



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia Civil**

**ISEL**

# **Caracterização do desempenho das redes rodoviárias com base em modelos de afetação de tráfego.**

## **Aplicação à Rede Rodoviária Nacional.**

**Mafalda dos Reis Duarte**  
(Licenciada em Engenharia Civil)

Relatório de Estágio para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na  
Área de Especialização em Vias de Comunicação e Transportes

*(Versão Final)*

**Orientadores:**

Mestre Paulo José de Matos Martins, Professor adjunto (ISEL)

Mestre Isabel Maria Pais de Abreu Filipe da Silveira Botelho, (InIR)

**Júri:**

**Presidente:** Lic. Luísa Maria Ferreira Cardoso Teles Fortes, Professora Adjunta (ISEL)

**Vogais:**

Doutora Carmen de Jesus Geraldo Carvalheira, (ISEL)

Mestre Isabel Maria Pais de Abreu Filipe da Silveira Botelho, (InIR)

Mestre Paulo José de Matos Martins, Professor Adjunto (ISEL)

**Julho de 2013**



## RESUMO

O presente relatório apresenta as atividades desenvolvidas no âmbito do estágio académico para a realização do Trabalho Final de Mestrado, desenvolvido no Instituto de Infraestruturas Rodoviárias, I.P. (InIR), com uma duração de cerca de seis meses.

Os objetivos principais do estágio correspondem à execução de um estudo exploratório para implementação de um modelo de afetação de tráfego em ligação direta com a infraestrutura de dados geográficos do InIR e à realização de um primeiro ensaio da avaliação da eficiência da Rede Rodoviária Nacional para auxiliar o InIR a ponderar o interesse do desenvolvimento deste tipo de modelos na estimação de medidas que possam melhorar a mobilidade rodoviária em Portugal.

Com o recurso ao inventário da infraestrutura rodoviária disponível em formato de base de dados ArcGIS foi feita a exportação da rede rodoviária nacional para o VISUM, através do qual se fez a modelação da rede. Foi também preparada uma matriz O/D de procura, aferida com base em contagens de tráfego fornecidas pelas concessionárias, para prever os fluxos de tráfego e detetar os pontos críticos da rede, onde o nível de serviço pretendido não é, ou não será no futuro, o desejável.

Pretende-se através do aprofundamento do estudo do tema proposto contribuir para o estudo de metodologias que permitam caracterizar o desempenho das redes rodoviárias através da utilização de modelos de afetação de tráfego e matrizes O/D. A utilização de matrizes O/D permite quantificar a procura associada à utilização das redes em cada instante, bem como os respetivos indicadores de serviço, como a saturação, nível de serviço e velocidade média de circulação.

Palavras-chave:

- Planeamento de Transportes	- Matriz O/D
- Afetação de Tráfego	- Capacidade
- Avaliação de Desempenho	- Grau de Saturação



# ABSTRACT

This report presents the activities carried out under the six-month academic traineeship developed at the Instituto de Infraestruturas Rodoviárias, I.P. (InIR) to obtain the master degree in Civil Engineering, in the specialization of Transports.

The main objectives of the traineeship were to produce an exploratory study to implement a traffic assignment model directly linked to the spatial data infrastructure of InIR (through the functionalities of ArcGIS GIS) and the realization of a first test for the evaluation of the efficiency of the National Road Network to assist InIR considering the interest of the development of such models in the estimation of key performance indicators (kpi's) to improve road mobility in Portugal.

With the road infrastructure inventory available through the ArcGIS database, the national road network was exported to VISUM and the network modeled and ran within this tool. A national O/D matrix was also built and calibrated to assess the national daily demand. This was done using traffic counts provided by road concessionaires and the skills of the software Visum. The model allows the prediction of traffic flows and detects the main critical points of the network, where the level of service required is not, or will not be in the future, acceptable.

This work has the intention to deepening the study of the subject proposed and to contribute to the development of methodologies to characterize the performance of the Portuguese national road network. This is proposed through the use of traffic assignment models and the assessment, at national level, of the current and future demand using O/D matrices. The use of the O/D matrices to quantify the demand associated with the network patronage and the respective kpi's, such as saturation, level of service and the average road speeds is also assessed in detail.

Key-words:

- Transport planning	- O/D Matrix
- Traffic Assignment	- Traffic Capacity
- Performance Assessment	- Saturation



## AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho contou com a colaboração, direta ou indireta, de algumas pessoas às quais gostaria de deixar um agradecimento.

Aos meus orientadores Prof. Paulo Matos Martins e Eng.<sup>a</sup> Isabel Botelho pela orientação e incentivo que me demonstraram ao longo do desenvolvimento deste trabalho, pelo tempo e pela disponibilidade que me dedicaram.

Ao Eng.<sup>o</sup> Reis Leitão pela sua constante partilha de conhecimentos, pelo seu tempo, motivação e incentivo demonstrado.

Ao Eng.<sup>o</sup> Rui Luso Soares pela sua disponibilidade, pela documentação fornecida e pelos esclarecimentos prestados.

A toda a equipa do InIR que me acolheu com tanta simpatia e disponibilidade. O meu muito obrigado.

À Eng.<sup>a</sup> Inês Teles, à Eng.<sup>a</sup> Ana Maciel e ao Eng.<sup>o</sup> Miguel Gaspar, pela ajuda, disponibilidade, partilha de conhecimentos, incentivo e esclarecimentos prestados.

Às minhas colegas Vidhia Govan, Eunice Silva e Inês Soares pelo apoio, ajuda, motivação e incentivo.

Aos meus colegas de mestrado pela alegre convivência e pelo ambiente de descontração proporcionado durante a realização deste trabalho.

A todos os meus amigos pelo grande apoio, incentivo incondicional e compreensão pelos momentos em que não estive presente.

À minha família pelo apoio e incentivo que sempre demonstraram.

Ao Marco Marques pelo apoio, incentivo e compreensão ao longo desta etapa.

Aos meus pais e à minha irmã pelo incentivo ao longo destes anos, pelo amor, alegria e compreensão.





# ÍNDICE

<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE QUADROS .....</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE EQUAÇÕES.....</b>	<b>XIII</b>
<b>GLOSSÁRIO E ABREVIATURAS .....</b>	<b>XV</b>
<b>PREÂMBULO .....</b>	<b>XVII</b>
<b>AGRADECIMENTO INSTITUCIONAL.....</b>	<b>XIX</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Caracterização da entidade InIR, IP .....	2
1.3 Apresentação do Tema .....	3
1.4 Objetivos .....	5
1.5 Estrutura.....	6
<b>2. MODELOS DE TRANSPORTES: ALGUMAS REFLEXÕES.....</b>	<b>9</b>
2.1 Conceitos de Mobilidade e Acessibilidade.....	9
2.2 Modelos de Planeamento .....	15
2.2.1 Definição de modelo.....	15
2.2.2 Modelos no sector dos transportes .....	16
2.2.3 Modelação de Transportes.....	17
2.3 O Modelo dos Quatro Passos .....	20
2.3.1 Modelos de geração/atração de viagens .....	25
2.3.2 Modelos de distribuição de viagens .....	30
2.3.3 Modelos de repartição modal.....	34
2.3.4 Modelos de afetação de tráfego.....	37
2.4 Súmula do capítulo.....	41
<b>3. CONSTRUÇÃO DE UM MODELO DE ANÁLISE .....</b>	<b>43</b>
3.1 Introdução .....	43
3.2 Ferramenta de análise - VISUM.....	44
3.2.1 Noções fundamentais associadas ao Zonamento .....	46
3.2.2 Elementos da Rede .....	47
3.3 Caracterização da rede .....	50
3.4 Custos do congestionamento e atrasos .....	52
3.4.1 Custo do tempo perdido .....	54

3.4.2	Valor do Tempo (VDT) .....	58
3.4.3	Custo de Operação de Veículos .....	59
<b>3.5</b>	<b>Capacidades e Níveis de Serviço.....</b>	<b>61</b>
3.5.1	Capacidade.....	61
3.5.2	Nível de Serviço .....	62
<b>3.6</b>	<b>Contagens de tráfego.....</b>	<b>70</b>
<b>3.7</b>	<b>Valores da impedância.....</b>	<b>70</b>
<b>3.8</b>	<b>Especificidades da afetação no VISUM.....</b>	<b>71</b>
3.8.1	Parâmetros do modelo de equilíbrio .....	72
3.8.2	“TFlowFuzzy” .....	74
<b>3.9</b>	<b>Súmula do capítulo.....</b>	<b>78</b>
<b>4.</b>	<b>ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>79</b>
<b>4.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>79</b>
<b>4.2</b>	<b>Implementação.....</b>	<b>83</b>
4.2.1	Contagens de tráfego .....	83
4.2.2	Valor do Tempo .....	85
4.2.3	Custos de operação .....	86
4.2.4	Definição inicial da matriz O/D .....	88
4.2.5	Estimação da matriz O/D com base na metodologia “TFlowFuzzy” .....	90
4.2.6	Resultados síntese do processo de ajustamento da matriz O/D .....	94
4.2.7	Cálculo dos Níveis de Serviço.....	96
<b>4.3</b>	<b>Análise de resultados.....</b>	<b>97</b>
4.3.1	Resultados para o cenário otimista – crescimento do tráfego a 1% ao ano.....	97
4.3.2	Resultados para o cenário muito otimista – crescimento do tráfego a 2% ao ano .....	100
4.3.3	Resultados para o cenário pessimista – diminuição do tráfego a 1% ao ano .....	104
4.3.4	Comparação entre os vários cenários.....	107
4.3.5	Comparação entre a situação atual e o cenário muito otimista .....	107
<b>4.4</b>	<b>Síntese das dificuldades de implementação do modelo.....</b>	<b>112</b>
<b>4.5</b>	<b>Súmula do capítulo.....</b>	<b>117</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS.....</b>	<b>119</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>119</b>
<b>5.2</b>	<b>Perspetivas Futuras .....</b>	<b>121</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>123</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura orgânica do InIR .....	3
Figura 2: Representação esquemática de uma rede de transportes .....	18
Figura 3: Modelos dos Quatro Passos .....	21
Figura 4: Estrutura do modelo dos Quatro Passos.....	23
Figura 5: Distribuição da taxa de viagem por tipo de família .....	30
Figura 6: Diagrama Fundamental da Engenharia de Tráfego.....	40
Figura 7: Estrutura de funcionamento do VISUM.....	45
Figura 8: Janela de identificação de zona no VISUM.....	47
Figura 9: Janela de identificação dos nós no VISUM – nó 6549 .....	48
Figura 10: Janela de identificação do arco no VISUM.....	49
Figura 11: Janela de identificação do conector no VISUM.....	50
Figura 12: Modelação de interseções .....	51
Figura 13: Internalização eficiente do congestionamento.....	53
Figura 14: Curva Fluxo Velocidade do HCM .....	55
Figura 15: Nível de Serviço A .....	63
Figura 16: Nível de Serviço B .....	63
Figura 17: Nível de Serviço C .....	63
Figura 18: Nível de Serviço D .....	64
Figura 19: Nível de Serviço E .....	64
Figura 20: Nível de Serviço F.....	65
Figura 21: Gráfico para determinar o valor da velocidade média (S).....	69
Figura 22: Parâmetros do método de equilíbrio .....	72
Figura 23: Parâmetros de modelação da curva fluxo-velocidade .....	73
Figura 24: Parâmetros de impedância .....	74
Figura 25: Processo de calibração do “TFlowFuzzy”.....	75
Figura 26: Processo iterativo da metodologia “TFlowFuzzy” .....	76
Figura 27: Parâmetros do "TFlowFuzzy" .....	77
Figura 28: Operações efetuadas na afetação .....	77
Figura 29: Rede Rodoviária Nacional .....	80
Figura 30: Zonamento ao concelho.....	81
Figura 31: Rede Transeuropeia .....	82
Figura 32: Gráfico da validação das contagens de tráfego (inicial) .....	95
Figura 33: Gráfico da validação das contagens de tráfego (final).....	96

