitar dúvidas, pelo que se fazem algumas observações acerca da sua natureza:

Nº série do cartão: É um número que varia entre 8 e 10 dígitos e identifica o *smart card*, não existindo qualquer informação acerca do detentor ou utilizador do cartão, reservando-se assim a privacidade dos dados;

Tipo de cartão: A modalidade do suporte de título (*smart card*), entre Lisboa Viva, Viva Viagem e ainda Lisboa Card (iniciativa de integração turística);

Título: Identifica exactamente qual a tarifa cobrada na validação em questão, ou seja, o tipo de passe, assinatura ou título de viagem usado;

Tipo de validação: distingue a natureza do acto de validação entre entrada (*entry*), saída (*exit*), repetição da validação (*reentry*) e recuperação (*recovery*);

Distância euclidiana: distância em linha recta entre as paragens inicial e final;

Distância na rede: distância em percurso entre as paragens inicial e final;

Estimation type: indica o método utilizado em cada viagem para a estimação da paragem inicial e final quando esta informação não estava disponível.

Esta base de dados continha 1 048 576 entradas (linhas), que corresponde aproximadamente ao número de viagens validadas nesse dia com *smart card* na rede de transportes de Lisboa. No entanto, estes dados incluem muitas viagens em que a origem ou o destino não são no interior da cidade de Lisboa. Os operadores Fertagus e Transtejo/Soflusa só fazem viagens entre o exterior e a cidade de Lisboa, e uma vez que o modelo se foca em perceber os critérios de escolha de TC e caminhos tomados pelos utilizadores, escolheu-se desprezar os dados destes operadores e trabalhar apenas com as viagens com origem e destino no interior de Lisboa, pois apenas essas apresentam de facto várias hipóteses de escolha e configuram um verdadeiro sistema integrado, ao passo que os utilizadores que viajam por exemplo de barco da Trafaria ou Seixal ou de Fertagus e CP de um município suburbano não tem na realidade uma alternativa viável em termos de transporte colectivo, nem os títulos destes sistemas apresentam a característica de bilhética integrada da Carris e Metropolitano.

Ficáramos assim com os operadores CP, Carris e Metropolitano para analisar, mas ao comparar os dados verificamos que a quantidade de viagens da CP restritas ao interior da Lisboa são muito pequenas em relação à Carris e Metro, e uma vez que este é um sistema menos flexível, optou-se por desprezar também estes dados, ficando-se por fim com uma base

de dados constituída pela Carris e Metro. Assim ficou-se com três alternativas possíveis de transportes na malha urbana de Lisboa:

1. Carris
2. Metropolitano
3. Combinação (carris + metropolitano)

De seguida houve a necessidade de escolher de entre todos os tarifários contemplados na base de dados, quais deveriam ser incluídos para a estimação do modelo. Em primeiro lugar, os tarifários mensais apresentam características completamente distintas dos títulos de viagens pré-compradas, os próprios cartões que as materializam são diferentes e foram criados para dois perfis de utilizadores distintos. Os seguintes dados gerais de mobilidade para cada um dos suportes de títulos ilustram isso perfeitamente na Figura 3.6:

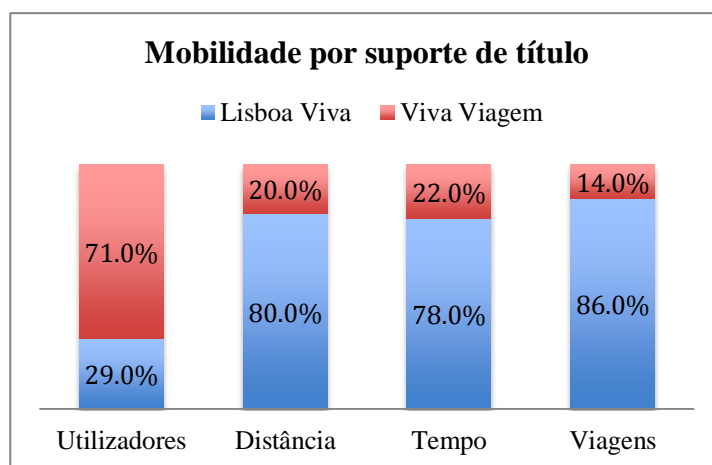


Figura 3.6 - Estatísticas de mobilidade por suporte de título (Fonte: Bilhética OTLIS; Tratamento JMV CONSULTORES)

Apesar de uma muito maior percentagem de utilizadores usar os cartões Viva Viagem no sistema, a distância percorrida na rede e o tempo de permanência nos transportes é muito superior nos utilizadores dos cartões Lisboa Viva, e em remate temos que 86% das viagens registadas no sistema são feitas por utilizadores usando os cartões Lisboa Viva, provando a grande diferença nas características dos cartões e tarifários e no perfil dos respectivos utilizadores. Aprofundando o estudo da utilização dos dois cartões, analisou-se a frequência de utilização de cada cartão por semana na Figura 3.7 para o Viva Viagem e na Figura 3.8 para o Lisboa Viva:

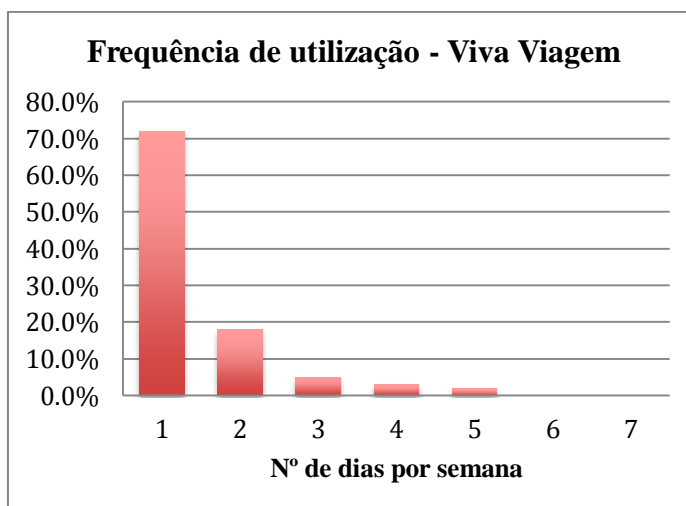


Figura 3.7 - Frequência de utilização do cartão Viva Viagem em dias por semana (Fonte: Bilhética OTLIS; Tratamento JMV CONSULTORES)

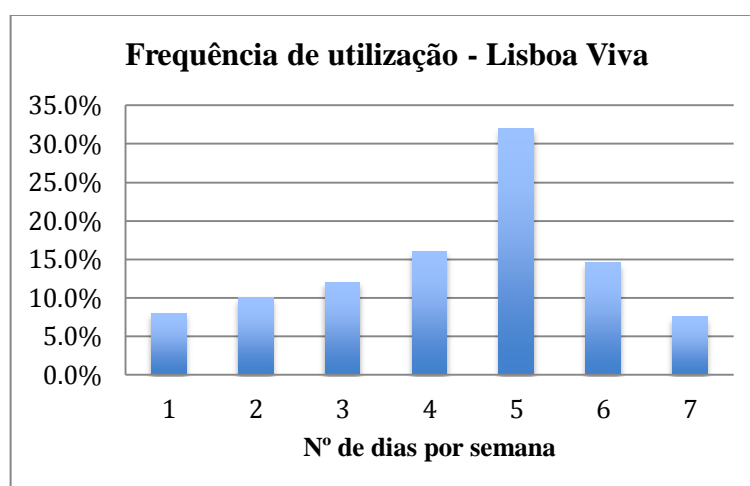


Figura 3.8 - Frequência de utilização do cartão Lisboa Viva em dias por semana (Fonte: Bilhética OTLIS; Tratamento JMV CONSULTORES)

Os dados corroboram o referido atrás, os cartões Viva Viagens são maioritariamente usados uma vez por semana enquanto os utilizadores do Lisboa Viva apresentam um uso mais distribuído mas concentrando-se entre 4 e 6 dias por semana, claramente num esquema de comuta diária.

Pode ser assumido que uma parte dos utilizadores dos cartões Viva Viagem não conhecem bem a rede de transportes e todas as hipóteses à sua disposição, ou que usam o sistema para deslocações de lazer em vez de laboral. O facto de estes utilizadores terem motivações diferentes para o uso do sistema de transporte colectivo em relação aos utilizadores frequentes pode fazer com que os seus critérios de escolha de caminhos e modos seja diferente. Assim, por uma questão de homogeneidade de condições decidiu-se analisar apenas os dados dos

passes mensais, neste caso os passes Navegante urbano que incluem toda a rede do Metropolitano e Carris, em todas as modalidades tarifárias:

- Navegante
- Navegante 3i
- Navegante Bonificado
- Navegante Social +
- Navegante Urbano 418 (A)
- Navegante Urbano 418/sub23
- Navegante Urbano Social (A) +

Ao iniciar o estudo dos dados para a construção do modelo, notou-se de imediato a falta de informação para a análise de um dos critérios tidos como chave na escolha dos utilizadores: o transbordo entre transportes ou carreiras/linhas e tudo o que envolve esta acção. Além disso, a base de dados de que se dispunha falhava na apresentação de uma informação base que era a duração da viagem. Assim, foi feita mais uma refinação dos dados com o algoritmo programado para calcular a informação referida.

O tratamento dos dados acrescentou os seguintes separadores:

Etapas: Define em quantas etapas se processou a viagem, sendo uma etapa definida por uma movimentação num mesmo modo de transporte, carreira e sentido validação de entrada num transporte e a saída do mesmo. Por exemplo um utilizador que comece a viagem num autocarro carris e depois mude para outro ou para o metro realiza uma viagem em duas etapas;

Nº operadores: Informação derivada da combinação de operadores apenas para simplificar a análise do documento;

Distância: O mesmo que a distância em rede, a distância euclidiana foi eliminada;

Tempo: Uma estimacão da duração total da viagem;

Tempo a bordo: Estimacão do tempo que o utilizador passa dentro do veículo;

Tempo transbordo: Estimacão do tempo que demora a ser feito o transbordo;

Tempo de acesso: Estimacão do tempo gasto entre a validacão do título no portão e a chega ao cais de embarque. Válido apenas para o Metropolitano.

Paragens de transbordo: Indica o código das paragens onde se efectuou o transbordo;

Carreiras: indica as carreiras usadas na viagem.