Figura 34: Extensão de vias classificadas em cada nível de serviço, no cenário otimista	98
Figura 35: Percentagens da extensão de vias de cada nível de serviço, no cenário otimista.....	98
Figura 36: Mapa de saturação da rede no cenário otimista .....	99
Figura 37: Mapa de velocidade corrente no cenário otimista.....	100
Figura 38: Extensão de vias classificadas em cada nível de serviço, no cenário muito otimista.....	101
Figura 39: Percentagens da extensão de vias de cada nível de serviço, no cenário muito otimista.....	101
Figura 40: Mapa de saturação da rede no cenário muito otimista.....	102
Figura 41: Mapa de velocidade corrente no cenário muito otimista .....	103
Figura 42: Extensão de vias classificadas em cada nível de serviço, no cenário pessimista .....	104
Figura 43: Percentagens da extensão de vias de cada nível de serviço, no cenário pessimista .....	104
Figura 44: Mapa de saturação da rede no cenário pessimista.....	105
Figura 45: Mapa de velocidade corrente no cenário pessimista .....	106
Figura 46: Gráfico de barras com a extensão de cada nível de serviço nos três cenários .....	107
Figura 47: Gráfico de barras com a extensão de cada nível de serviço.....	108
Figura 48: Nível de serviço no cenário base – situação atual .....	109
Figura 49: Nível de serviço previsto para o ano horizonte do cenário muito otimista (+2%) .....	110
Figura 50: Identificação dos troços da rede que passam para o nível F .....	111
Figura 51: Modelo de Rede no VISUM .....	112
Figura 52: Modelo de Rede no ArcGIS.....	112
Figura 53: Erros no VISUM .....	113
Figura 54: Exemplo das correções efetuadas.....	114
Figura 55: Rede afetada por uma “matriz de 10” .....	115
Figura 56: Exemplo de um sublanço .....	116

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1: Configuração tipo de uma matriz O/D .....	25
Quadro 2: Taxas de Geração de Viagens para diferentes tipos de ocupação do solo (Viagens/1.000m <sup>2</sup> ) .....	28
Quadro 3: A forma geral de uma matriz de viagem bidimensional .....	31
Quadro 4: Exemplo de uma matriz O/D atual.....	32
Quadro 5: Cálculo do fator de crescimento da matriz O/D .....	32
Quadro 6: Relação velocidade/algoritmos.....	38
Quadro 7: Tipologia de caracterização dos arcos na rede .....	52
Quadro 8: Valor do tempo estimado para Portugal em PETS em euros por hora .....	58
Quadro 9: Valor do tempo para veículos ligeiros e pesados (€/hora).....	59
Quadro 10: Valores dos vários parâmetros monetários relativamente aos vários modos de transporte .....	60
Quadro 11: Valor adotado para a velocidade base e capacidade por cada tipo de via.....	62
Quadro 12: Fator de ajustamento para o efeito da largura das vias ( $f_{LW}$ ) .....	66
Quadro 13: Fator de ajustamento para o efeito da desobstrução lateral direita ( $f_{LC}$ ) .....	66
Quadro 14: Fator de ajustamento para o número de vias em zonas urbanas e suburbanas ( $f_N$ ) .....	66
Quadro 15: Fator de ajustamento por efeito da densidade de pontos de convergência ( $f_{ID}$ ) .....	67
Quadro 16: Fator de conversão em veículos ligeiros equivalentes de camiões .....	68
Quadro 17: Nível de Serviço (HCM).....	69
Quadro 18: Exemplo de contagem de tráfego do sublanço Alverca (A1/A9) - V. F. Xira II, 2010 .....	84
Quadro 19: Exemplo de conversão do tráfego para unidade de veículo ligeiro equivalente (u.v.e.), 2010 .....	85
Quadro 20: Cálculo do Valor do Tempo.....	85
Quadro 21: Cálculo dos custos de operação .....	86
Quadro 22: TMDA nas várias classes de portagem .....	87
Quadro 23: Tarifas por classes de portagens (Ligeiros e Pesados) .....	87
Quadro 24: Extrato da Matriz O/D base .....	89
Quadro 25: Extrato da Matriz O/D majorada .....	90
Quadro 26: Exemplo de validação inicial dos valores das contagens .....	91
Quadro 27: Exemplo de validação final dos valores das contagens.....	91

Quadro 28: Calibração dos arcos (links) com volumes muito baixos .....	92
Quadro 29: Controlo da matriz inicial com a matriz do "TFlowFuzzy" .....	92
Quadro 30: Limites do intervalo de variação.....	93
Quadro 31: Matrizes controladas.....	94
Quadro 32: Extrato da matriz O/D final.....	94
Quadro 33: Cálculo do nível de serviço .....	96

## ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1: Método dos Fatores de Crescimento - fórmula geral.....	26
Equação 2: Método dos Fatores de Crescimento – estimação de $F_i$ .....	27
Equação 3: Modelo de regressão linear múltipla.....	27
Equação 4: Modelo de classificação cruzada - número total de viagens para cada categoria.....	29
Equação 5: Modelos dos Fatores de Crescimento.....	31
Equação 6: Equação clássica do Modelo Gravitacional.....	33
Equação 7: Modelo de Regressão Linear.....	35
Equação 8: Funções de Utilidade.....	36
Equação 9: Modelo Logit Multinomial.....	36
Equação 10: Modelo Logit Binário ou Binomial.....	37
Equação 11: Fórmula do BPR.....	54
Equação 12: Custo total.....	56
Equação 13: Custo médio.....	56
Equação 14: Custos marginais privados.....	56
Equação 15: Custo marginal do congestionamento.....	57
Equação 16: Custo marginal do congestionamento.....	57
Equação 17: Custo marginal não privado.....	57
Equação 18: Custo marginal não privado.....	57
Equação 19: Custos dos combustíveis.....	60
Equação 20: Custos de todos os outros recursos.....	60
Equação 21: Custo operacional.....	60
Equação 22: Velocidade de Regime Livre.....	65
Equação 23: Fluxo horário de cálculo.....	67
Equação 24: Fator de ajustamento para veículos pesados.....	68
Equação 25: Densidade (veic/km).....	69
Equação 26: Cálculo do tráfego médio diário dos veículos ligeiros.....	83
Equação 27: Cálculo do tráfego médio diário dos veículos pesados.....	84
Equação 28: Cálculo da Tarifa média.....	88





## GLOSSÁRIO E ABREVIATURAS

**AE** – Autoestrada

**EM** – Estrada Municipal

**EN** – Estrada Nacional

**ER** – Estrada Regional

**IC** – Itinerário Complementar

**IP** – Itinerário Principal

**PRN 2000** – Plano Rodoviário Nacional 2000

**RTE** – Rede Transeuropeia de Transportes Rodoviários

**RRN** – Rede Rodoviária Nacional

**TC** – Transporte Coletivo

**TI** – Transporte Individual

**TP** – Transporte Público

**NUTS III** – Sub-região estatística de nível III em que se divide o território Português

**fVisum** – fator utilizado pelo VISUM

**LGV** – Light Goods Vehicles (veículos de mercadorias até 3,5 toneladas)

**OGV1** – Other Goods Vehicles (veículos com mais de 3,5 toneladas e com 2 ou 3 eixos)

**OGV2** – Other Goods Vehicles (veículos com mais de 3,5 toneladas e com 4 ou mais eixos)

**PSV** – Public Service Vehicles (veículo de serviço público, com 3,5 toneladas ou mais)

**TMDA** – Tráfego Médio Diário Anual

**u.v.e.** – unidade de veículos ligeiros equivalente

**VDT** – Valor do Tempo

**€/l** – Euro por litro

**€/veic.km** – Euro por veículo x quilómetro

**EP** – Estradas de Portugal, SA

**InIR** – Instituto de Infra-estruturas Rodoviárias, IP

**PETS** – Pricing European Transport System

**UE** – União Europeia

**VISUM** – Programa de modelação macroscópica de tráfego

**BPR** – Bureau of Public Roads dos Estados Unidos da América

## **PREÂMBULO**

O presente documento corresponde ao relatório do Estágio Final de Mestrado em Engenharia Civil, realizado no Instituto de Infraestruturas Rodoviárias, I.P. (InIR).

O estágio centrou-se no desenvolvimento de um estudo exploratório de implementação de um modelo de afetação de tráfego para a Rede Rodoviária Nacional atual e variantes futuras.

O trabalho foi desenvolvido com o acompanhamento da Direção de Planeamento visto ser da sua competência, em colaboração com o Conselho Diretivo do InIR, pronunciar-se sobre as estratégias de desenvolvimento e evolução da rede rodoviária nacional, de ligação com outras redes e de articulação com os restantes meios de transportes bem como sobre a definição do Plano Rodoviário Nacional e sobre as alterações ao mesmo, garantindo a sua unidade, coerência e sustentabilidade. Assegurando, assim, a sua articulação com os restantes instrumentos de ordenamento e planeamento de âmbito nacional, regional ou local.

A possibilidade de realização de um estágio académico permitiu a aplicação das competências e capacidades adquiridas ao longo do curso a uma situação prática em concreto. Permitiu também novas aprendizagens e o contacto frutuoso com novas realidades. A criação de um modelo de afetação de tráfego aplicado à Rede Rodoviária Nacional para apoio ao planeamento rodoviário no âmbito das atribuições do Instituto de Infraestruturas Rodoviárias, I.P. (InIR) foi de facto um trabalho muito agradável. O desenvolvimento deste trabalho já originou resultados interessantes, que se acredita que possam vir a ser considerados como preliminares, no âmbito de futuros processos de planeamento, esperando-se que o desenvolvimento desses processos venha a ser profícuo, na sua continuidade, para as entidades reguladoras, quer da área rodoviária, quer do sector dos transportes em geral.



## AGRADECIMENTO INSTITUCIONAL

Para que esta oportunidade se tenha transformado numa realidade efetiva, para além do estágio final de mestrado realizado no InIR, foi também imprescindível a colaboração e o apoio das empresas *PTV – Planung Transport Verkehr AG* e *TIS.pt – Transportes, Inovação e Sistemas*. A primeira através da cedência a título gratuito, pelo período de um ano, de uma licença do *software* de modelação de transportes VISUM e a segunda, representante do VISUM em Portugal, não só por ter viabilizado a cedência da licença, mas também porque foi uma grande mais-valia para a realização deste trabalho devido ao contínuo suporte técnico fornecido em apoio à utilização do VISUM e na aplicação de técnicas de modelação de transportes com base no VISUM. A autora, os orientadores e o ISEL agradecem a colaboração das duas empresas na realização do presente trabalho final de mestrado.



# 1. Introdução

## 1.1 Enquadramento

O presente documento corresponde ao relatório do Trabalho Final de Mestrado (TFM) em Engenharia Civil, realizado no Instituto de Infraestruturas Rodoviárias, I.P. (InIR).

O estágio académico pertence a uma das três opções possíveis de TFM, sendo a sua aprovação fundamental para a conclusão do Mestrado em Engenharia Civil.

A escolha do TFM baseou-se no facto de um estágio proporcionar a aplicação prática de conceitos que foram adquiridos durante o curso bem como uma boa introdução na vida ativa, e conseqüentemente o desenvolvimento de competências comportamentais, profissionais, de potencialidades humanas e técnicas, visando fundamentalmente a formação.

Pretende-se através do aprofundamento do tema proposto, estudar a aplicação de metodologias que permitam caracterizar o desempenho das redes rodoviárias através da utilização de modelos de afetação de tráfego e matrizes O/D. A utilização de matrizes O/D permite quantificar a procura associada à utilização das redes em cada instante, bem como os respetivos indicadores de serviço, como a saturação, nível de serviço e velocidade média de circulação.

Este tipo de caracterização de desempenho permite a existência de aferir a qualidade do serviço (da oferta) e do funcionamento do sistema rodoviário. Por outro lado, permite analisar o comportamento da procura (admitindo matrizes O/D estáveis) face à introdução de alterações na oferta. Estas alterações podem ser novas ligações (novos arcos), melhoria das condições atuais de circulação (por exemplo, aumento de capacidade ou de velocidade de circulação), ou alterações de outras condições de exploração (por exemplo, introdução ou alteração de custos de portagens).

Pretende-se com este estudo conseguir identificar as principais mais-valias obtidas com a construção de um modelo de afetação de tráfego para a Rede Rodoviária Nacional desenvolvido a partir da exportação da infraestrutura de dados em ArcGIS para um

*software* de modelação e afetação de tráfego como o VISUM; bem como identificar os principais pontos críticos de sucesso e eventuais desvantagens que possam surgir neste processo.

## **1.2 Caracterização da entidade InIR, IP**

O Instituto de Infraestruturas Rodoviárias, I.P. é um instituto público integrado na administração indireta do Estado, dotado de autonomia administrativa e financeira. O InIR prossegue atribuições do Ministério da Economia e do Emprego, sob superintendência e tutela do respetivo ministro.

De acordo com o Artigo 3º,1, Decreto-Lei nº148/2077 de 27 de Abril, a InIR, I.P. tem como principal missão regular e fiscalizar o sector das infraestruturas rodoviárias e supervisionar e regulamentar a execução, conservação, gestão e exploração das referidas infraestruturas, numa perspetiva integrada de ordenamento do território de desenvolvimento económico.

De entre as suas diversas atribuições, também tem por função assegurar e monitorizar a defesa dos direitos e interesses dos utilizadores das concessões rodoviárias, designadamente garantindo-lhes a eficácia dos sistemas de participação na gestão de qualidade e desempenho das estradas e dos operadores.

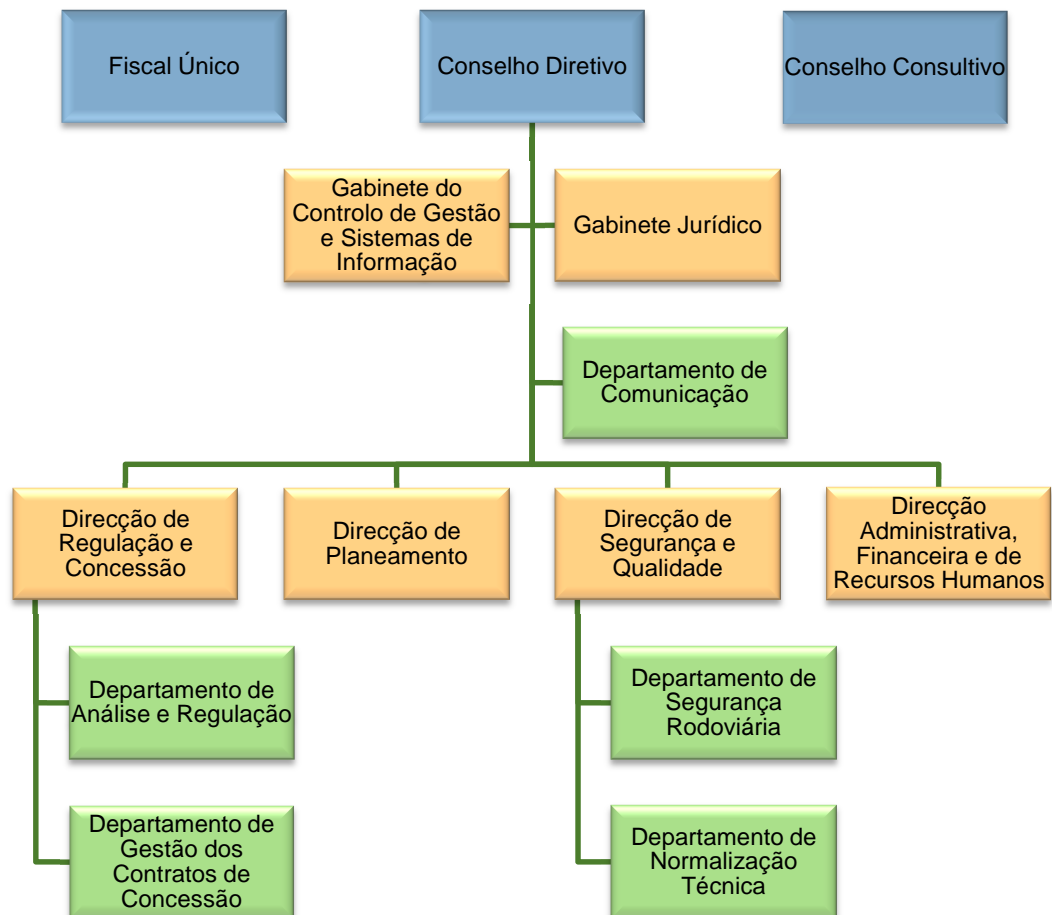
Os objetivos estratégicos do InIR são:

- Posicionar-se como um regulador de elevada competência no sector de infraestruturas rodoviárias, reconhecido por todos os agentes, pelos seus contributos para o desenvolvimento, competitividade e sustentabilidade do sector;
- Operacionalizar a organização do Instituto, os seus processos internos e os seus interfaces com os agentes do sector;
- Construir uma sólida base de conhecimentos e de informação do sector de infraestruturas rodoviárias que possa ser a base da definição e avaliação de políticas sectoriais e de estratégia de negócio;
- Assegurar a sustentabilidade económico-financeira do Instituto no quadro do novo Modelo de Gestão de Financiamento do sector rodoviário, financiando a sua atividade com as atribuições das empresas concessionárias ou subconcessionárias da rede rodoviária nacional, nos termos definidos nos respetivos contractos de concessão e subconcessão.

A organização interna do InIR, I.P. é definida pela Portaria nº546/2077, de 30 de Abril, estabelecendo que a estrutura orgânica do instituto é composta por unidades orgânicas



de nível I intituladas direções e gabinetes, que se subordinam ao conselho diretivo, e por unidades orgânicas de nível II denominadas departamentos que funcionam na dependência das unidades orgânicas de nível I (Figura 1).



**Figura 1: Estrutura orgânica do InIR**

*Fonte: Adaptado do InIR, I.P. (2011)*

### 1.3 Apresentação do Tema

A caracterização de desempenho e a utilização de indicadores de mobilidade e de outras medidas de quantificação da oferta e do seu ajuste face à procura e à contratualização é uma área de intervenção essencial da atividade de regulação, sendo fundamental nas métricas de relacionamento com os utilizadores (utentes, no ponto de vista do regulador), com a oferta (os concessionários, no ponto de vista do regulador) e o Estado (a Tutela).

Segundo o Comité Técnico C6 da AIPCR/PIARC (2005), na maioria dos países desenvolvidos e “em transição”, a gestão do sector rodoviário baseia-se em metas e

resultados. As metas estão em grande medida definidas na política de transportes estabelecida pelos governos, sendo os objetivos mais comuns:

- Garantir a acessibilidade;
- Melhorar as condições de segurança e diminuir a sinistralidade;
- Promover a sustentabilidade ambiental;
- Promover um sistema de transportes com elevada qualidade;
- Promover um desenvolvimento regional positivo.

A meta global consiste em assegurar um sistema de transportes que seja eficiente do ponto de vista socioeconómico e sustentável a longo prazo.

Devido às suas características, o planeamento de transportes constitui um domínio em que a utilização de modelos pode desempenhar um importante papel para o seu estudo, constituindo uma importante ferramenta de apoio. Face à complexidade do planeamento dos usos de solos em que, tanto as medidas estáticas (usos de solo, novas infraestruturas, etc.), como as medidas dinâmicas (controlo de tráfego, direcionamento de condutores, portagens, etc.) devem ser devidamente ponderadas, constata-se que a utilização de modelos se torna indispensável, uma vez que permitem uma avaliação *a priori*, o que é fundamental (TAVARES, 2003).

O objetivo dos estudos de planeamento é obter, através de métodos sistemáticos, dados relativos aos cinco elementos fundamentais do tráfego (condutor, peão, veículo, via e meio ambiente) e o seu inter-relacionamento. Ao planeamento e aos estudos de tráfego é possível estimar o número de veículos aproximados que circulam numa via, num determinado período de tempo, as suas velocidades, as suas ações, os locais onde os condutores desejam estacionar, os locais onde se concentram os acidentes de trânsito, etc., permitindo a determinação quantitativa da capacidade das vias.

Através da observação e levantamento de dados podem-se conhecer as zonas que geram o tráfego e para quais este se destina, tornando assim possível a identificação dos caminhos mais utilizados pelos passageiros e pelos transportes de mercadorias. Em conjunto com essas análises, que fornecem os dados sobre o tráfego atual, e através do conhecimento da forma de geração e distribuição desse tráfego, obtém-se o prognóstico das necessidades de circulação no futuro, sendo este um dado essencial para o diagnóstico dos problemas e o planeamento da rede.

De um modo geral, os modelos de planeamento de transportes tentam mostrar a localização e a distribuição geográfica das viagens, a seleção pelos diferentes modos de

transporte e respetivos itinerários, de forma a caracterizar os volumes de tráfego em cada elemento da “infraestrutura” de transporte (TAVARES, 2003).

Segundo Tavares (2003), no que se refere ao volume de veículos nas vias rodoviárias, representa a afetação de tráfego, que consiste na afetação das viagens aos arcos da rede viária, podendo esta ser descrita por:

- Determinação dos caminhos entre cada origem e cada destino;
- Atribuição e acumulação das viagens em cada arco;
- Cálculo de indicadores do nível de desempenho da rede.

O presente trabalho incidiu sobre a caracterização do desempenho da Rede Rodoviária Nacional, com especial ênfase na Rede Transeuropeia (RTE), através de modelos de afetação de tráfego no que se refere ao transporte individual que, resumidamente, são modelos utilizados para prever os fluxos de tráfego numa rede rodoviária, em função da procura e da oferta.

O *software* que foi utilizado para fazer a afetação da rede foi o VISUM, com o auxílio de uma matriz O/D de inquéritos e com as contagens de tráfego reais que foram fornecidas pelo InIR. Utilizou-se uma ferramenta do VISUM, o “TFlowFuzzy” que através das contagens de tráfego consegue corrigir os fluxos iniciais da matriz O/D de maneira a que os resultados da afetação sejam o mais próximo possível dos valores das contagens de tráfego.

## 1.4 Objetivos

O principal objetivo deste TFM consiste no desenvolvimento de um estudo exploratório de implementação de um modelo de afetação de tráfego em ligação direta com a infraestrutura rodoviária descrita através de dados SIG (base de dados da infraestrutura rodoviária do InIR), usando as funcionalidades do SIG ArcGIS, fazendo um primeiro ensaio da avaliação da eficiência da Rede Rodoviária Nacional e a análise de medidas que possam melhorar a acessibilidade e a mobilidade regional e nacional.