Para uma melhor percepção da integração destes conceitos no cenário de uma viagem elaborou-se um diagrama de espaço-tempo esquemático, apresentando na Figura 3.9:

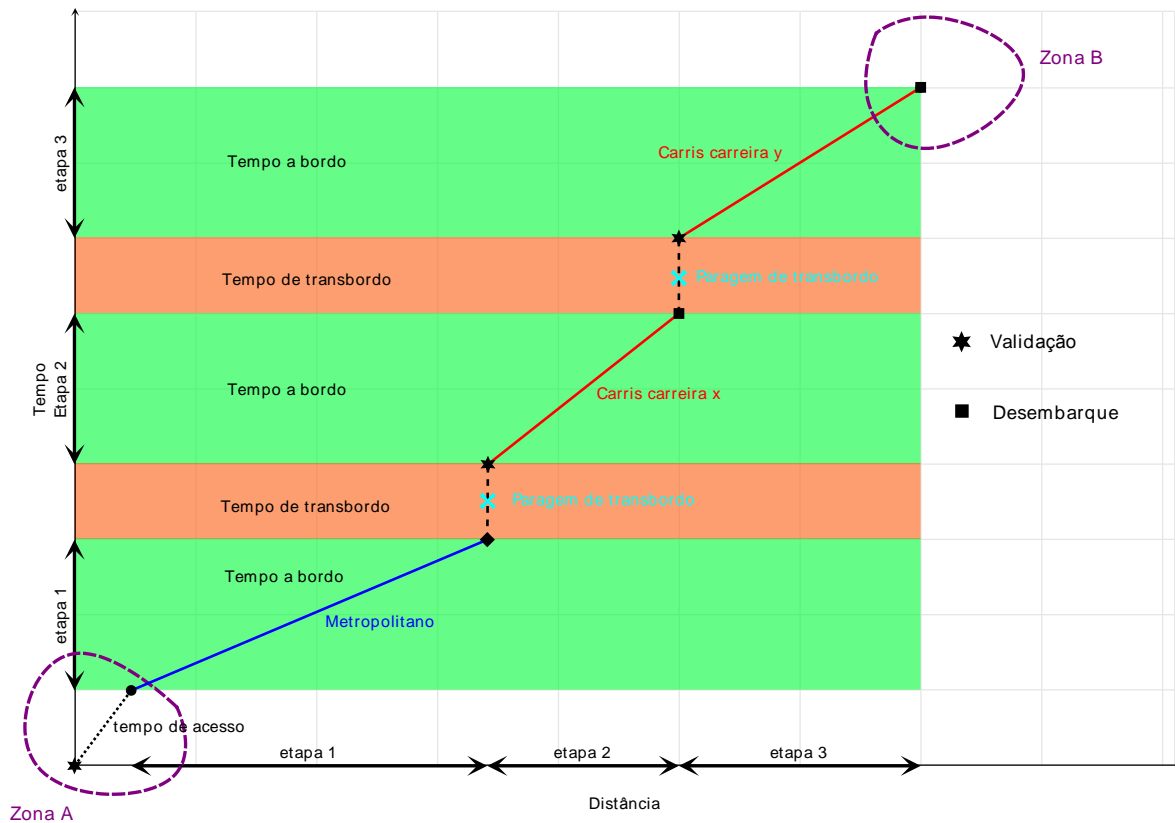


Figura 3.9 - Diagrama espaço-tempo ilustrador da informação contida na base de dados das viagens

Com a base de dados das viagens finalmente contendo toda a informação necessária para o cálculo do modelo, foi necessário transpor toda a informação para um SIG de forma a poder trabalhá-la espacialmente. Para além da base de dados das viagens na rede, foram precisas ainda outras duas bases de dados para se poder calcular o modelo. A primeira foi a base de dados da OTLIS das paragens da rede, com códigos de identificação, coordenadas, operador a que pertencem e designação. A segunda foi uma base de dados com uma agregação das paragens da Carris em grupos com o critério espacial de se localizarem a uma distância máxima de 30 metros entre elas.

A manipulação dos dados feita no SIG e os procedimentos tomados podem ser explicados em 12 passos:

1. **Definição do zonamento da cidade de Lisboa:** O zonamento considerado foi baseado no zonamento do Plano de Mobilidade de Lisboa de 2004, ao qual se aplicou uma subdivisão de quase todas as zonas em 3 sub-zonas, resultando num total de 124 zonas para a cidade de Lisboa, ilustradas na Figura 3.10. A área total é de 86,4 km², resultando numa área média por zona de 0,682 km².

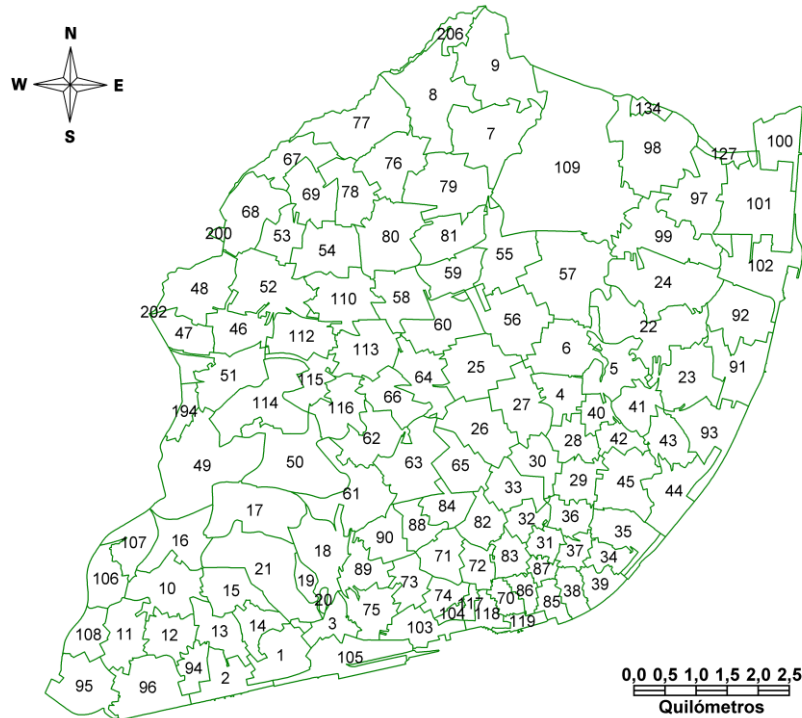


Figura 3.10 - Distribuição de zonas pela cidade de Lisboa

Este zonamento foi realizado no âmbito do projecto SCUSSE do MIT-PORTUGAL;

2. **Geocodificação das paragens da rede:** Foi feita a partir de base de dados da OTLIS;
3. **Exclusão das paragens da CP, Fertagus e Transtejo/Soflusa;**
4. **Filtragem das paragens para incluir apenas as que se situam no interior de Lisboa;**

Após esta filtragem ficou-se com 1564 paragens espalhadas pela cidade de Lisboa como ilustrado na Figura 3.11:

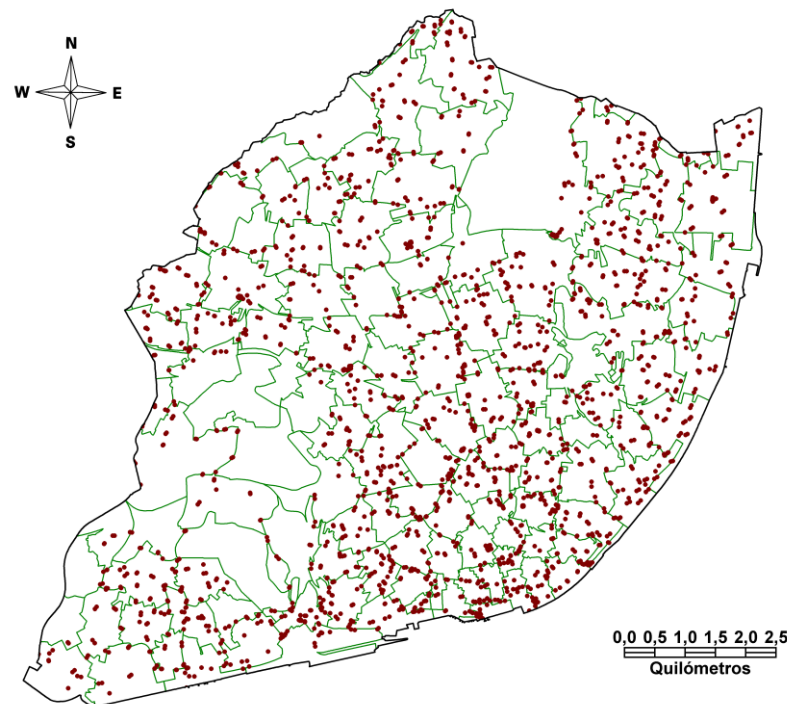


Figura 3.11 - Distribuição de paragens pela cidade de Lisboa

5. **Adição dos grupos de paragens da Carris:** Segundo a base de dados de agregação de paragens da Carris em grupos, para tornar mais fácil o trabalho dos dados, usando-se os grupos em vez das inúmeras paragens da Carris. Apesar de esta estar incompleta e não incluir umas poucas paragens que figuravam na base de dados das viagens, decidiu desprezar-se essas viagens pois a sua proporção era ínfima;
6. **Inclusão do Metro nos grupos:** Junção de paragens da Metro aos grupos da Carris ou criação de novos grupos quando não se encontram perto de nenhum existente. Isto resultou em 1293 grupos de paragens na cidade de Lisboa;
7. **Atribuição de zonas aos grupos:** Associar aos atributos de cada paragem e grupo de paragens a zona em que este se insere. Os grupos ficam então definidos quanto às zonas de O/D, que são no total 124;
8. **Transpor a base de dados das viagens para o SIG;**
9. **Associar a origem e destino de cada viagem às paragens geo-codificadas e respectivo grupo:** Isto permite ao SIG fazer uma análise espacial de cada viagem localizando o seu início e fim;
10. **Ordenação de todas as viagens por par Origem-Destino;**

11. Exclusão das viagens com origem e destino coincidentes;

12. Importação para excel;

Após a importação para excel dos dados trabalhados no SIG tomou-se mais uma opção de simplificação em que se filtrou as viagens para se trabalhar apenas com o período de ponta da manhã, das 07h00 às 10h00. Este é o período mais crítico do dia, com maior lotação dos transportes, mas também o que tem maior nível de serviço, com uma maior frequência e capacidade dos veículos. Assim, interessa que o conhecimento do comportamento dos utilizadores do sistema reflecta principalmente a realidade deste período. Após esta filtragem, a base de dados tinha 37 376 viagens. Para esse universo a distribuição modal pelas alternativas consideradas está ilustrada na Figura 3.12:

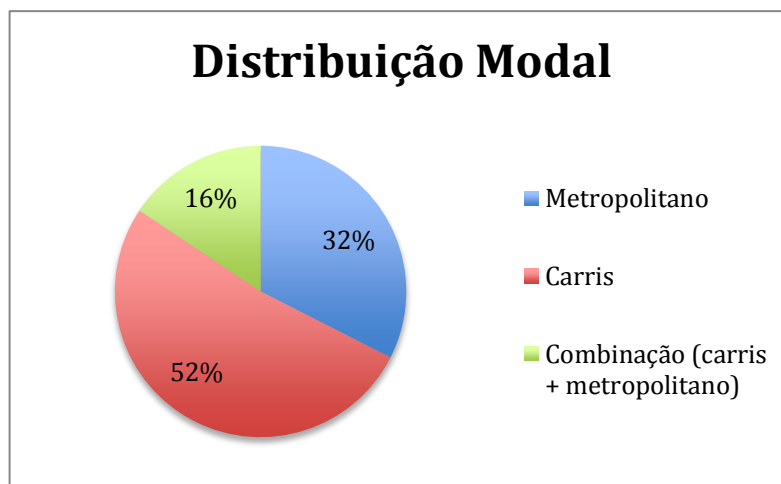


Figura 3.12 - Distribuição modal das viagens realizadas dentro da cidade de Lisboa

De seguida utilizou-se uma tabela dinâmica para agregar as viagens com o mesmo par O/D, com discriminação das combinações de transporte usadas. A partir disso os dados foram organizados para nos mostrarem quantas alternativas diferentes foram usadas pelos utilizadores para viajar entre cada par O/D e a respectiva proporção de escolha de cada uma das alternativas de transporte em relação ao total de viagens. Como exemplo veja-se o caso do par {O=6,D=24} no Quadro 3.3:

Quadro 3.3 - Agregação de viagens por par O/D e distribuição modal

Par O/D		Proporção de cada transporte			Escolhas	Número de viagens
Origem	Destino	Carris	Metro	Combinação		
6	24	0,125	0,375	0,5	3	8

Neste par temos que os utilizadores fizeram, nas oito viagens que realizaram, três escolhas distintas para realizar a viagem, e temos a proporção de utilizadores que escolhe cada uma das

alternativas, com 12,5% escolhendo a Carris, 37,5% escolhendo Metro e os restantes 50% optando por uma combinação de Metro e Carris.

Desta organização dos dados surge a constatação de que em um número significativo de pares O/D a viagem é feita apenas de um modo, não existindo uma pluralidade de escolhas que permita assim um estudo dos critérios de decisão e do comportamento dos utilizadores face a várias alternativas de transporte e caminhos. Fizemos então a última filtragem da base de dados, excluindo todos os pares O/D que só tinham uma opção de transporte, que resultou por fim num total de 21 487 viagens as quais serão utilizadas para a construção do modelo do capítulo seguinte.

4 CONSTRUÇÃO DE UM MODELO DE ESCOLHA DE CAMINHOS EM TRANSPORTES COLECTIVOS

Na maioria dos estudos de transportes realizados com efeitos para planeamento territorial e do sistema de transportes é usado o modelo clássico de transportes, uma abordagem consolidada nos anos 60. Ele simula o funcionamento de um sistema de transportes aplicado a uma representação da rede através de quatro módulos: Geração, Distribuição, Repartição Modal e Atribuição de tráfego.

Através da base de dados do sistema de bilhética sem contacto ficamos a conhecer quantitativamente os quatro módulos do modelo no presente pois abrange o universo de utilizadores do sistema, mas nem este modelo nem os dados nos dão informação qualitativa acerca de como são feitas as opções de deslocação na rede: Porque escolhe o utilizador x aquele modo de transporte e aquele trajecto?

O modelo de escolha de caminhos tenta responder à última pergunta. Através de um Logit Multinomial testámos várias hipóteses e atributos para ver quais se adequavam melhor aos dados, para assim percebermos o comportamento e preferências dos utilizadores e passarmos a ter também um conhecimento qualitativo do funcionamento da rede, conhecimento que nos permita gerir o presente e planificar o futuro.

Após todo o processo de tratamento e organização da base de dados descrito no capítulo anterior é possível partir para a concretização do objectivo da dissertação: a determinação de um modelo de escolha de caminhos em TC. A escolha de que atributos conferir ao modelo não foi imediata, apesar de limitada pela informação presente na base de dados, tendo-se experimentado várias especificações e formulações das funções utilidade. O cálculo do modelo foi feito com o módulo NLOGIT versão 4.0 do software LIMDEP (econometric software, inc.), um programa de econometria e estatística muito usado na estimação e simulação de modelos de escolha discreta.

Começaremos por descrever a metodologia usada para o cálculo do modelo, com a explicação da formulação e a enumeração e definição das variáveis consideradas. De seguida passamos para a estimação do modelo através do software, avaliamos o ajuste aos dados através do valor do pseudo- R^2 e da percentagem de escolhas correctamente previstas e é feita uma comparação com os resultados de outros estudos. São apresentados os resultados da estimação e dos testes de t de Student aos atributos para avaliar os intervalos de confiança e as significâncias estatísticas.

Por fim é feita a análise dos resultados através dos valores dos coeficientes e das significâncias estatísticas dos atributos e são calculados *trade-offs* entre alguns atributos, fazendo o comentário e interpretando os resultados posteriormente comparando também as gamas de valores dos atributos e dos *trade-offs* com os de outros estudos.

4.1 Metodologia

O modelo inicia-se com a definição das variáveis que permitem a constituição da variável dependente, isto é a escolha de opção de transporte. Estas são três, ALTIJ, CHOICE e CSET, e conduzem à escolha do modo de transporte para cada par O/D por proporção das viagens registadas na base de dados. Define-se também ao início a variável N_VIAG para servir de apoio ao cálculo do modelo. Estas variáveis descrevem-se no Quadro 4.1.

De seguida define-se ordenadamente os valores possíveis para a variável dependente, i.e., o modo de transporte escolhido por cada utilizador: B (Autocarro); M (Metro); C (combinação Metro + Carris).

O programa ao percorrer cada linha de dados, lê em primeiro lugar a variável ALTIJ que identifica o modo de transporte escolhido, de seguida lê a variável CHOICE que define a proporção das viagens que foram feitas entre o par O/D para o respectivo modo de transporte e por fim lê a variável CSET que mostra quantas alternativas de modos de transporte existem para o par O/D de zonas. Após este procedimento inicial o programa passa a conhecer qual das alternativas foi escolhida e portanto qual a função utilidade a utilizar.

Isto traz-nos ao passo seguinte na construção do modelo, a formulação das funções utilidade de cada uma das alternativas de escolha, isto é, os modos de transporte. Para isso definiram-se várias variáveis para cada um dos modos, que se descrevem também no Quadro 4.1:

Quadro 4.1 - Variáveis explicativas usadas na formulação do modelo

Código da variável	Descrição da variável	Tipo da variável
ALTIJ	Define a alternativa de modo de transporte escolhida para aquele par O/D	Discreta
CHOICE	A proporção de viagens realizadas no par O/D que utilizam a alternativa definida em Altij	Contínua
CSET	Dimensão do conjunto de escolha, ou seja, o número de alternativas para o par O/D	Discreta
N_VIAG	Número de viagens realizadas no modo de transporte para o par O/D	Discreta
ASC_B	Constante específica da alternativa autocarro	Contínua
CO_BUS	Número de combinações diferentes disponíveis para viajar de autocarro para o par O/D	Discreta
TE_BUS	Tempo médio a bordo das viagens realizadas de autocarro para o par O/D (min)	Contínua
T_D_B	Coefficiente de variação do tempo a bordo de autocarro (TE_BUS)	Contínua
TRA_BUS	Número médio de transbordos entre autocarros das viagens realizadas para o par O/D	Contínua
PE_BUS	Tempo médio da deslocação a pé entre paragens no transbordo (min)	Contínua
PER_REFO	Percentagem de reformados residentes na zona de origem da viagem	Contínua
CO_MET	Número de combinações diferentes disponíveis para viajar de metro para o par O/D	Discreta
TE_MET	Tempo médio a bordo das viagens realizadas de metro para o par O/D (min)	Contínua
T_D_M	Coefficiente de variação do tempo a bordo de metro (TE_MET)	Contínua
TRA_MET	Número mínimo de transbordos entre linhas de metro necessários para realizar a viagem para o par O/D	Discreta
PER_JOV	Percentagem de jovens residentes na zona de origem da viagem	Contínua
ASC_C	Constante específica da alternativa combinação	Contínua
CO_CO	Número de combinações diferentes disponíveis para viajar em combinação de modos para o par O/D	Discreta
TE_CO	Tempo médio a bordo das viagens realizadas em ambos os modos de transporte para o par O/D (min)	Contínua
PE_CO	Tempo médio da deslocação a pé entre paragens no transbordo (min)	Contínua
TRA_C_CO	Número médio de transbordos entre autocarros das viagens realizadas para o par O/D	Contínua
PER_METR	Proporção de tempo a bordo da viagem realizada em metro	Contínua

Estes atributos foram definidos com uma lógica de agregação da informação para a análise de cada par O/D, para uma simplificação do processo de cálculo do modelo e da sua própria formulação, daí a utilização de valores médios para os tempos e transbordos, que nos permite trabalhar com uma proporção de escolhas por modo de transporte.

Numa primeira impressão esta abordagem pode sugerir que, ao contrário do desígnio da dissertação do estudo do processo de escolha de caminhos, se está na verdade a incorrer na construção de um modelo de escolha de modos, uma vez que as viagens estão agregadas por modos de transporte. Apesar deste facto, os atributos em causa reflectem o processo de decisão da escolha de caminhos, ainda que no modelo a variável dependente seja entre uma de três alternativas de modos de transporte. Temos assim um modelo de escolha de caminhos por modos, cujos resultados da estimação do modelo, e não tanto as funções utilidade por si, nos permitem perceber os critérios de escolha mais importantes e as preferências dos utilizadores da rede. É de notar que em macro-modelos de transportes a rede de TC é geralmente modelada como uma rede conjunta dos vários modos, isto é, não é feita uma escolha de modo específico de transporte colectivo e depois realizada uma afetação à rede desse modo, mas sim uma escolha entre TI e TC sendo que as viagens em TC depois se vão distribuir por modo consoante a rede. As preferências especiais por cada um dos modos são depois estimadas através das constantes específicas de alternativa.