Tendo também como objetivo estudar e analisar a mobilidade rodoviária em Portugal com o auxílio do ArcGIS e desenvolver uma proposta de modelo de planeamento rodoviário de âmbito nacional, com o auxílio do software de modelação e afetação de tráfego VISUM, de forma a constituir uma ferramenta adequada à realização de um conjunto alargado de análises e que, tanto quanto possível, permitisse a generalização das metodologias utilizadas.

Através dessas análises, é possível identificar arcos e parte do modelo que possam ser melhoradas, nomeadamente ao nível do zonamento nas áreas urbanas e metropolitanas, conseguindo assim fazer uma melhoria nos arcos (aumento do número de vias e consequente aumento da velocidade) ou a criação de novos arcos na rede.

O objetivo do trabalho será pois o de construir um modelo de afetação de tráfego para a Rede Rodoviária Nacional (IP's, IC's e EN's) atual e variantes futuras (PRN2000 e possíveis alterações) e operacionalizar sobre esse modelo a avaliação de indicadores de desempenho e outros indicadores de mobilidade. O leque de alterações a efetuar deverá ser consubstanciado em cenários de estudo (atuais e/ou futuros), mediante os quais poderão ser quantificados o comportamento da procura e a quantificação dos parâmetros da oferta já referidos.

## **1.5 Estrutura**

O relatório é composto por 5 capítulos que são descritos de forma resumida.

No capítulo 1 é feita a introdução, onde se apresentam algumas noções iniciais acerca do tema. É efetuado o enquadramento do TFM, é realizada uma primeira abordagem ao tema, são definidos os objetivos base da investigação, é exposta a estruturação do trabalho.

No capítulo 2 são apresentadas algumas reflexões no que diz respeito ao tema, bem como às práticas de referência. Faz-se também uma descrição dos modelos de planeamento, mais detalhadamente dos modelos de afetação de tráfego.

No capítulo 3 é definido o modelo de afetação. Inicialmente faz-se uma caracterização dos dados base necessários à implementação do modelo e descrevem-se algumas características da ferramenta de análise e a metodologia utilizada face a esses dados. Calculam-se os custos e valores de impedância associados.

No capítulo 4 descreve-se o estudo de caso efetuado. Faz-se o enquadramento da rede e do zonamento utilizado, bem como a descrição da metodologia de implementação. Apresentam-se os resultados da análise de três cenários futuros de variação dos níveis de tráfego, com pressupostos diferentes (muito otimista, otimista e pessimista), cujo horizonte é de 20 anos. Por fim, fazem-se algumas comparações de cenários e descreve-se as dificuldades encontradas na implementação do modelo e do estudo de caso.

No capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões e descrevem-se as perspetivas futuras, analisam-se os objetivos previamente definidos e tecem-se comentários justificativos acerca do interesse dos resultados obtidos.



## **2. Modelos de Transportes: algumas reflexões**

### **2.1 Conceitos de Mobilidade e Acessibilidade**

Segundo Farias (2011) na sociedade moderna a mobilidade é o modo mais expedito de obter acessibilidade a bens e serviços. O conceito de acessibilidade é geralmente definido como uma medida de proximidade entre atividades humanas, facilitando o alcance destas a partir de um determinado local e utilizando um determinado tipo de transporte. Permite explicar as inter-relações entre as atividades humanas, o meio e o sistema de transportes. Para além de estar relacionada com a proximidade, a acessibilidade também pode ser promovida através da mobilidade e da “conectividade”. Isto na medida em que a proximidade entre atividades humanas, só é possível se existir o acesso à mobilidade e também através da correta definição da malha viária, que consiga estabelecer e garantir uma ótima “conectividade” entre diversas localidades.

O objetivo último do sistema de transportes é garantir a acessibilidade a todos os utilizadores. Neste capítulo desenvolver-se-á mais aprofundadamente o conceito de acessibilidade.

A acessibilidade pode ser definida como a facilidade de alcançar bens, serviços, atividades e destinos (oportunidades) e quantificada em termos de potencial (oportunidades que podem ser alcançadas) ou em termos reais (oportunidades que realmente são alcançadas). Como tal, os utilizadores podem valorizar um determinado modo de transporte, mesmo que não o utilizem, uma vez que este representa um potencial de acessibilidade (LITMAN, 2005).

Desta forma, as medidas de acessibilidade podem ser consideradas como indicadores dos impactos dos usos do solo, do sistema de transportes e das políticas de transportes no funcionamento global da sociedade.

Por outro lado, o conceito de mobilidade refere-se à maior ou menor facilidade com que os fluxos de pessoas ou bens se deslocam e assume que qualquer aumento da capacidade da rede viária ou da velocidade de circulação é favorável ao aumento da eficácia dos sistemas, ou seja, ao aumento da circulação. Esta perspetiva, encarada num

sentido restrito da mobilidade individual, pode implicar a eleição do transporte individual como um modo de transporte preponderante no atual sistema de mobilidade, mas também valoriza o transporte coletivo, o *carpooling* e os outros tipos de mobilidade, desenvolvida com base em modos suaves, como as deslocações de bicicleta nas zonas em que a procura o justifique.

Mobilidade e acessibilidade representam duas perspectivas distintas na abordagem e avaliação de um sistema de transportes, no que diz respeito aos utilizadores, aos modos, aos usos do solo e aos problemas de planeamento de transportes e suas soluções (LITMAN, 2005).

O interesse entre os profissionais dos transportes pelos aspetos relacionados com a mobilidade e acessibilidade em áreas urbanas tem aumentado significativamente, especialmente nos últimos vinte anos. Isto parece ser devido ao aumento da consciência das relações entre mobilidade, acessibilidade e qualidade de vida em áreas urbanas (JUNIOR, 2000 in AKINYEMI, 1998). Afinal, os conceitos de acessibilidade e mobilidade são fundamentais para as atividades de planeamento urbano e de transportes (JUNIOR, 2000 in ROSS, 1999).

Mobilidade pessoal, para Morris (1979), é interpretada como sendo a capacidade dos indivíduos de se deslocarem de um lugar para outro e depende principalmente da disponibilidade dos diferentes modos de transportes, incluindo o modo pedonal. Para este autor a noção de mobilidade é conceptualmente distinta de ‘viagens atuais realizadas’.

O conceito de mobilidade é interpretado, segundo Tagore & Sikdar (1995), como sendo a capacidade dos indivíduos se movimentarem de um lugar para outro e depende do desempenho do sistema de transportes (disponibilidade, frequência, tempo de espera, etc.) e características do indivíduo (vencimento, veículo próprio, recursos que ele pode gastar na viagem, etc.).

Para Junior (2000), in Rosado & Ulysséa Neto (1999), a medida de mobilidade traduz o “grau de impedância do deslocamento”. Esta impedância pode ser entendida, por determinado prisma, como o grau de dificuldade que a pessoa encontra para efetuar o deslocamento através do sistema de transporte.

Para Stermerding (1996), mobilidade é a capacidade que um indivíduo tem de se movimentar livremente de um ponto de origem para um destino desejado e é uma das maiores realizações para o bem-estar do cidadão. Uma definição semelhante foi



apresentada por CTAQC<sup>1</sup> (1998): “mobilidade é a capacidade para se mover livremente na região ou país”.

Mobilidade é a capacidade de um indivíduo se movimentar. Esta “capacidade” do indivíduo depende do desempenho do sistema de transportes usado, da hora do dia e direção na qual o indivíduo pretende viajar, das suas características pessoais e dos recursos de que dispõe, tais como se tem viatura própria, se pode apanhar um táxi ou um autocarro, etc.. Em resumo, a noção de mobilidade caracteriza a capacidade da pessoa se deslocar e o uso que ela faz desta capacidade (GIANNOPOULOS & BOULOUGARIS, 1989).

Akinyemi & Zuidgeest (1998), por sua vez, consideram a mobilidade como sendo muito mais uma variável de oferta do que uma variável de procura. Em vez de significar viagens atuais ou viagens futuras, caracterizadas por medidas tais como quilómetros por viagem feita por uma pessoa, número de viagens feitas por dia ou por ano por uma pessoa, mobilidade pode ser definida como um termo qualitativo que representa a capacidade que um grupo de pessoas tem para viajar a partir de uma zona, por diversos modos de transporte. A mobilidade, conseqüentemente torna-se dependente da disponibilidade para o grupo, desses modos de transporte, tanto quanto da facilidade que os membros do grupo encontram para viajar nos modos disponíveis.

Para Paschetto *et al.* (1983), a mobilidade urbana depende de vários fatores: desenvolvimento urbano, crescimento da cidade no espaço e no tempo, tendências sociais urbanas, mudanças e expansão das comunicações e disponibilidade de transportes. Dentro deste contexto, mobilidade urbana mostra-se como uma necessidade de transportes, moldada pelo modo de vida urbano, olhado como um todo.

De acordo com Kollarits (1998), a mobilidade espacial de pessoas pode ser considerada como necessária para a satisfação de muitas necessidades humanas e cita três diferentes definições de mobilidade, apontadas no trabalho de FRANZ<sup>2</sup>:

- i) Movimento espacial atual;
- ii) Capacidade para movimentar ou potencial para aceder à localização de atividades;
- iii) Disponibilidade mental para ser móvel.

Para Hamburg *et al.* (1995), não existe igualdade social quando alguns podem escolher livremente a mobilidade espacial, enquanto outros têm uma diferente e talvez difícil

---

<sup>1</sup> CTAQC, Chicagoland Transportation and Air Quality Commission, 1998.

<sup>2</sup> FRANZ, P. (1984). *Soziologie der räumlichen Mobilität*. Eine Einführung. Frankfurt/New York, Campus Studium, 556 in KOLLARITS (1998).

escolha a fazer. Ainda, para esses autores, a ausência de mobilidade num grupo de pessoas pode reduzir o acesso a potenciais empregos e contribuir para o desemprego.

A mobilidade, para Ferrandiz (1990), é uma componente da qualidade de vida aspirada pelos habitantes de uma cidade. Dessa forma, não se pode considerar que uma determinada região urbana tenha um nível ambiental alto (com baixos índices de ruído, contaminação do ar, etc.), se um componente muito importante deste ambiente, como é o caso da mobilidade, não estiver devidamente contemplado.

Segundo Junior (2000), CMSP (1990) define-se *índice de mobilidade* como sendo, inicialmente, a relação entre o número de viagens motorizadas e o número de habitantes, por exemplo, de uma cidade. As viagens pedonais podem também ser acrescentadas a este índice de mobilidade. Moreno (1998) analisa a mobilidade da região de Madrid considerando as deslocações diárias realizadas através de veículos privados (bicicleta, automóvel, como condutor ou passageiro, motociclista e outros), transporte público (autocarro, metro, comboio suburbano) e táxi.

Muitos investigadores têm definido mobilidade como sendo a facilidade de viagem, isto é, o número de viagens que um indivíduo faz durante um dia, aproveitando as oportunidades económicas e sociais disponibilizadas pela cidade.

A mobilidade não pode ser encarada apenas sob o ponto de vista da procura atendida por um ou outro modo de transporte. A visão deve estar ligada, segundo Forneck & Zuccolotto (1996), às necessidades de deslocação da população, principalmente daquela parcela que depende do transporte coletivo. “A mobilidade é um requisito da liberdade” (SERRATOSA, 1996).

Burkhardt<sup>3</sup>, in Dalvi (1979), sugere que o termo mobilidade deve ser usado para se referir à restrição de oferta sofrida pelo indivíduo. O termo “mobilidade” para a Comissão Independente no Transporte, ITC<sup>4</sup> (1974), in Dalvi (1979) refere-se à facilidade com que uma pessoa se move ou à quantidade de movimento que ela realiza. Mais precisamente o termo mobilidade pode ser definido de dois modos distintos: primeiro, como um conceito e em segundo lugar, em termos de alguma medida física associada à quantificação daquele conceito. Como um conceito, mobilidade refere-se ao grau para o qual uma pessoa está livre de impedimentos em sua casa ou noutra lugar para viajar.

---

<sup>3</sup> BURKHARDT, J.E. (1972). Need as a criterion for transportation planning. *Highway Research Record*, n.435 in DALVI (1979).

<sup>4</sup> ITC, INDEPENDENT COMMISSION ON TRANSPORTATION (1974). *Changing directions*. London, Coronet Books in DALVI (1979).

Segundo Cianfano (2008), os indicadores de mobilidade são:

- Velocidade média na rede – representa a velocidade média dos veículos ao longo da rede de estradas, em que a velocidade média de cada estrada é ponderada pela extensão da estrada;
- Velocidade média do veículo – representa a velocidade média dos veículos na rede, ponderada pelo comprimento da estrada;
- Indicador de tempo na rede – representa o tempo gasto por veículos na rede em comparação com o tempo “ideal” gasto pelos mesmos veículos se pudessem viajar em velocidade de fluxo livre na rede;
- Indicador de atraso na rede – representa a quantidade de atraso que é experimentado na rede em geral, pelos veículos;
- Tempo médio de viagem – representa o tempo médio gasto na rede pelos veículos que em média viajam uma distância  $D$  com uma velocidade  $V$ .

A interpretação mais comum do termo mobilidade, segundo Akinyemi (1998), é aquela na qual se relaciona o conceito de mobilidade com as viagens realizadas utilizando, por exemplo, número de quilômetros por viagem por pessoa, número de viagens por pessoa por dia, número de quilômetros viajados diariamente por pessoa e por modo de transporte e o número de viagens por dia por pessoa e por modo de transporte.

No entanto, para Tagore & Sikdar (1995) e Akinyemi (1998), viagens atuais ou viagens realizadas não são a mesma coisa que mobilidade. Akinyemi (1998) afirma que uma viagem feita é um resultado (ou indicação de consumo de um serviço), enquanto a mobilidade é um termo que se refere à competência ou capacidade para viajar (ou consumir um serviço). A quantidade de viagens de um indivíduo num dado período, salienta Akinyemi (1998), resulta simplesmente do grau com o qual esse indivíduo exercita a sua capacidade de se deslocar durante um determinado período, quantificado em termos de quilômetros por viagem ou número de viagens feitas num dado dia e depende, entre outros fatores, do desejo e das necessidades de mobilidade do indivíduo. Desta forma, os seus padrões de deslocações reais não correspondem necessariamente aos padrões de mobilidade potencial que um indivíduo genérico poderá alcançar na mesma situação. Segundo o autor, o uso isolado dessas medidas quantitativas tende a mascarar ou trivializar a influência das infraestruturas e serviços de transportes, tornando difícil relacionar as condições inerentes aos sistemas de transportes com os níveis reais de mobilidade.

Na sua conotação convencional, a mobilidade sempre foi tratada por meio de uma abordagem quantitativa, significando as deslocações ou viagens que se verificam na

cidade ou no espaço urbano, e que têm como referência um local de origem e outro de destino, sendo que, muitas vezes, só se refere às viagens motorizadas. No entanto, a atual complexidade urbana ajudou a compor um conceito mais abrangente e complexo, que identifica a mobilidade como um fenómeno “multifacetado”, com dimensões diferenciadas a nível social, económico, político e até mesmo cultural. Esse novo conceito pressupõe o entendimento das necessidades do indivíduo e das especificidades da sua inserção nas diversas esferas urbanas. Assim, a mobilidade passa a constituir-se num aspeto essencial e condicionante da qualidade de vida (PINHEIRO, 1994).

Uma outra interpretação do conceito mobilidade envolve a consideração de mobilidade em termos de propriedade ou disponibilidade de um modo de transporte. Através deste entendimento, Anikyemi (1998) analisa que uma pessoa não tem mobilidade quando não possui um veículo ou não tem disponível um modo de transporte. Entretanto ao interpretar mobilidade em termos de propriedade de um veículo, não se toma em conta que um veículo é somente um meio de transporte. Por outro lado, em muitas cidades de países em desenvolvimento a propriedade ou disponibilidade de um veículo não garante necessariamente a capacidade de movimento.

Transportes e mobilidade têm-se tornado conceitos chave na moderna realidade de bem-estar e, como tal são consensualmente considerados valores básicos nas sociedades atuais. Por conseguinte, as taxas de mobilidade são consideradas como indicadores de desempenho de um sistema económico.

Em termos de sustentabilidade, o aumento excessivo da mobilidade causa consequências intoleráveis para o ambiente urbano e resulta, assim, num aumento do consumo de combustíveis, que conduz a inaceitáveis alterações no ambiente físico. Adicionalmente, a mobilidade através de veículos vem dificultar os critérios de planeamento físico dos espaços urbanos (NIJKAMP & BLAAS, 1994).

É evidente que o pensamento dos autores anteriores em relação aos países desenvolvidos tem como preocupação a possibilidade da limitação da mobilidade geral, o que é válido para aqueles países onde geralmente a população dispõe de elevada mobilidade através de transportes públicos. Mas este não será o caso dos países em vias de desenvolvimento, no qual os grupos com baixos rendimentos não têm acesso ao transporte público.

Pensando em soluções para que as cidades venham a ser mais viáveis do ponto de vista da qualidade de vida da sua população, Carruthers & Lawson (1995) sugeriram que a mobilidade deva ser administrada de forma adequada com o desenvolvimento e

manutenção de uma cidade sustentável, permitindo assim a coexistência de diferentes formas de viagens.

## **2.2 Modelos de Planejamento**

### **2.2.1 Definição de modelo**

A utilização de modelos é associada a praticamente todas as atividades que se desenvolvem no nosso mundo. Trata-se de um conceito que tanto pode significar a representação em escala reduzida de uma ponte, a simulação em computador da ação do vento numa estrutura ou a formulação matemática da dinâmica dos veículos numa estrada. Existe, contudo, um aspecto comum a todos estes modelos: são uma representação idealizada e mais ou menos simplificada da realidade. Entende-se assim por modelo uma aproximação, representação ou idealização de determinados aspectos da estrutura, comportamento, funcionamento, ou outras características de um processo, conceito ou sistema do mundo real (KAMAN, 1996).

Ortúzar, J. de D. & Willumsen, L. G., (2002) propõe a classificação dos modelos em duas categorias principais: os modelos físicos e os modelos teóricos. De uma maneira geral, recorre-se aos primeiros, normalmente a escala reduzida, quando o processo a estudar é particularmente complexo, impossibilitando a sua compreensão apenas com base em considerações teóricas. Relativamente aos modelos teóricos podem ser do tipo narrativo (expressos por palavras), gráfico (desenhos, diagramas) ou matemático.

Um modelo perfeito seria capaz de retratar um processo real com o mesmo grau de precisão com que é possível medir as variáveis caracterizadoras desse processo. Seria desejável o desenvolvimento de modelos “perfeitos” mas, através da própria definição de modelo, compreende-se que tal é impossível.

De uma forma sucinta, os modelos consistem na aproximação e representação das diferentes componentes de um sistema real, tornando deste modo possível a experimentação e a análise, sem correr riscos inerentes às experiências realizadas num ambiente real.

Segundo Perrakis K. et al. (2012), a maior parte dos métodos de estimação de matrizes O/D focam-se em situações onde a informação é pouca ou parcial, sendo esta retirada de inquéritos feitos numa amostra de viagens disponível. Estas informações são derivadas de estudos de viagens que abrangem toda a população de uma área em estudo, com interesse específico.

## 2.2.2 Modelos no sector dos transportes

O planeamento de transportes é uma área de estudo que visa adequar as necessidades de transportes de uma região ao seu grau de desenvolvimento, de acordo com as suas características estruturais. Isto significa geralmente implementar novos sistemas ou melhorar os sistemas já existentes.

Um planeamento de transportes eficaz resulta na criação de serviços de transporte com qualidade, a um custo razoável. Um deficiente planeamento pode originar situações de congestionamento da rede, usos de solo inadequados, impactos ambientais negativos e desperdício de recursos e dos fundos públicos (TAVARES, 2003).

Para Tavares (2003), o planeamento de transportes é um processo complicado que abrange várias fases:

- Definição do problema;
- Delimitação da área em estudo;
- Definição de objetivos e critérios;
- Caracterização da oferta e procura de sistema de transporte;
- Recolha de dados;
- Desenvolvimento de cenários;
- Previsão do futuro comportamento do transporte;
- Avaliação das alternativas;
- Seleção de planos;
- Implementação de planos;
- Monitorização;
- Avaliação;
- Atualização.

Os modelos de transporte desempenham um papel fundamental neste complexo processo, especialmente nas etapas de previsão e avaliação, pois possibilitam efetuar uma previsão do número de viagens que são efetuadas e como as mesmas se repartem tanto no tempo como no espaço, em função de uma dada situação de usos de solos (ocupação) e de alternativas (cenários) de transporte.

Em termos práticos, no sector dos transportes, um modelo de planeamento correspondente à representação das diversas componentes da infraestrutura de transporte (rede viária, linhas de transporte público, gestão e controlo de tráfego) e dos fluxos de tráfego (veículos, passageiros e mercadorias), de forma a reproduzir as condições operacionais (atuais e futuras) dos sistemas de transportes. Deste modo, estes

modelos tornam possível a previsão dos fluxos de tráfego que são servidos pelas redes de transportes, em função das suas características, mas também do sistema espacial e socioeconómico que as contem.

Com o progresso da área informática, têm sido desenvolvidos modelos de tráfego cada vez mais robustos. No entanto, o aumento da sua complexidade, numa tentativa de uma maior aproximação à realidade requer um maior esforço na sua representação. Por outro lado, a qualidade de um modelo não deve ser avaliada nem pela sua dimensão nem pela sua sofisticação, mas sim pela sua capacidade de resposta com a precisão necessária para o apoio à tomada de decisões, através da informação fornecida (HMSO, 1991).

É importante salientar que nenhum modelo de tráfego pode ter em conta todos os fatores com influência no comportamento dos utilizadores de uma rede de transportes, podendo afirmar-se que nenhum modelo consegue reproduzir ou prever perfeitamente a “realidade”.

### **2.2.3 Modelação de Transportes**

Segundo Tavares (2003), a modelação da procura/oferta de transportes foi inicialmente desenvolvida, no início da década de 50, como um meio de apoio ao planeamento de infraestruturas rodoviárias interurbanas, isto é, das vias de ligação entre meios urbanos distintos (autoestradas, vias rápidas, estradas, etc.) nos Estados Unidos da América.

Face à necessidade de outro tipo de resultados, relativamente à sua aplicação em redes urbanas, permitindo a integração de outros modos de transporte (transportes públicos, peões, bicicletas, etc.) e a análise de estratégias e políticas de transportes alternativas, o processo de modelação tem vindo a ser transformado de forma a abranger técnicas que permitam analisar estes tipos de abordagem (TAVARES, 2003).