Outra questão é a perda de detalhe que esta agregação dos dados causa. De facto a análise fica mais grosseira, mas tentou minimizar-se o mais possível a dispersão dos erros. Por exemplo para o tempo médio a bordo do veículo (TE_BUS e TE_MET), para contabilizar a variedade que não é expressa por essas variáveis utilizou-se como atributo o coeficiente de variação (T_D_B e T_D_M) desse mesmo tempo. Este atributo consiste na divisão do desvio padrão do tempo médio a bordo ($\sigma(\text{TE_BUS})$ e $\sigma(\text{TE_MET})$) pelo tempo médio a bordo.

No que respeita aos transbordos, quando a etapa era realizada em autocarro utilizou-se o valor médio de transbordos efectuados naquele trajecto, valor que tem muito pouca variação, e no metro utilizou-se o valor mínimo de transbordos necessários para efectuar o trajecto. Isto deve-se à infraestrutura do metropolitano de Lisboa que não requer validação por linhas, sendo apenas necessário validar no início e fim da viagem. Uma vez que não existe informação no sistema acerca das estações onde foram efectuados os transbordos é apenas possível calcular o número mínimo necessário de acordo com a origem e destino da viagem.

A partir das variáveis definidas no Quadro 4.1, formularam-se as seguintes funções de utilidade:

$$U(B) = \text{ASC_B} + \text{CO_BUS} * \text{CO_BUS} + \text{TE_BUS} * \text{TE_BUS} + \text{T_D_B} * \text{T_D_B} + \text{TRA_BUS} * \text{TRA_BUS} + \text{PE_BUS} * \text{PE_BUS} + \text{PER_REFO} * \text{PER_REFO}$$

$$U(M) = CO_MET*CO_MET + TE_MET*TE_MET + T_D_M*T_D_M + TRA_MET*TRA_MET + PER_JOV*PER_JOV$$

$$U(C) = ASC_C + CO_CO*CO_CO + TE_BUS*TE_CO + PE_CO*PE_CO + TRA_BUS*TRA_C_CO + PER_METR*PER_METR$$

Note-se que estas formulações já são fruto de um extenso teste de hipóteses, tendo-se considerado várias alternativas de organização dos dados, várias variáveis e aplicações logarítmicas das mesmas e outros atributos, tendo-se encontrado que o melhor ajuste era obtido desta maneira.

Optou-se por nomear os coeficientes (β_{aj}) com o mesmo termo do respectivo atributo (X_{aj}) nas alternativas de metro e autocarro de forma a facilitar a formulação das funções utilidade e a análise dos resultados da estimação do modelo. Na alternativa de combinação autocarro + metro seguiu-se o mesmo princípio, no entanto após testar várias formulações concluiu-se que o melhor ajuste era obtido quando se associava ao atributo do tempo médio a bordo da viagem (TE_CO) o coeficiente do tempo médio a bordo do autocarro (TE_BUS), ou seja, do tempo a bordo numa viagem de combinação autocarro + metro, o mais significativo é o tempo a bordo do autocarro, o que faz sentido uma vez que o metro apresenta maior conforto e rapidez. De forma semelhante, associou-se ao atributo do número de transbordos médio entre autocarros numa viagem de combinação (TRA_C_CO) o coeficiente dos transbordos em autocarro (TRA_BUS). Os valores das variáveis PE_BUS e PE_CO são os valores do separador Tempo Transbordo para cada viagem na base de dados refinada.

Utilizaram-se dois atributos socioeconómicos no modelo, a percentagem de residentes reformados (PER_REFO) e a percentagem de residentes jovens (PER_JOV) das zonas de origem de cada viagem. O primeiro foi integrado na função utilidade do autocarro e o segundo na função utilidade do metro, com o objectivo de testar a sua significância e inferir acerca das preferências de transporte destes dois grupos. Os dados foram retirados dos Censos 2011, somando-se as várias zonas de censos que se incluíam dentro de cada uma das nossas zonas de Lisboa.

Na função utilidade da combinação incluiu-se um atributo que indica a proporção de tempo da viagem a bordo do metro (PER_METR), com o objectivo de testar a hipótese de a probabilidade de escolher esta alternativa aumentar com esta proporção.

Escolheu-se como alternativa referência o modo metro, logo vamos medir a diferença de utilidade que não é explicada pelos atributos em cada alternativa em relação à função U(M), através das constantes específicas de alternativa (α_j).

Este modelo foi calculado de duas maneiras, uma sem pesos em que todos os pares O/D representam a mesma importância para a estimação do modelo, e outra com pesos, através da variável N_VIAG, em que a importância do par O/D é maior quanto mais viagens ele apresentar. Assim, o modelo desdobra os valores médios dos atributos para o par O/D no número de viagens realizadas, garantido a sua devida representação proporcional.

4.2 Estimação do modelo

Após a formulação do modelo descrita na metodologia corremos o NLOGIT e obtivemos as estatísticas descritivas do modelo e os resultados dos coeficientes. Começámos por fazer a análise do ajuste do modelo aos dados. Para isso usámos o teste do pseudo- R^2 , comparando-se o modelo sem e com pesos na quantidade de viagens, obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 4.2:

Quadro 4.2 - Ajuste estatístico do modelo: Teste do pseudo- R^2

Tipo de modelo	Logaritmo da verosimilhança	Pseudo-R²
Modelo sem pesos	L(c) = -1116,410 L(*) = -1015,732	0,09018
Modelo com pesos	L(c) = -14179,70 L(*) = -12277,54	0,13415

Entre os dois, vemos que o modelo com pesos apresenta uma melhoria significativa no ajuste, sendo naturalmente positivo a correcta representação dos pares O/D através da quantidade de viagens operadas, pelo que se vai utilizar esta formulação. Apesar de o valor obtido para o pseudo- R^2 ser baixo, a gama de valores é muito diferente da obtida no teste do R^2 , sendo que um valor de 0,2 já se considera representar um bom ajuste. Assim, o modelo faz um ajuste fraco aos dados, mas numa aplicação real como esta não é incomum resultados desta ordem. Num modelo baseado em dados de preferências reveladas tão detalhado e com uma amostra tão extensa eram esperados resultados um pouco melhores, mas temos de considerar que as agregações de dados que se fizeram para a simplificação da organização da informação e da estimação do modelo tiveram um efeito negativo no ajuste.

Podemos comparar o valor obtido para o ajuste com os resultados de outros modelos Logit Multinomial estimados em estudos semelhantes de escolha de caminhos, já apresentados no estado da arte. Observe-se para isso o Quadro 4.3:

Quadro 4.3 - Comparação do valor obtido de pseudo-R² com outros estudos

Valor obtido	Hochmair (2009)	Pursula e Weurlander (1999)	Lam e Xie (2002)	Raveau e Guo (2012) Santiago	Londres
0,134	0,146	0,336	0,354	0,382	0,566

Estes valores mostram que à primeira vista, de todos estes modelos de PR, o modelo por nós estimado é o mais fraco. Há que considerar que cada um destes modelos apresenta uma origem de dados diferente, uma metodologia e abordagem diferentes, e nenhum deles tem uma amostra de dimensão comparável à nossa, nem trabalha com a totalidade da rede como no nosso caso. Na verdade todos os outros estudos referenciados consideram apenas uma pequena parte da rede, maioritariamente percursos notáveis das mesmas e isto é influente pois torna mais fácil a tarefa de criar um modelo global que se ajuste aos dados colectados uma vez que o investigador tem uma melhor noção do que tem de representar. Para além disso, os estudos de PR foram feitos por entrevistas ou questionário, estando as perguntas já pensadas com um propósito ou agenda, enquanto numa base de dados oriunda de um sistema de bilhética como a deste estudo não existe qualquer tipo de relação entre os dados e a organização do estudo a priori.

Outra maneira de avaliar o ajuste do modelo é comparar as escolhas reais do modo de transporte, expressas na base de dados, com a previsão oferecida pelo modelo através do cálculo das funções utilidade. O NLOGIT apresenta esta informação automaticamente através de uma tabela cruzada de escolhas reais vs escolhas previstas, apresentada no Quadro 4.4. Nesta tabela as linhas indicam as escolhas reais enquanto as colunas indicam as escolhas previstas pelo modelo, logo o resultado será tanto melhor quanto mais concentradas na diagonal estiverem as escolhas.

Quadro 4.4 - Comparação de escolhas reais vs previsão oferecida pelo modelo

Real vs Previsão	Carris	Metro	Combinação	Total
Carris	333	108	173	614
Metro	61	349	45	455
Combinação	195	69	212	476
Total	590	525	430	1545

No entanto esta tabela não tem em conta o peso que se conferiu ao modelo através da variável N_VIAG, pelo que se teve de proceder ao cálculo da percentagem de acertos tendo em conta o número de viagens afectas a cada modo de transporte por par O/D. Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 4.5 na forma de percentagem de previsões acertadas pelo modelo quando comparadas às escolhas reais dos dados:

Quadro 4.5 - Percentagem de acertos do modelo

Percentagem de acertos	
Autocarro	83,31%
Metro	90,06%
Combinação	81,08%
Global	86,22%

Estes resultados mostram um ajuste muito melhor do que faria prever o resultado do pseudo- R^2 , com uma percentagem global de acertos correctos de 86 %, sendo menor na combinação mas muito alto no metro. Isto acontece pois o metro é mais atractivo e é um sistema mais fechado e fácil de modelar do que a combinação de modos que envolve muitos aspectos difíceis de quantificar. O pequeno valor do pseudo- R^2 quando comparado com a percentagem de escolhas acertadas é explicado pela grande propagação de erros que acontece no cálculo da verosimilhança devido à riqueza da base de dados, enquanto na análise dos acertos isto tem muito menos relevância, uma vez que mesmo que a probabilidade de escolher uma alternativa seja 55%, por exemplo, o modelo vai assumir essa como a hipótese que o utilizador irá escolher, e na maior parte dos casos (como demonstrado pela percentagem de acertos global) ela vai ser coincidente com a escolha real.

Quadro 4.6 - Comparação do valor obtido de acertos global com outros estudos

Valor obtido	Hochmair (2009)	Pursula e Weurlander (1999)
86,2 %	48,7 %	78,8 %

No Quadro 4.6 temos a percentagem de acertos global obtida noutros estudos em escolha de caminhos. No trabalho de Hartwig Hochmair (Hochmair, 2009) a percentagem global de acertos entre escolhas previstas e escolhas reais foi próxima de 50%, inferior ao resultado por nós obtido, enquanto que o valor do pseudo- R^2 é muito próximo do nosso. Já no trabalho de Pursula e Weurlander a percentagem de acertos conseguida foi de 78,8% no modelo de PR, quando o pseudo- R^2 é de 0,336. Isto revela que não se deve avaliar o modelo apenas pelo teste do pseudo- R^2 e que a qualidade do modelo, quando comparado com o de outros estudos, não é tão inferior quanto a primeira análise sugeria.