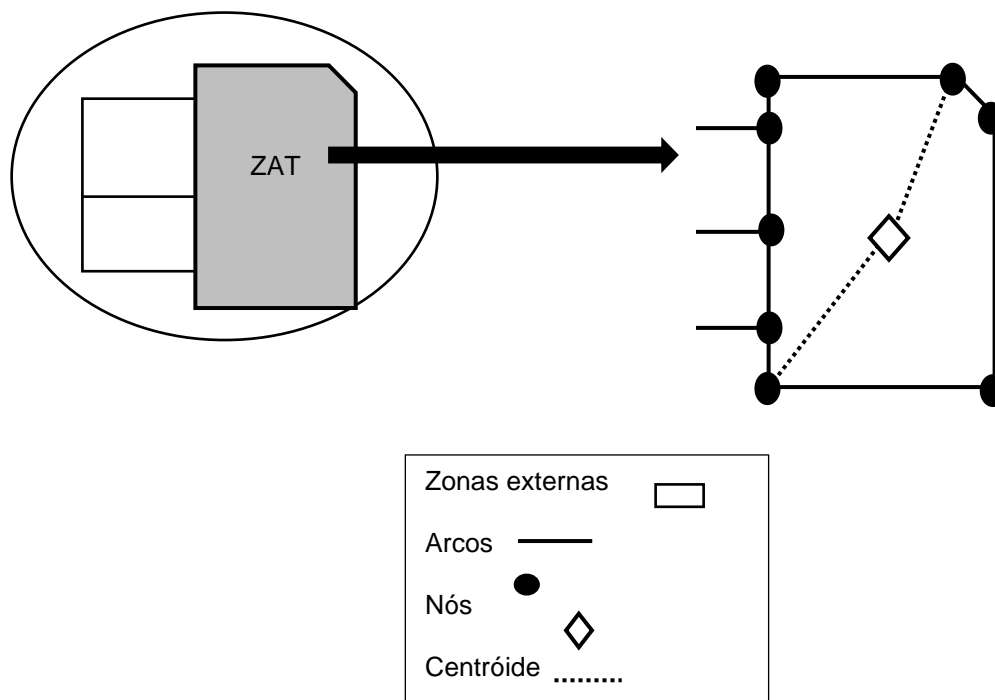
A modelação de transportes envolve uma série de modelos matemáticos que visam simular o comportamento dos utilizadores do sistema. Os modelos são geralmente sequenciais, envolvendo vários passos que respondem a uma série de questões sobre as decisões dos utilizadores sendo necessário definir os vários pressupostos sobre como são tomadas as decisões, quais os fatores considerados e como estes reagem em situações alternativas.

Por outro lado, os modelos necessitam que a área em análise seja desagregada numa série de zonas mais pequenas a partir das quais as viagens são geradas e para onde são atraídas, uma vez que seria inconcebível modelar cada viagem individualmente, dada a variedade de origens e destinos existentes. Assim, os modelos de transporte utilizam

áreas geográficas com características homogêneas, denominadas *Zonas de Análise de Tráfego (ZAT)*<sup>5</sup>, para as quais se assume que as viagens se iniciam e terminam no seu centro de atividades, ou centro de 'mobilidade', denominado *centróide*.

Com a utilização do conceito de ZAT os modelos não têm em consideração as viagens *intra-zonas* (viagens que decorrem dentro da zona), apenas representando as viagens *inter-zonas* (viagens com início e fim em zonas distintas).

É também necessário proceder-se à representação da infraestrutura de transportes, a qual é baseada no conceito de rede. Sendo que a rede é constituída por *arcos*, que representam os segmentos lineares de uma infraestrutura rodoviária, ferroviária ou de um serviço de transporte coletivo e; por *nós*, que definem a posição das intersecções na rede ou outros pontos da mesma em que existam descontinuidades. Os *centróides* são um tipo específico de nós que se encontram ligados a um, ou vários, nós da rede por *conectores*, que são arcos específicos que fazem a interface entre o *centróide* e os nós da rede e que não têm tradução física real (Figura 2).



**Figura 2: Representação esquemática de uma rede de transportes**

*Fonte: Adaptado de Tavares, 2003*

Para a caracterização dos arcos é necessária a identificação de várias propriedades físicas e atributos, dos quais se destacam: os nós inicial e final, a sua velocidade base, o número de vias por sentido e a capacidade (fluxo máximo). Os nós também têm

<sup>5</sup> Em inglês, Traffic Analysis Zones (TAZ).



propriedades específicas, tais como atrasos ou custos (por exemplo, para a simulação de uma portagem pontual).

Através desta caracterização é possível simular o funcionamento da rede de transportes, o que posteriormente, através da introdução de fluxos com base na matriz O/D, permite simular as viagens e os caminhos na rede, que começam nos *centróides* das ZAT de origem (O) e terminam nos *centróides* das ZAT dos destinos.

É com base neste tipo de modelação de redes de transportes, definida em termos semelhantes aos descritos, que é possível aplicar várias famílias de modelos, a vários níveis de análise, tal como modelos de tráfego (para análises localizadas de impactos de empreendimentos e outras perturbações) ou modelos globais de planeamento, como o modelo clássico dos Quatro Passos, que tem sido fundamental para o planeamento estratégico de transportes.

O presente TFM focalizou-se particularmente numa variante do Modelo dos Quatro Passos aplicado ao planeamento rodoviário. Na construção do modelo foi dada especial ênfase à geração da matriz O/D (correspondente aos primeiro e segundo passo da formulação clássica) e à construção do modelo de rede e correspondente afetação de tráfego – equivalente ao quarto passo da formulação clássica. Só será considerado tráfego rodoviário, pelo que o (terceiro) passo - escolha modal - será ignorado.

As matrizes O/D podem ser estimadas por técnicas de inquérito baseadas, por exemplo na realização de inquéritos à mobilidade (cobrem a situação de um conjunto de pessoas são inquiridos acerca dos seus hábitos de mobilidade), inquéritos O/D (colhem apenas a viagem intersectada), entrevistas domiciliares, contagens de tráfego (manuais ou mecânicas, realizadas em locais críticos onde existe grande movimento de veículos) ou através de contagens periódicas (censos).

Após a recolha dos dados de tráfego e da sua uniformização é possível, assim, obter estimativas dos fluxos de viajantes entre cada par de zonas, conseguindo-se assim a criação de uma matriz O/D.

Depois da matriz O/D estar devidamente determinada, afeta-se esta à rede em estudo e observa-se como esta funciona. Através de contagens de tráfego consegue-se confrontar com os resultados obtidos na afetação da matriz com os dados reais, conseguindo-se assim verificar quais as vias com maior ou menor tráfego, quais os níveis de serviço e quais os pontos críticos da rede, etc.

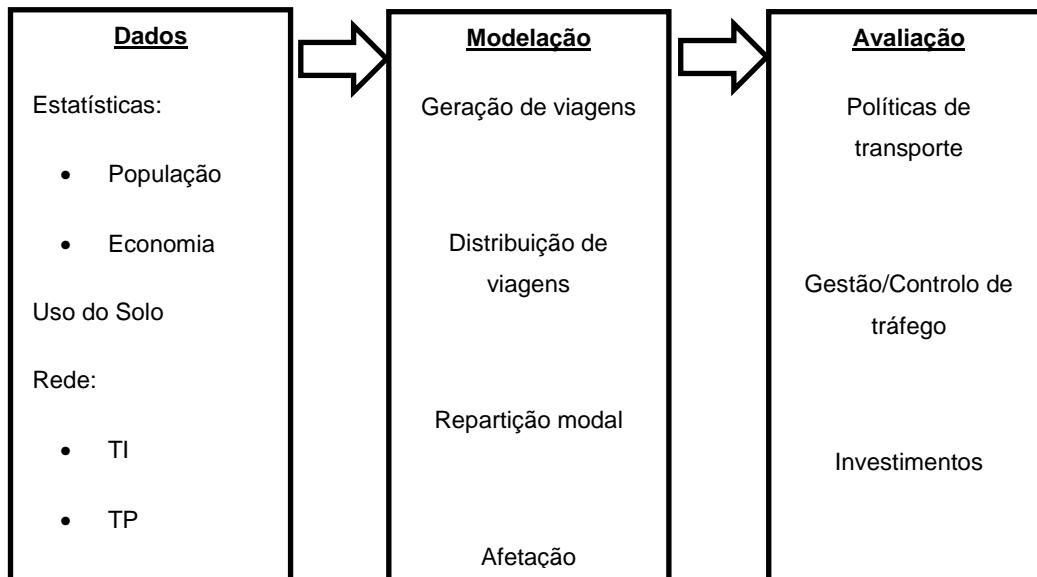
## 2.3 O Modelo dos Quatro Passos

Como já foi referido, os modelos globais agregados foram desenvolvidos nos EUA, a partir das décadas de 50/60, numa época em que se verificava um considerável crescimento económico, manifestado nas expansões de capacidade através da construção de novas infraestruturas. Estes modelos de procura de transportes procuram explicar o conjunto das viagens de passageiros realizados em zonas urbanas, com base em variáveis facilmente quantificáveis para cada uma das zonas em que essas aglomerações eram subdivididas (VIEGAS, 2000).

Como já foi referido, o modelo mais conhecido é o designado Modelo dos Quatro Passos, que na sua formulação clássica inicial é subdividido em quatro passos, a saber (VIEGAS, 2000):

1. Geração/atração, em que se estima quantas viagens são iniciadas e/ou concluídas em cada zona, em função do uso de solos (determina o número de viagens com origem em cada zona e o número de viagens com destino a cada zona, consoante se trate de viagens casa-trabalho, casa-compras ou outras);
2. Distribuição, em que se estima como é que as viagens de cada origem se repartem pelos vários destinos, ou vice-versa (determina o número de viagens entre cada par O/D);
3. Repartição ou divisão modal, em que se estima qual o modo de transporte em que as viagens realizadas entre cada par O/D serão realizadas;
4. Afetação de tráfego, em que se calculam quais os caminhos de viagem usados para cada par O/D em cada modo de transporte, tendo em atenção as redes disponíveis em cada um desses modos e, eventualmente, os seus níveis de congestionamento decorrentes das escolhas globais de todos os viajantes (determinação do volume de tráfego em cada eixo, por modo de transporte, em termos agregados).

No esquema seguinte sintetiza-se o funcionamento do modelo clássico dos Quatro Passos:



**Figura 3: Modelos dos Quatro Passos**

*Fonte: Adaptado de Tavares, 2003*

Segundo Viegas (2000), este modelo consegue reduzir a uma série de decisões e submodelos simples de compreender (e de programar em computador) o processo de organização da maioria das viagens em meio urbano e regional. Por esta razão foi utilizado na maior parte dos planos de transportes das grandes cidades de todo o mundo ao longo das décadas de 60 e 70 (e ainda em boa parte dos anos 80). Hoje ainda é utilizado, mas com alterações à formulação base e adaptações para ter em conta as novas políticas de transportes relacionadas com a promoção do transporte público, ou com a eficiência económica do sistema (por exemplo, através da introdução de mecanismos de *road pricing*).

Apesar do método ter sido muito utilizado, várias críticas foram sendo apontadas a esta abordagem, não deixando, apesar disso, de ser o método mais utilizado para planeamento. Segundo Viegas (2010), as principais críticas apontadas são:

- Não incluir qualquer possibilidade de representação das interdependências entre as várias deslocações da mesma pessoa ao longo do dia (cadeia de viagens) ou das suas deslocações com as das outras pessoas do mesmo agregado familiar;
- O modelo não inclui qualquer componente que permita refletir as escolhas que as pessoas fazem quanto à hora a que se deslocam, em função das atividades envolvidas;
- No submodelo da distribuição (2º passo) a escolha de destinos é feita a partir de cada origem, com base nos custos de deslocações para cada uma das zonas, mas esses custos são dependentes das escolhas de modo, que são somente identificados no 3º passo, de repartição modal. Normalmente são utilizadas

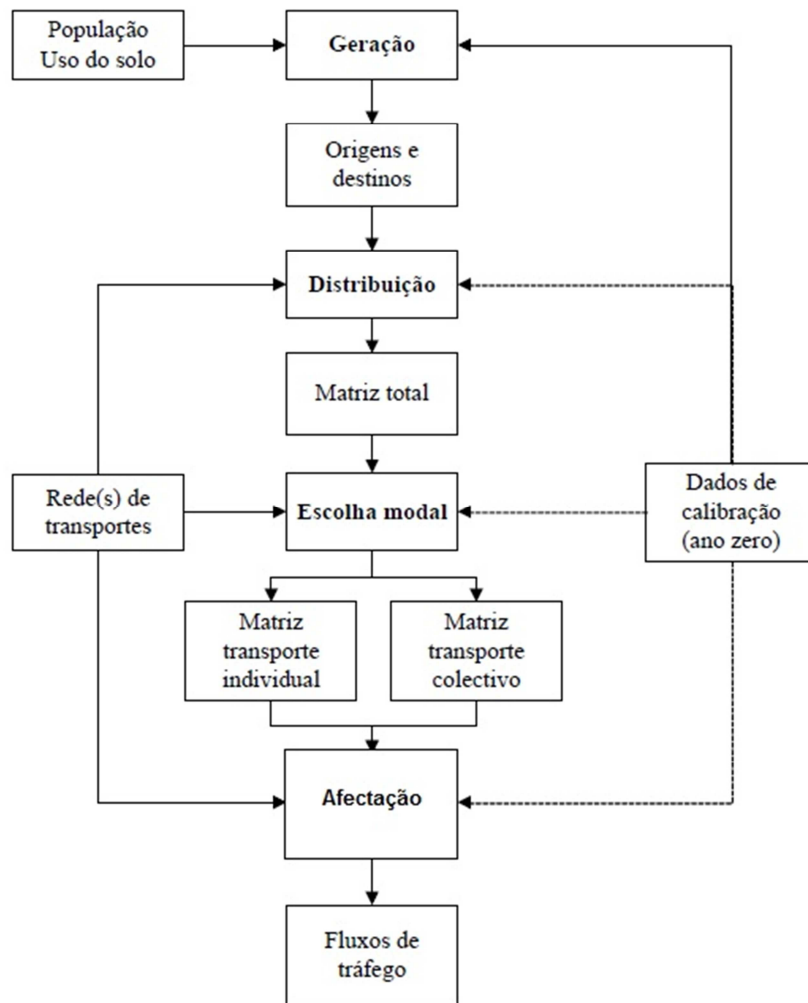
estimativas de custos compostos (por exemplo, estimativas médias para TI e TP). A inversão desses dois passos resulta numa situação ainda pior, com a escolha do modo a ser feita antes de se escolher destino;

- A escolha do modo no submodelo de repartição modal (3º passo) é baseada em custos e tempos de cada um dos modos, mas o nível de congestionamento só é conhecido depois da execução do submodelo de afetação do tráfego às redes (4º passo), que pode alterar os tempos e custos, em função do grau de saturação das redes.

É hoje comum a implementação conjunta dos submodelos de distribuição e de repartição modal (2º e 3º passos) através de modelos de escolha discreta conjuntos (de grande dimensão e implicando um grande número de alternativas), em que cada alternativa é composta por um par (destino, modo). Neste tipo de modelos, alguns pares não existem por não haver ligação nesse modo a esse destino. A utilidade de cada par (destino, modo) inclui componentes da utilidade positiva (associada à 'atração' do destino) e de utilidade negativa (associada ao custo e tempo para lá chegar).

O último submodelo, de afetação, é 'corrido' sobre as matrizes O/D obtidas para cada modo, devendo os resultados (tempos, custos, etc.) deste módulo 'alimentar' novamente o passo anterior (fusão do submodelo distribuição e repartição modal) para a correção das velocidades e outras variáveis (tempos e custos), dando origem a um processo iterativo. Este processo para quando as diferenças dos tráfegos afetados aos principais arcos, através de iterações sucessivas, sejam suficientemente próximas.

A configuração geral destes modelos é apresentada na Figura 4.



**Figura 4: Estrutura do modelo dos Quatro Passos**

*Fonte: Adaptado de HMSO, 1987.*

Segundo Vasconcelos (2004), são considerados, como elementos base: o sistema de redes de transportes, o modelo de zonamento, assim como a caracterização socioeconómica da população e dos usos de solos. Esta informação é utilizada para estimar um modelo de produção e atração de viagens na área de estudo (geração de tráfego), produzindo na prática os somatórios totais das linhas e colunas da matriz O/D (1º passo). O passo seguinte consiste na distribuição dos valores globais das viagens produzidas e atraídas nas zonas, o que na prática corresponde à obtenção dos elementos interiores da matriz O/D. De seguida, procede-se à repartição dos viajantes (matriz O/D) pelos vários modos de transporte (distribuição modal), o que resulta numa matriz O/D por cada modo considerado. O último passo corresponde à afecção de tráfego, no qual se procede à afecção das matrizes O/D dos diversos modos às redes correspondentes.

De acordo com Thomas (1991), a abordagem tradicional do modelo dos Quatro Passos é utilizada para, a partir dos modelos de afetação, fornecer estimativas de fluxos de tráfego em vias estratégicas, a nível regional, com o principal objetivo de disponibilizar uma base para comparação de sistemas de transportes a médio e longo prazo.

Desde cedo esta abordagem gerou muitas críticas, tendo sido apontadas como principais fraquezas do modelo o formato sequencial, a incapacidade de tratar cadeias de viagem múltiplas ao longo do dia e a sua aplicação a níveis muito agregados, face ao custo para obtenção de informação mais detalhada (BATES, 2000). Apesar disso, e embora o grau de utilização se tenha reduzido, Viegas (2000) refere que há ainda muitos casos em que são usados, por razões que se prendem com a facilidade de encontrar aplicações informáticas de baixo custo para a sua utilização e a menor exigência em dados, ou seja, menor detalhe dos dados relativamente a outros modelos de estimação da procura.

Durante a década de 70 apareceram propostas de modelação alternativas ao modelo dos Quatro Passos, considerando explicitamente a influência do agregado familiar e das características do indivíduo, bem como a consideração conjunta de toda a cadeia de viagens realizadas pelos passageiros ao longo do dia. No entanto, a estes modelos, designados por modelos globais desgregados são, por sua vez, apontadas dificuldades relacionadas com a obtenção de informação suficientemente desagregada, com o conhecimento das margens de erro das estimativas produzidas e com a transposição de processos de decisão entre duas realidades significativamente distintas, como cidades diferentes ou entre, o ano base e o médio/longo prazo, o que põe em causa a sua aplicabilidade (VIEGAS, 2000).

Thomas (1991), advoga que, face à pouca confiança das soluções estratégicas para os problemas de tráfego, deve haver uma progressiva preocupação com as intervenções imediatas ou de curto/médio prazo sobre redes locais. Nesta perspetiva, não se tornaria necessário recorrer a um modelo global de procura de transportes, devendo as matrizes de viagens ser obtidas, tanto quanto possível, por observação direta ou atualização de outras anteriores (UK DOT, 1996).

No entanto, esta nova forma de gestão das infraestruturas evitando análises estratégicas de longo prazo, não é consensual e implica novas exigências aos níveis dos processos de modelação. Se, por um lado, a fase de afetação passa a construir a única etapa de modelação no processo de planeamento e análise, por outro, as intervenções a avaliar são cada vez mais subtis, implicando assim que sejam desenvolvidos esforços a cada vez maiores no sentido de tornar os modelos de afetação cada vez mais sensíveis e realistas.

Nas próximas secções apresentam-se, ainda que de forma resumida, os principais modelos clássicos utilizados no planeamento estratégico de transportes associado ao Modelo dos 4 Passos.

### 2.3.1 Modelos de geração/atração de viagens

O primeiro passo de um modelo clássico de transportes consiste na geração de viagens, cujo objetivo principal é prever qual o número total de viagens geradas ( $O_i$ ) ou destinadas ( $D_j$ ) às zonas de análise, num dado período de tempo. Estas estimativas podem ser obtidas de diversas maneiras: iniciando com as viagens dos indivíduos ou famílias que residem em zonas diferentes ou diretamente com os atributos existentes nas zonas (população, emprego, número de veículos, etc.).

Segundo Campos (2007), o principal objetivo dos modelos de geração de viagens é prever qual o número total de viagens que se iniciam ou terminam em cada zona de análise na área em estudo, num dia normal do ano de estudo.

Para Tavares (2003), a geração de viagens está associada a duas razões: à capacidade de atração das zonas, dependente da ocupação do solo, e pela maior ou menor disponibilidade das pessoas para realizarem viagens a fim de poderem ter acesso a bens e/ou serviços.

O conjunto de viagens com origem na zona  $i$  e destino na zona  $j$ ,  $v_{ij}$ , entre todas as zonas de uma área de estudo, pode ser agrupado, como já foi referido, sob a forma de uma matriz, que se designa matriz O/D. Esta matriz não é simétrica e nem sequer é idêntica, ou seja, o número de linhas e colunas pode ser diferente.

Quadro 1: Configuração tipo de uma matriz O/D

		n destinos						
		1	2	...	j	...	n	
m origens	1	$v_{11}$	$v_{12}$	...	$v_{1j}$	...	$v_{1n}$	$O_1$
	2	$v_{21}$	$v_{22}$	...	$v_{2j}$	...	$v_{2n}$	$O_2$
	...	...	...	...	...	...	...	...
	i	$v_{i1}$	$v_{i2}$	...	$v_{ij}$	...	$v_{in}$	$O_i$
	...	...	...	...	...	...	...	...
	m	$v_{m1}$	$v_{m2}$	...	$v_{mj}$	...	$v_{mn}$	$O_m$
		$D_1$	$D_2$	...	$D_j$	...	$D_n$	

Em que  $O_m$  representa o número total de viagens iniciadas na zona m para todos os n destinos, bem como  $D_n$  representa o número total de viagens que chegam ao destino n a partir de m origens possíveis.

Adicionalmente, as matrizes O/D podem ser classificadas segundo:

- Motivo de viagem: viagens para o trabalho, para a escola, para as compras, para lazer, outras;
- Período de tempo: por dia, hora, etc.;
- Segundo o tipo de utilizador: nível de vida, estrutura familiar, outros;
- Modo de transporte: transporte individual, transporte público e transporte intermodal.

Segundo Martins (2009), o interesse de desagregação das matrizes O/D em função de vários fatores, prende-se com aquilo a que se chama *segmentação à priori*, ou seja, admite-se que o comportamento em viagem dos utilizadores é à partida em termos médios, diferenciado em função dos fatores enunciados. Assim, isolados à priori, consegue-se estudar melhor as ações/reações dos vários segmentos. Por outro lado, quanto mais se segmenta, mais recursos são necessários para caracterizar as matrizes O/D e o grau de incerteza associado a essas mesmas matrizes é maior.

As formulações matemáticas mais comuns no modelo de geração de viagens são: Fatores de Crescimento, Modelos de Regressão, Taxas de Viagem e Classificação Cruzada ou análise de categorias.

### **2.3.1.1 Método dos Fatores de Crescimento**

Segundo Campos (2007) este método determina o número de viagens futuras por zona em função de variáveis que têm influência na geração das mesmas, sendo que é um modelo que trabalha com dados agregados.

$$T_i = F_i \times t_i$$

**Equação 1: Método dos Fatores de Crescimento - fórmula geral**

Em que:

- $T_i$  – Número de viagens futuras na zona i;
- $F_i$  – Fator de crescimento;
- $t_i$  – Número de viagens do ano base na zona i.