Com as duas análises feitas ao ajuste do modelo ficamos com confiança na formulação adoptada especialmente em termos comparativos da utilidade entre as várias alternativas, pois mesmo com a incerteza e erro associado às funções utilidade, o modelo consegue no global simular o processo de escolha dos utilizadores correctamente.

Após a análise da qualidade do modelo a nível global, importa fazer uma avaliação dos atributos que o compõem. Estes são representados nas funções utilidade pelos coeficientes (β_{aj}), e é a análise comparada destes valores e da estatística de cada um que nos permite

perceber realmente os critérios de escolha, as tendências e as preferências dos utilizadores na utilização do sistema de TC de Lisboa e o seu processo de decisão na escolha de caminhos.

A avaliação dos resultados é feita em duas frentes, a primeira é o valor da estatística do teste t de Student, que nos indica se os atributos são significativos para o modelo e em que intervalo de confiança, e quais se ajustam melhor aos dados para explicar a utilidade que é conferida pelos utilizadores a cada alternativa. A segunda frente de avaliação é dada pelo valor do coeficiente de cada atributo e pelo seu sinal. Um sinal positivo indica, de maneira geral, que o atributo em causa origina uma contribuição positiva para a utilidade da alternativa, enquanto o sinal negativo indica que o atributo é contrário às preferências dos utilizadores, criando desutilidade para a alternativa em questão.

Comparando os valores dos coeficientes dos atributos que apresentam as mesmas unidades podemos avaliar quais são mais importantes e determinam a escolha de caminhos. Esta segunda frente vai ser realizada na secção seguinte.

No entanto a interpretação destes resultados não é linear e fácil, estando-lhe associada o erro que advém do modelo, cujo ajuste neste caso fica um pouco aquém do nível matematicamente desejado, e ainda o erro humano. A interpretação feita por um investigador pode ser diferente da de outro, sendo aqui importante a experiência e o conhecimento do sistema, devendo-se evitar tentar relacionar os resultados com as preferências próprias, e seguir uma análise em consonância com as estatísticas dos outros atributos e do sistema geral.

Começamos por uma visão global dos valores dos coeficientes de cada atributo e dos resultados dos testes de t de Student, no Quadro 4.7:

Quadro 4.7 - Resultados da estimação do modelo

Variável	Coefficiente	Erro padrão	t de Student
ASC_B	-1,7697	0,179	-9,882
CO_BUS	0,2271	0,011	20,130
TE_BUS	-0,0235	0,003	-9,259
T_D_B	0,8877	0,078	11,394
TRA_BUS	-0,6946	0,048	-14,417
PE_BUS	-0,1105	0,016	-6,703
PER_REFO	1,8559	0,350	5,299
CO_MET	0,2990	0,036	8,349
TE_MET	-0,0811	0,005	-17,387
T_D_M	0,5530	0,105	5,251
TRA_MET	-0,1665	0,030	-5,538
PER_JOV	2,1433	0,545	3,936
ASC_C	-1,4699	0,153	-9,615
CO_CO	0,2805	0,010	26,802

PE_CO	-0,0443	0,018	-2,438
PER_METR	0,5243	0,129	4,062

A primeira observação a fazer é que todos os atributos apresentam significância estatística com um intervalo de confiança de 95%, sendo este um resultado excelente e que valida as opções tomadas quanto aos atributos e funções utilidade.

Passando para o balanço dos resultados do teste t de Student, note-se em primeiro lugar o panorama global. Ambas as constantes específicas de alternativa, para o autocarro e combinação (ASC_B e ASC_C), tem um nível de significância alto e o sinal negativo. Isto significa que os atributos do modelo não estão a explicar completamente as diferenças de utilidade entre estas duas alternativas e o metro, mas mais importante que isso, o seu sinal indica que os utilizadores preferem a alternativa metro na sua escolha de caminhos, ou seja, há uma desutilidade do autocarro e da combinação em relação ao metro que as variáveis consideradas não explicam por completo.

Há que destacar um resultado curioso e anormal para as constantes específicas de alternativa, que é o facto de as duas apresentarem uma significância estatística igual, apesar de representarem alternativas diferentes. Normalmente os valores seriam sempre diferentes pois uma alternativa é menos atraente que a outra, mas este resultado é fruto do contexto do estudo, uma vez que o modelo emprega apenas atributos instrumentais e dois indicadores socioeconómicos, deixando de fora atributos que traduzam aspectos psicológicos (variáveis de atitude) que não são possíveis de contabilizar numa base de dados de bilhética mas que tem importância no processo da escolha de caminhos por um individuo. Assim, o modelo indica um valor idêntico para a significância das duas constantes pois a diferença de utilidade que não é medida em relação à alternativa de referência deverá corresponder ao efeito do autocarro para as duas alternativas, uma vez que a alternativa combinação também inclui o metro.

Nos atributos com uma significância estatística muito expressiva temos, pelo lado positivo, o número de combinações disponíveis para viajar de autocarro + metro, autocarro e metro (CO_CO, CO_BUS e CO_MET) e o coeficiente de variação do tempo a bordo de autocarro (T_D_B). Pelo lado negativo, expressando uma desutilidade, temos o tempo a bordo no metro e autocarro (TE_MET e TE_BUS), o número de transbordos em autocarro (TRA_BUS), as constantes específicas de alternativa (ASC_B e ASC_C) e o tempo de deslocação a pé nos transbordos das viagens de autocarro (PE_BUS).

Com um nível de significância menor que os anteriormente referidos, mas ainda em níveis muito bons, entre 2,4 e 5,5, temos os restantes atributos. A favor da utilidade temos as variáveis sócio-económicas (PER_REFO e PER_JOV), a proporção da viagem feita em metro para a alternativa de combinação (PER_METR) e o coeficiente de variação do tempo a bordo para o metro (T_D_M). Do lado negativo temos o número de transbordos nas viagens de

metro (TRA_MET) e o tempo de deslocação a pé nas viagens de combinação (PE_CO), que é a variável menos significativa do modelo.

As variáveis socioeconómicas utilizadas no modelo foram derivadas dos Censos 2011 e cruzadas com a base de dados da bilhética, o que pode ajudar a explicar a significância estatística mais baixa que se obteve em ambas. Uma abordagem que poderia ser mais precisa para estudar as tendências socioeconómicas seria se o cartão Lisboa Viva incluísse informação quanto à ocupação e idade de cada utilizador para se poder complementar os dados actuais com informação exacta em vez dos dados gerais dos Censos. No entanto esse tipo de utilização não está prevista para o sistema de Lisboa e entra ainda na problemática já referida da privacidade e utilização dos dados pessoais.

4.3 Resultados

As constantes específicas de alternativa apresentam sinal negativo e um valor alto dos coeficientes, indicando que o modelo tem espaço para evoluir, como mostra o valor de pseudo- R^2 , e conseguir expressar melhor as preferências e os critérios que determinam a utilidade das alternativas para os utilizadores. Comparando os dois, a alternativa autocarro apresenta o maior coeficiente, indicando uma maior desutilidade em relação à alternativa combinação que não é explicada pelos atributos considerados.

A maior significância para os atributos CO_BUS e CO_CO evidencia a importância da existência de várias alternativas de caminhos para aumentar a atractividade dos TC. Uma leitura que se pode fazer deste facto, além do superficial, toca numa característica do sistema de transporte muito importante que infelizmente não está incluída na base de dados. Essa característica é o *headway* de serviço de cada modo de transporte (por linha ou carreira), ou seja estas variáveis podem ser consideradas variáveis *proxy* para a frequência das carreiras. Facilmente se percebe a sua ausência da base de dados uma vez que ela não oferece qualquer utilidade para a missão de validação e contabilidade financeira. No entanto ela é muito importante na escolha de caminhos de TC e até na atractividade do sistema de TC num todo. A constatação que um utilizador não irá escolher fazer a sua viagem, por exemplo de autocarro, se tiver que esperar muito tempo por uma carreira ou se não souber a frequência de circulação da dita carreira é dificilmente refutável, revelando a importância de um alto nível de frequência de serviço e do acesso a esta mesma informação.

O facto de o atributo CO_MET ter muito menos significância que os outros dois é expectável, uma vez que o sistema de metro tem um funcionamento completamente diferente, com linhas bem definidas, mas também corrobora a suposição destas variáveis como *proxys* da frequência de serviço, uma vez que o metro apresenta uma frequência muito alta na hora de ponta e é muito fiável, perdendo então relevância este atributo. Ainda assim, a comparação dos valores dos coeficientes entre os atributos de combinações mostra que o mais importante

é o do metro, seguido de perto pelo da combinação de modos, mostrando que os utilizadores têm uma preferência por viajar de metro e valorizam a existência de várias possibilidades de viagem através deste modo.

Os atributos T_D_B e T_D_M apresentam sinal positivo, o que pode parecer errado à primeira vista. É natural pensar que o coeficiente de variação de tempo de viagem a bordo não devia ser positivo pois parece que os utilizadores favorecem alternativas que não são muito fiáveis na duração da viagem, e especialmente para a alternativa autocarro. Uma explicação que temos para este facto é que este coeficiente de variação confere utilidade às alternativas porque ele representa a existência de carreiras com tempos de viagem diferentes, remetendo mais uma vez para a oferta de alternativas de viagem dentro de cada modo, sendo então o seu sinal naturalmente positivo, e o coeficiente maior para o autocarro pois o coeficiente de variação é maior e tem um impacto maior na escolha do que no metro, que é uma rede fixa e com menor coeficiente de variação de tempo de viagem e menos alternativas.

O tempo a bordo do veículo (TE_MET e TE_BUS) é um critério praticamente ubíquo nos modelos de escolha de caminhos, sendo às vezes substituído pelo critério de distância, mas o seu sinal é invariavelmente negativo e a sua significância alta. Para o caso do nosso modelo, os sinais são também negativos tal como esperado, uma vez que os utilizadores favorecem caminhos mais rápidos.

Comparando os valores dos coeficientes entre o metro e o autocarro vemos que o coeficiente do metro é aproximadamente 3,5 vezes maior, indicando que para uma viagem entre um par O/D, os utilizadores esperam do metro uma maior rapidez e regularidade, havendo uma maior penalização para a duração da viagem do que no autocarro que se espera ser mais lento. Isto é normal uma vez que as viagens de metro são mais rápidas e raramente sujeitas a atrasos uma vez que os impedimentos à circulação normal do metro são raros, ao contrário do autocarro que facilmente fica parado no trânsito ou sofre alterações pontuais do percurso e velocidade. Assim, um aumento do tempo a bordo no metro é altamente sentido pelos utilizadores de forma negativa, enquanto no autocarro já existe uma pré-aceitação destes factores e de um maior tempo a bordo. Para além disso, o facto de a significância ser menor para o autocarro indica que neste modo outros atributos têm uma importância maior na explicação da sua utilidade (ou desutilidade), como o número de transbordos. Estas variáveis mostram que os utilizadores valorizam muito a rapidez das suas viagens e o seu decorrer dentro do esperado, sem perturbações.

O número de transbordos (TRA_BUS e TRA_MET) são também critérios presentes em muitos modelos modernos de escolha de caminhos. O seu sinal é sempre negativo e apresentam uma significância muito alta em quase todos os modelos quando comparados com os restantes atributos. Para este modelo também se verificou esses mesmos resultados, com uma significância do número de transbordos médios em percursos feitos de autocarro muito alta, quase o triplo do que nos percursos feitos de metro e um valor de coeficiente no

autocarro mais do que 4 vezes superior ao do metro. Este resultado não oferece nenhum desafio na sua análise, uma vez que os transbordos na rede de metro de Lisboa são mais rápidos e muito mais confortáveis e seguros do que no sistema de autocarros, onde o transbordo é feito em piores condições, maioritariamente na rua e muitas vezes envolvendo uma deslocação a pé entre paragens de autocarro, sendo então um atributo mais importante na definição da utilidade da alternativa autocarro do que na alternativa metro. O facto da rede do metropolitano de Lisboa ser de pequena dimensão e complexidade também contribui para uma maior simplicidade do planeamento de uma viagem que envolva transbordo, diminuindo o seu impacto negativo na utilidade deste modo de transporte. Este resultado mais uma vez inclina a balança das preferências dos utilizadores para o lado do metro.

O último atributo instrumental do modelo é o tempo médio de deslocação a pé nos transbordos (PE_BUS e PE_CO). A razão de não se ter considerado este atributo para a alternativa metro é que os tempos de deslocação a pé para o metro foram calculados por um algoritmo, i.e. não eram exactos, e apresentavam valores desprezáveis. Este atributo não é por vezes considerado por falta de informação, sendo utilizado por vezes o tempo ou distância a pé entre a residência ou o estacionamento do veículo próprio e a estação de origem ou entre a estação de destino e o trabalho, para a hora de ponta da manhã. Fazendo um paralelismo entre estas duas variáveis pelo facto de representarem uma necessidade de deslocação a pé devido a um “transbordo”, vemos que noutros estudos da área esses atributos apresentam sinal negativo e coeficientes comparativamente altos.

Para a alternativa autocarro o valor do coeficiente é 2,5 vezes maior do que na alternativa combinação. Tendo em conta que a combinação contempla obrigatoriamente pelo menos um transbordo entre autocarro e metro, podemos explicar o resultado pela predisposição dos utilizadores a realizar o transbordo, que é menor para a alternativa autocarro do que na combinação, uma vez que nessa o utilizador a aceita como não tendo outra alternativa. Assim, a deslocação a pé no transbordo, e o próprio transbordo em si, é mais penalizador no autocarro que na combinação de modos, havendo claramente uma preferência dos utilizadores por carreiras directas no autocarro. Além disso, o transbordo em metro e para o metro na alternativa combinação, por ser mais confortável e rápido, pode amenizar o efeito negativo na utilidade deste atributo.

Fazendo uma comparação dos valores dos coeficientes de todos os critérios de tempo, observamos que o maior, e uma vez que todos têm sinal negativo, é o tempo de deslocação a pé nos transbordos de autocarro, seguido do tempo a bordo no metro. O que menor impacto tem na utilidade é o tempo a bordo no autocarro.

Na alternativa de combinação de modos temos a variável que indica a proporção de tempo a bordo da viagem realizado em metro (PER_METR), à semelhança do trabalho desenvolvido por Lam e Xie (2002). Nesse estudo, o atributo em questão apresentava sinal positivo e significâncias que variavam entre 2,5 para os modelos calibrados com dados de PD e misto

(PD + PR) e valores de 1,25 para os modelos calibrados com dados de PR apenas. O sinal aqui obtido foi também positivo, indicando mais uma vez a preferência dos utilizadores pelo metro, e o valor de significância foi superior ao de Lam e Xie, notavelmente se comparamos com o modelo calibrado por PR.

Por último temos as variáveis socioeconómicas referentes à população reformada e jovem (PER_REFO e PER_JOV). Recorde-se que estas variáveis foram aplicadas respectivamente nas alternativas autocarro e metro para testar a preferência destas duas camadas em relação a estes modos. Os resultados confirmam a suposição inicial, mostrando que os reformados identificam mais utilidade na alternativa autocarro enquanto os jovens preferem o metro. Para a população sénior, a preferência pelo autocarro deve-se provavelmente à maior facilidade de acesso, uma vez que a rede é muito mais extensa e elástica, requerendo menos deslocação até uma paragem para embarque, e o facto de as paragens serem niveladas na rua, enquanto as estações de metro envolvem sempre várias mudanças de nível. Para a população jovem o metro é mais atraente pela rapidez, a alta frequência e a confiança no serviço e também pela facilidade de uso do sistema.

A análise dos resultados dos atributos feita anteriormente é indispensável para entender as preferências dos utilizadores e quais os critérios mais importantes para a decisão, assim como em que sentido cada critério influencia cada modo de transporte, isto é, se lhe confere utilidade ou o contrário. No entanto, esses valores não são muito bons a ilustrar as preferências dos utilizadores de uma forma, diga-se, palpável, através de uma medida que seja natural e inteligível tanto para um investigador de engenharia de transportes como um qualquer leigo no assunto. Para esse efeito são calculados frequentemente *trade-offs* entre os vários atributos do modelo de forma a relacioná-los entre si, tomando uma unidade como referência, normalmente o tempo (minuto), conseguindo-se assim uma comparação numa escala facilmente tangível. Calcularam-se para o nosso modelo vários *trade-offs*, que se apresentam no Quadro 4.8.

Quadro 4.8 - *Trade-offs* calculados entre alguns atributos do modelo

<i>Trade-off</i>	Atributos	Unidades	Valor obtido
Penalização do transbordo numa viagem de autocarro	TRA_BUS/TE_BUS	min./trans.	29,51
Penalização do transbordo numa viagem de metro	TRA_MET/TE_MET	min./ trans.	2,05
Relação de penalização entre o transbordo em autocarro e em metro	TRA_BUS/TRA_MET	trans. Met/trans. Bus	4,17
Efeito de uma alternativa de viagem em autocarro no tempo a bordo	CO_BUS/TE_BUS	min/nº comb.	-9,65
Efeito de uma alternativa de viagem em metro no tempo a bordo	CO_MET/TE_MET	min/nº comb.	-3,68
Efeito de uma alternativa de viagem em combinação no tempo a bordo de autocarro	CO_CO/TE_BUS	min/nº comb.	-11,91
Efeito de uma alternativa de viagem em combinação no tempo a bordo de metro	CO_CO/TE_MET	min/nº comb.	-3,46
Penalização do tempo de deslocação a pé num transbordo entre autocarros	PE_BUS/TE_BUS	min. Bus/min. Pé	4,70

Começou-se por analisar a percepção dos utilizadores em relação ao transbordo nas viagens de autocarro e de metro em relação ao tempo a bordo dos respectivos modos. Sendo estas duas variáveis de sinal negativo, sabemos que esse efeito é prejudicial à utilidade, logo este *trade-off* representa uma penalização. Observa-se que essa penalização é muito maior para a alternativa autocarro, em que um transbordo é percebido em média pelos utilizadores como se despendessem mais 29,5 minutos de viagem a bordo de um autocarro. Quanto à alternativa metro, o mesmo *trade-off* resulta numa percepção de que um transbordo equivale a 2 minutos de viagem a bordo de um metro.

Este resultado é altamente ilustrador das conclusões que já foram retiradas atrás, mostrando uma muito maior preferência pelas características da alternativa metro, que se apresenta muito mais confortável e capaz de garantir qualidade de serviço mais consistentemente do que o autocarro, resultando em que o tempo de transbordo seja sobrevalorizado em relação ao tempo real para o autocarro e subvalorizado para o metro. Podemos comparar, no Quadro 4.9, os resultados obtidos com os valores apresentados nos estudos de Pursula e Weurlander (1999) e Raveau e Guo (2012), que realizaram o mesmo *trade-off* de transbordos por tempo de viagem a bordo do veículo.

Quadro 4.9 - Comparação do valor obtido para o *trade-off* do transbordo pelo tempo a bordo com outros estudos

Atributos	Valor obtido	Pursula e Weurlander (1999)	Raveau e Guo (2012) Londres	Santiago
TRA_BUS/TE_BUS	29,51	8,85	-	-
TRA_MET/TE_MET	2,05		7,7	11,3

Os valores conseguidos pelos outros investigadores estão numa gama baixa, entre 7,7 e 11,3 minutos. No caso do trabalho de Pursula e Weurlander, o modelo por eles definido incluía autocarros e comboios indiscriminadamente, e Raveau e Guo estudaram apenas o sistema de metro de Santiago e Londres, pelo que não podemos fazer uma comparação directa da diferença de valores entre as duas alternativas de transporte. No entanto o valor que se obteve para o metro é bem pequeno e inferior aos obtidos por Raveau e Guo e também inferior à penalização global dada ao transbordo por Pursula e Weurlander. Assim, a comparação de resultados indica que os utilizadores do metro de Lisboa são, segundo todos estes modelos, os mais dispostos a efectuar um transbordo de metro. Como sempre estas comparações têm de ser vistas com reservas pois os estudos são bastante diferentes tanto nas abordagens, nos dados em que se baseiam e nas redes de transportes que estudam.

Ainda sobre a percepção acerca do transbordo entre as alternativas autocarro e metro, calculou-se o *trade-off* entre os dois obtendo-se uma relação de 4,17 unidades, ou seja, o

modelo mostra que os utilizadores consideram que fazer 4 transbordos no metro causa o mesmo incómodo que apenas 1 transbordo numa viagem de autocarro.

De seguida passou-se para a análise que o efeito do número de alternativas disponíveis em cada par O/D para viajar em cada alternativa causa na percepção do tempo de viagem a bordo. Podemos dividir os quatro *trade-offs* que se calcularam em dois grupos, o primeiro para as alternativas autocarro e metro, e o segundo em que se estuda o efeito das alternativas de combinação no tempo de viagem a bordo do autocarro e do metro.

No primeiro grupo temos que o aumento de 1 combinação de viagem em autocarro para um par O/D representa em média uma diminuição do tempo de viagem a bordo do autocarro em 9,65 minutos. Já para o metro, o mesmo procedimento representa apenas uma diminuição do tempo de viagem a bordo de 3,68 minutos. No segundo grupo vemos que o aumento de uma combinação possível de viagem na alternativa combinação representa uma diminuição do tempo de viagem a bordo de 11,91 minutos em autocarro e de 3,46 minutos em metro. Isto significa que o aumento de oferta é importante para os utilizadores, especialmente quando se deslocam de autocarro.

Mais uma vez as vantagens do metro ajudam a explicar a diferença na percepção, que é mais importante no autocarro que não é tão fiável nem directo e apresenta um ambiente de transbordo de qualidade muito inferior e mais demorado, mas também o facto de a rede de metro ser bem definida e as linhas estarem ligadas em vários pontos faz com que o aumento de opções não seja tão significativa. Para a alternativa combinação a diminuição do tempo de viagem em autocarro é maior devido ao atributo combinação de percursos possíveis (CO_CO) ser uma variável *proxy* para a frequência de serviço, que é mais significativa para os utilizadores de autocarro que têm de fazer transbordo entre modos. Este é um *trade-off* que não conseguimos analisar comparativamente com outros trabalhos porque a variável de combinações possíveis não é usada em nenhum outro estudo, sendo utilizados noutros estudos atributos como a frequência de carreiras ou o tempo de espera para embarcar, ou deixando a constante específica de alternativa capturar essa utilidade.

Por fim analisou-se o *trade-off* entre o tempo de deslocação a pé no transbordo entre autocarros e o tempo a bordo do autocarro. O resultado indica que os utilizadores consideram que um minuto de deslocação a pé para fazer o transbordo entre autocarros equivalente a 4,7 minutos a bordo do autocarro. No Quadro 4.10 temos uma comparação dos valores deste *trade-off* com outros estudos:

Quadro 4.10 - Comparação do valor obtido para o *trade-off* do tempo de deslocação a pé pelo tempo a bordo, para o autocarro, com outros estudos

Atributos	Valor obtido	Pursula e Weurlander	Raveau e Guo (2012)	
		(1999)	Londres	Santiago
PE_BUS/TE_BUS	4,70	2,05 ⁽²⁾	1,15 ⁽¹⁾	1,62 ⁽¹⁾

Os valores são inferiores para Raveau e Guo mas é preciso notar que eles foram calculados para o tempo a pé no transbordo em sistema de metro⁽¹⁾, logo é normal o menor valor pois as distâncias serão em princípio menores e feitas com maior conforto. No estudo de Pursula e Weurlander o valor já é mais próximo do que foi por nós obtido, mas ainda menos de metade, mas esse valor foi calculado como um valor global para o sistema de autocarro e comboios⁽²⁾. No geral os valores apresentam a mesma ordem de grandeza.

Este último *trade-off* é óptimo para clarificar a essência destas medidas, uma vez que se comparam atributos com a mesma unidade, minutos, e é óbvio que um minuto a pé tem a mesma duração do que um minuto a bordo do autocarro. Assim, a questão dos *trade-offs* num modelo baseado no princípio da utilidade estocástica é que estes representam de facto a percepção e a preferência dos utilizadores, e não uma qualquer medida objectiva das viagens e das características do sistema de transportes. E por isso os mesmos *trade-offs* têm valores diferentes para os diferentes modos, uma vez que a utilidade de cada um deles é diferente para cada utilizador.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos para o modelo Logit Multinomial estimado nesta dissertação indicam que os critérios considerados mais importantes na escolha de caminhos no sistema de TC da cidade de Lisboa são o número de combinações possíveis em cada modo de transporte, o número de transbordos (especialmente para o autocarro), o tempo de deslocação a pé nos transbordos (especialmente para o autocarro), o tempo de viagem a bordo (especialmente para o metro), e o coeficiente de variação do tempo de viagem a bordo. Isto indica que o tempo de viagem, a necessidade de realizar transbordo e a existência de várias carreiras e com alta frequência de serviço tornam um caminho mais atraente e determinam a escolha dos utilizadores.

O modelo final estimado com base nos dados da bilhética dos transportes de Lisboa não apresenta um valor de pseudo- R^2 muito alto mas fica a par de outros modelos Logit estimados no mesmo âmbito, e além disso o valor obtido para a percentagem de respostas correctamente previstas é muito alta, indicando que o modelo está correctamente formulado mas que os critérios utilizados têm de ser repensados e adicionados outros para se conseguir um ajuste estatístico melhor. O valor de acertos é muito alto para o metro, na ordem de 90%, mas inferior para o autocarro e combinação dos dois modos indicando que a modelação da utilidade dos caminhos realizados em autocarro precisa de ser ajustada, mesmo contando com mais atributos que o metro o resultado fica aquém.

A análise dos resultados mostrou ainda que os transbordos em autocarro são muito indesejados pelos utilizadores, ao contrário dos transbordos no metro onde esse resultado não é tão significativo. Esta evidência impõe repensar a forma como os transbordos são efectuados no serviço da Carris. As carreiras, nos pares O/D mais utilizados, devem ser mais integradas em termos de paragens e principalmente em termos de frequência e horários, e quando possível e justificável o percurso deve ser feito por uma carreira directa. O próprio ambiente de transbordo talvez precise de ser alterado pois ele é claramente percebido pelos utilizadores como desconfortável e a evitar.

Já o Metropolitano de Lisboa é, segundo os resultados do modelo, mais confortável e confiável, sendo preferido pelos utilizadores, que preferem as características do serviço oferecido por este meio de transporte. O resultado positivo que se obteve para o critério da proporção de viagem em metro permite concluir que o uso deste torna uma viagem intermodal mais atraente. A operação da rede de metro é apenas reprovada pelos utilizadores quando o tempo de viagem a bordo é maior do que o esperado, pelo que deve haver a preocupação em manter um sólido serviço de carreiras, sem falhas e com rapidez.

A generalidade dos resultados obtidos estão em linha com os estudos efectuados anteriormente na área, onde se encontram resultados semelhantes para os critérios de escolha mais importantes e as respectivas escalas de significância estatística. Algumas diferenças encontram-se nos valores obtidos para alguns *trade-offs*, especialmente em relação aos de transbordo, que normalmente apresentam valores mais modestos noutros estudos do que o que se obteve para o transbordo no autocarro.

Esta variação nos resultados entre este estudo e o de outros autores, e a própria variação dentro dos resultados de outros estudos, aponta para uma necessidade de uma análise cuidada dos estudos feitos noutros locais e reservas na transposição das conclusões obtidas nesses estudos para a realidade dos sistemas de transportes Portugueses. De facto a forma como as pessoas utilizam um sistema de TC e as suas preferências na escolha de caminhos e modos variam com a cultura local, os hábitos, a condição socioeconómica, as condições da infraestrutura e com a própria condição do individuo, variando com a idade, género e outros factores.

Percebe-se então a importância destes estudos para uma melhor gestão da rede e da oferta e um correcto planeamento para o futuro. Os modernos sistemas de bilhética sem contacto representam aqui uma oportunidade única de melhoramento dos sistemas de transportes ao mesmo tempo que abrem portas para estudos e uma monitorização da rede e do serviço que permitem aspirar a um constante melhoramento e maior atractividade dos TC, tornando mais fácil a construção de cidades e sociedades mais sustentáveis e saudáveis.

Mas os sistemas de bilhética têm também eles próprios espaço para melhorar e evoluir. É importante que a sua implementação seja feita considerando todas estas aplicações de forma a se conseguir uma recolha de informação o mais correcta e completa possível. Para o sistema de Lisboa uma clara falha é o facto de em grande parte das viagens só se efectuar a validação de entrada, ficando os dados incompletos quanto à duração da viagem e ao destino. Este problema pode ser resolvido por algoritmos como o criado pelos Professores José Viegas e Luis Martinez (Viegas, 2012) mas este tipo de soluções não deveriam ser necessárias num sistema ideal. Os estudos mais recentes apontam, no caso dos autocarros, para soluções de controlo automático da presença do cartão a bordo do veículo para efectuar o controlo de saída do utilizador, outros apontam para dispositivos nas saídas dos autocarros para passar o cartão no fim da viagem.

As bases de dados destes sistemas são muito ricas e representam uma possibilidade de entendimento preciso da rede e seus utilizadores em qualquer quadro temporal, mas elas não são de facto completas nem podem ser. Há outros factores muito importantes para o estudo da escolha de caminhos como o motivo de viagem, a idade de cada utilizador e a sua condição socioeconómica, informação acerca da posse de veículo individual e da origem da viagem (casa), a possibilidade de assento, a percepção da rede e das distâncias reais versus distâncias esquematizadas, etc. Conclui-se que, como alguns estudos feitos há mais de uma década, uma

abordagem mais rica para a estimação de um modelo desta natureza pode ser conseguida pela combinação de dados de PR (os obtidos pelo sistema de bilhética) com dados de PD obtidos por inquéritos, que possibilite a utilização de outros atributos, além dos atributos instrumentais usados neste estudo e das variáveis socioeconómicas derivadas dos dados dos Censos e que conduza a um modelo mais preciso e abrangente.

Trabalhos futuros

Os dados do sistema de bilhética sem contacto de Lisboa podem ser usados para várias aplicações, sendo esta dissertação apenas uma simples aplicação de modelação. Nesse aspecto, o modelo ainda tem muito espaço para crescer, é possível e desejável a formulação de um modelo mais exacto a partir dos dados e várias hipóteses podem ser testadas como por exemplo o uso de um Nested Logit separando as viagens feitas apenas em metro num ramo e as várias combinações de modos que incluam autocarro noutra ramo.

Quanto aos atributos do modelo, seria interessante conseguir incorporar mais factores como *headways* nas carreiras da Carris, variáveis de atitude e características dos utilizadores como idade, género e nível de instrução, entre outras já descritas atrás. Para isso, seria essencial a combinação dos dados já trabalhados com dados de inquéritos de PR e PD para suprir as lacunas de informação nesses campos, construindo-se um modelo misto.

Já em relação aos dados, seria interessante explorar uma forma de aplicar o modelo a toda a extensão da rede de TC da área da Grande Lisboa e os vários operadores aderentes do sistema de bilhética sem contacto. E a partir daí seria também interessante uma modelação apenas para as zonas periféricas, fora da cidade de Lisboa, para comparar os hábitos de mobilidade e as preferências dentro e fora da cidade. Derivado disso, e com o objectivo de estudar uma solução de tarifas flexíveis por horário, é também importante uma iniciativa de modelação diferenciada por horários, fora da hora de ponta, para perceber melhor as diferenças no uso do sistema e nas preferências desses utilizadores. Outro problema que não foi considerado nesta dissertação é o estudo do comportamento dos utilizadores não habituais, os que utilizam cartões Viva Viagem recarregáveis e como se compara com os utilizadores habituais e conhecedores da rede.

Mais distante do que foi feito nesta dissertação, pode ser estudado também através dos dados de bilhética e de inquéritos a influência que a informação em tempo real do estado da rede tem nas escolhas de caminhos dos utilizadores. Se os utilizadores tiverem conhecimento das vias congestionadas na plataforma de embarque em tempo real, influenciará isso a sua escolha de carreira? De que forma?

Actualmente são comuns as aplicações móveis dos operadores de transporte, com os diagramas de rede, paragens, carreiras e horários e por vezes um assistente de definição de

rota óptima para um par O/D. A CP, Metro e Carris tem essas aplicações disponíveis para os principais sistemas operativos móveis, mas eles foram programados com base em modelos matemáticos simples de minimização de função objectivo, para obtenção de mínimo tempo de viagem ou distância. É possível melhorar estas aplicações com a integração destes modelos de escolhas de caminhos estimados a partir dos dados da rede, e mais importante que isso, é possível adicionar uma funcionalidade inexistente, a criação de perfis de utilizador que permita a cada pessoa a definição dos critérios mais importantes para a escolha de caminhos. Por exemplo, uma pessoa pode querer evitar ao máximo deslocar-se de autocarro, enquanto outra, como um utilizador mais velho ou com mobilidade reduzida, pode só o poder fazer de autocarro. Um utilizador pode ser completamente avesso à realização de transbordos enquanto outro não se importa de os fazer se com isso diminuir o tempo total de viagem. A definição do perfil de utilizador permitiria à aplicação apresentar a solução óptima para cada indivíduo.

Ainda nas aplicações móveis, novos desenvolvimentos de tecnologia permitem tornar o telemóvel num meio de validação, um passe diga-se. Esta funcionalidade poderia também estar integrada na aplicação móvel, com valências de carregamento e de definição de mais informação pessoal. Outro campo é a partilha de informação das condições da rede, de tráfego por exemplo, para a aplicação permitindo ao utilizador e à aplicação ligada à internet um conhecimento em tempo real permitindo um ajuste dos resultados.

6 BIBLIOGRAFIA

- McDonald, Noreen, (2000) *"Multipurpose Smart Cards in Transportation: Benefits and Barriers to Use"*, University of California Transportation Center, University of California
- Blythe, Philip T. (2004) *"Improving Public Transport Ticketing Through Smart Cards"*, Proceedings of the ICE - Municipal Engineer Vol. 157, Edi. 1, pp. 47-54
- Pelletier, Marie-Pier, Trépanier, M. e Morency, C. (2009) *"Smart Card Data in Public Transit Planning: A Review"*, Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks, Logistics and Transportation (CIRRELT)
- Ma, Xiao-lei, Wang, Y., Chen, F. e Jian-feng, L. (2012) *"Transit smart card data mining for passenger origin information extraction"*, Journal of Zhejiang University-SCIENCE C, Vol. 13, Edi. 10, pp. 750-760
- Lam, Soi-Hoi e Xie, Feng (2002) *"Transit Path-Choice Models That Use Revealed Preference and Stated Preference Data"*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1799, Edi. 1, pp. 58-65
- Bouman, Paul, Milan, L., Li, T., Hurk, E., Kroon, L. e Vervest, P. (2012) *"Recognizing Demand Patterns from Smart Card Data for Agent-Based Micro-simulation of Public Transport"*, BNAIC 2012 The 24th Benelux Conference on Artificial Intelligence
- Li, Man, Du, B., Huang, J. e Zhu, T. (2012) *"Public Transport Smart Card Data Analysis and Passenger Flow Distribution"*, CICTP 2012@ sMultimodal Transportation Systems - Convenient, Safe, Cost-Effective, Efficient. ASCE
- Train, K. E., (2002) *"Discrete Choice Methods with Simulation"*, Cambridge University Press
- Ben-Akiva, M. E. e Lerman, S. R., (1985) *"Discrete choice analysis: theory and application to travel demand"*, MIT Press, Cambridge, Mass.
- Domencich, T. e McFadden, D., (1975) *"Urban Travel Demand - A Behavioural Analysis"*, No. Monograph
- Ciarlini, Marina (2008) *"Discrete-Choice Models and Their Application to Air Transportation (Modelos de Escolha Discreta e sua Aplicação ao Transporte Aéreo)(Portuguese)"* Review of Transportation Literature, Vol. 2, Edi. 2, pp. 42-65
- Hochmair, Hartwig (2009) *"The Influence of map design on route choice from public transportation maps in urban areas"* The Cartographic Journal, Vol. 46, Edi. 3 pp. 242-256.
- Pursula, Matti, e Minna Weurlander (1999) *"Modeling level-of-service factors in public transportation route choice"* Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1669, Edi. 1, pp. 30-37.

- Gonçalves, Jorge (2012) “Fatores relevantes para a escolha modal em áreas urbanas”, Tese para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior, Covilhã
- Chiu, Dickson, Lee, O., Leung, H., Au, E. e Wong, M. (2005) "A multi-modal agent based mobile route advisory system for public transport network" Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'05). IEEE
- Daamen, Winnie, Bovy, P., Hoogendoorn, S. e Reijt, A. (2005) "Passenger route choice concerning level changes in railway stations" Transportation Research Board-84th Annual Meeting, Washington, DC Transportation Research Board of the National Academies
- Bovy, Piet e Hoogendoorn-Lanser, S. (2005) "Modelling route choice behaviour in multi-modal transport networks" Transportation, Vol. 32, Edi. 4, pp. 341-368
- Heye, Corinna e Timpf, S. (2003) "Factors influencing the physical complexity of routes in public transportation networks" Electronic proceedings of the 10th international conference on travel behaviour research
- Brownstone, David, Bunch, D. e Train, K. (2000) "Joint mixed logit models of stated and revealed preferences for alternative-fuel vehicles" Transportation Research Part B: Methodological, vol. 34, Edi. 5 ,pp. 315-338.
- Wikipedia (A)@ (2013). http://en.wikipedia.org/wiki/Smart_card. (página internet da Wikipedia sobre *smart cards*)
- Wikipedia (B)@ (2013). http://en.wikipedia.org/wiki/Automated_fare_collection_system. (página internet da Wikipedia sobre sistemas de bilhética sem contacto)
- Wikipedia (C)@ (2013). http://en.wikipedia.org/wiki/Manual_fare_collection. (página internet da Wikipedia sobre sistemas de cobrança manual de tarifas)
- Wikipedia (D)@ (2013). http://en.wikipedia.org/wiki/Integrated_ticketing. (página internet da Wikipedia sobre bilhética integrada)
- Wikipedia (E)@ (2013). <https://pt.wikipedia.org/wiki/Lisboa>. (página internet na Wikipedia sobre a cidade de Lisboa)
- Wikipedia (F)@ (2013). https://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%81rea_Metropolitana_de_Lisboa (página internet da Wikipedia sobre o Metropolitano de Lisboa)
- Wikipedia (G)@ (2013). [http://en.wikipedia.org/wiki/Upass_\(South_Korea\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Upass_(South_Korea)). (página internet da Wikipedia sobre o cartão *Upass*)
- Wikipedia (H)@ (2013). http://en.wikipedia.org/wiki/Oyster_Card. (página internet da Wikipedia sobre o cartão *Oyster Card*)
- Wikipedia (I)@ (2013). http://en.wikipedia.org/wiki/Octopus_Card. (página internet da Wikipedia sobre o cartão *Octopus Card*)
- Wikipedia (J)@ (2013). <http://en.wikipedia.org/wiki/OV-chipkaart>. (página internet da Wikipedia sobre o cartão *Ov-chipkaart*)
- Oyster Card*@ (2013). <https://oyster.tfl.gov.uk/oyster/entry.do>. (página internet oficial)

- Octopus Card@* (2013). <http://www.octopus.com.hk/home/en/index.html>. (página internet oficial)
- Ov-chipkaart@* (2013). <https://www.ov-chipkaart.nl/>. (página internet oficial)
- OTLIS@ (2013). http://otlis.com.pt/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1. Operadores de Transportes da Região de Lisboa (página internet oficial)
- MetroLisboa@ (2013) <http://www.metrolisboa.pt/>. Metropolitano de Lisboa (página internet oficial)
- MetroLisboa@ (2011). <http://www.metrolisboa.pt/wp-content/uploads/RelatorioeContas2011.pdf>. (página internet do relatório e contas do Metropolitano de Lisboa em 2011)
- Carris@ (2013). <http://www.carris.pt/>. (página internet oficial)
- Carris@ (2012). http://www.carris.pt/fotos/editor2/relatorio_e_contas_2012_site.pdf. (página internet do relatório e contas da Carris em 2012)
- CP@ (2013). <http://www.cp.pt/cp/displayPage.do?vgnextoid=6cadbb8dcb435010VgnVCM1000007b01a8c0RCRD>. (página internet oficial)
- CP@ 2012 http://www.cp.pt/StaticFiles/CP/Imagens/PDF/Institucional/Relatorios%20Financeiros/2012/relatorio_gestao2012.pdf. (página internet do relatório e contas da CP em 2012)
- UCL@ (2013) <http://www.engineering.ucl.ac.uk/blog/projects/oyster-gives-up-pearls/>. (página internet sobre os estudos feitos no UCL sobre o *Oyster Card*)
- Smart Card Alliance, (2011). “*A Guide to Prepaid Cards for Transit Agencies*”, A Smart Card Alliance Transportation Council White Paper
- Viegas, José (2012) “*Caracterização Da Mobilidade Em Transporte Coletivo Público Na Aml E Revisão Do Modelo De Repartição De Receitas Pelos Operadores*”, JOSÉ M. VIEGAS, CONSULTORES, LDA.
- GlobeScan e MRC McLean Hazel, patrocinado pela Siemens (2010) “*Megacity Challenges. A stakeholder perspective*” Siemens AG Corporate Communications (CC), Munich