O único problema deste método é estimar o valor de  $F_i$ . Normalmente este fator está relacionado com variáveis tais como: a população (P), a renda (R) e a propriedade de veículos (C) (ORTÚZAR & WILLUMSEN, 2011):

$$F_i = \frac{f(P_i^d \times R_i^d \times C_i^d)}{f(P_i^c \times R_i^c \times C_i^c)}$$

**Equação 2: Método dos Fatores de Crescimento – estimação de  $F_i$**

Em que:

- c, d – Valores atuais e futuros;
- f - Pode ser uma função multiplicativa direta sem parâmetros.

Este método não é muito utilizado, pelo que deve ser aplicado apenas em planos de curto prazo, quando não for possível a utilização de outro método. Deve ser utilizado preferencialmente na previsão do número de viagens futuras externas para uma zona (ORTÚZAR & WILLUMSEN, 2011).

### **2.3.1.2 Modelos de Regressão**

Segundo Ortúzar & Willumsen (2011), a utilização deste método visa construir uma relação linear entre o número de viagens geradas (variável dependente) e os vários fatores que influenciam essas viagens (variáveis independentes).

A forma mais frequente é o modelo de regressão linear múltipla, em que é feita uma tentativa de encontrar uma relação linear entre o número de viagens produzidas ou atraídas pela zona e as características socioeconómicas das zonas.

$$Y_i = \theta_0 + \theta_1 \times X_1 + \theta_2 \times X_2 + \dots + \theta_n \times X_n + E_i$$

**Equação 3: Modelo de regressão linear múltipla**

Em que:

- $Y_i$  – Variável dependente das variações de x;
- $x_n$  – Variáveis independentes relacionadas, por exemplo, com fatores socioeconómicos e de uso do solo;
- $a_n$  – Coeficientes das respetivas variáveis independentes.

A análise de regressão linear múltipla é uma técnica muito usada quando se quer estimar a geração futura de viagens, na qual se considera a influência de dois ou mais fatores independentes, agindo simultaneamente e com reflexos no total de viagens.

### 2.3.1.3 Modelo das Taxas de Viagens

Este método determina o número de viagens pelo tipo de ocupação do solo. Para cada tipo de ocupação do solo está associada uma taxa de produção e/ou atração de viagens. Sendo que esta taxa relaciona o número de viagens por unidade de área construída ou de utilização do solo por atividade (CAMPOS, 2007).

De acordo com a possibilidade de pesquisa dos dados podem-se obter várias taxas que englobam um maior número de atividades desagregadas.

Segundo Gasparini, Campos & D'Agosto (2010), foi apresentado por Keefer (1960) um exemplo das taxas de geração de viagens por categoria de ocupação do solo para a cidade de Pittsburgh (Estados Unidos da América), conforme se apresenta no quadro seguinte.

**Quadro 2: Taxas de Geração de Viagens para diferentes tipos de ocupação do solo (Viagens/1.000m<sup>2</sup>)**

Uso do Solo	Taxa
Residencial	2,4
Comercial/Retalhista	8,1
Comercial/Serviços	5,2
Comercial/Grossistas	1,2
Indústria	1,0
Transportes	4,0
Serviço Público	3,4

Os valores do quadro acima foram estimados a partir de inquéritos em larga escala sobre a quantidade de viagens geradas em cada atividade, dividida pela área de ocupação de cada uma, no ano base.

A título ilustrativo apresenta-se um exemplo muito simples, obtido com base nos valores da tabela acima e considerando uma zona residencial que tenha aproximadamente 1.200.000 m<sup>2</sup> e 2.900.000 m<sup>2</sup> de lojas comerciais, 1.555.000 m<sup>2</sup> de prestação de serviços, 850.000 m<sup>2</sup> de serviço público e 855.000 m<sup>2</sup> de transportes, estima-se que a quantidade de viagens geradas será:

$$T = 1.200 \times 2,4 + 2.900 \times 8,1 + 1.555 \times 5,2 + 850 \times 3,9 + 855 \times 4,0 = 41.191 \text{ viagens/dia}$$

A projeção da futura área ocupada para cada atividade é feita através de métodos estatísticos, ou seja, exógenos ao modelo.

### 2.3.1.4 Modelo de Classificação Cruzada ou Análise de Categorias

Este modelo pode ser entendido como uma extensão dos modelos de taxas de viagens, utilizando, neste caso, características desagregadas por tipo de residência, isto é, utilizam-se dados dos agregados familiares, em vez de se utilizarem as características das zonas.

É baseado na estimativa da resposta (por exemplo, o número de viagens por agregado familiar com um determinado objetivo) em função dos atributos de uso doméstico. O pressuposto básico é que as taxas de geração de viagem são relativamente estáveis ao longo do tempo para certas estratificações domésticas (ORTÚZAR & WILLUMSEN, 2011).

O método encontra essas taxas empiricamente e para isso precisa de grandes quantidades de dados, sendo que o elemento crítico é o número de famílias em cada classe.

Embora o método tenha sido concebido, originalmente, para usar dados dos censos do Reino Unido, o problema que permanece na abordagem continua a ser a necessidade de prever o número de famílias no futuro (ORTÚZAR & WILLUMSEN, 2011).

As taxas de viagens associadas a cada categoria são estimadas por métodos estatísticos e assume-se que são constantes no tempo, sendo que, são obtidas a partir dos dados do ano base.

$$t_h^p = \frac{T_h^p}{H_h}$$

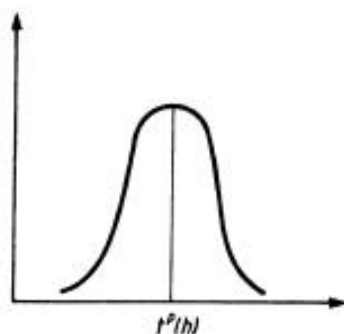
**Equação 4: Modelo de classificação cruzada - número total de viagens para cada categoria**

Em que:

- $t_h^p$  – Taxa de geração de viagens por categoria h (dados do ano base);
- $T_h^p$  – Número total de viagens para cada categoria;
- $H_h$  - Número total de famílias.

As viagens futuras são estimadas a partir da projeção (exógena ao modelo) do número de residências por categoria, em cada zona residencial, multiplicada pela taxa respetiva da categoria.

Segundo Ortúzar & Willumsen (2011), a “arte” deste método reside na escolha de categorias de tal forma que, os desvios padrões das distribuições de frequência sejam mínimos (Figura 5).



**Figura 5: Distribuição da taxa de viagem por tipo de família**

*Fonte: Adaptado de Ortúzar & Willumsen, 2011*

### 2.3.2 Modelos de distribuição de viagens

Segundo Campos (2007), o principal objetivo dos modelos de distribuição é estimar o número de viagens entre pares de zonas – pares O/D – criando assim uma matriz de fluxos (matriz O/D). O fundamento deste modelo é a informação sobre o número global de viagens ‘produzidas’ e ‘atraídas’ por cada ZAT, no ano base e no ano horizonte do planeamento. As estimativas são obtidas com base em projeções futuras das variáveis base relacionadas com usos de solos, demografia e desenvolvimento económico.

O modelo de geração de viagens fornece os totais das viagens produzidas ( $P_i$ ) e de viagens atraídas ( $A_j$ ) por ZAT. Considerando-se que a área em estudo é dividida em  $n$  ZAT, o modelo de distribuição de viagens calcula a parcela destas viagens ( $t_{ij}$ ) entre as várias zonas de tráfego ( $i, j$ ), (CAMPOS, 2007).

As células de cada linha  $i$  correspondem às viagens produzidas, que têm como destino as zonas das colunas correspondentes. A diagonal principal corresponde às viagens intra-zona, ou seja, todas as viagens ocorridas dentro da zona. Portanto,  $T_{ij}$  representa o número de viagens entre a origem  $i$  e o destino  $j$ ;  $O_i$  é o número de viagens com origem na zona  $i$  e  $D_j$  é o número de viagens com destino na zona  $j$ . E a matriz total é representada por  $\{T_{ij}\}$  ou por  $T$ .

Quadro 3: A forma geral de uma matriz de viagem bidimensional

Origem	Destino					
	1	2	3	...	j	$\Sigma T_{ij}$
1	$T_{11}$	$T_{12}$	$T_{13}$	...	$T_{1j}$	$O_1$
2	$T_{21}$	$T_{22}$	$T_{23}$	...	$T_{2j}$	$O_2$
3	$T_{31}$	$T_{32}$	$T_{33}$	...	$T_{3j}$	$O_3$
...	...	...	...	...	...	...
i	$T_{i1}$	$T_{i2}$	$T_{i3}$	...	$T_{ij}$	$O_i$
$\Sigma T_{ij}$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	...	$D_j$	$\Sigma T_{ij} = T$

Fonte: Adaptado de Ortúzar & Willumsen (2011)

Os modelos de distribuição de viagens podem ser divididos em dois grupos de métodos: métodos analógicos ou de fatores de crescimento (Fator Uniforme; Fator Médio e Fratar) nos quais os fatores de crescimento são aplicados aos movimentos interzonais atuais, ou métodos sintéticos (Modelo Gravitacional; Modelo de Oportunidades; Modelo Eletrostático; Técnica de Regressão Linear Múltipla e Programação Linear) nos quais é feita uma tentativa de se estender a relação causal associada aos movimentos, considerando-os como sendo similares a certas leis de comportamento físico.

### 2.3.2.1 Métodos analógicos ou dos Fatores de Crescimento

Estes métodos iniciam-se com uma matriz O/D de viagens conhecida no ano base e são utilizados para estimar matrizes O/D de viagens futuras.

Segundo de Ortúzar & Willumsen (2011), os modelos de fator de crescimento têm a seguinte forma geral:

$$T_{ij} = \tau \times t_{ij}$$

#### Equação 5: Modelos dos Fatores de Crescimento

Em que:

- $T_{ij}$  – Número de viagens futuras entre as zonas i e j;
- $\tau$  – Fator de crescimento ou expansão;
- $t_{ij}$  – Número de viagens atuais entre as zonas i e j.

Apresenta-se o exemplo de aplicação do modelo dos Fatores de Crescimento Uniforme baseado no crescimento dos fatores de produção (origens). Ilustra-se o cálculo desses fatores no Quadro 5.

**Quadro 4: Exemplo de uma matriz O/D atual**

O/D	1	2	3	Viagens atraídas $t_{ij}$	Viagens futuras $T_{ij}$
1	-	20	10	30	60
2	20	-	5	25	75
3	10	5	-	15	15

**Quadro 5: Cálculo do fator de crescimento da matriz O/D**

Fator de crescimento	$\tau_{ij} = \frac{T_{ij}}{t_{ij}}$
$\tau_1$	$\frac{60}{30} = 2$
$\tau_2$	$\frac{75}{25} = 3$
$\tau_3$	$\frac{15}{15} = 1$

Estes métodos são simples de entender. Mas tem como desvantagens manter e ampliar os erros da matriz base, por exemplo, pares de zonas sem viagens, e não tem em conta as alterações dos custos das viagens.

### **2.3.2.2 Métodos sintéticos – Modelo gravitacional**

Este trabalho só se irá debruçar sobre o Modelo Gravitacional, que é o método sintético mais utilizado e que permite obter melhores resultados.

O modelo gravitacional tem como base conceptual a lei gravitacional de Newton, que diz: “a força de atração entre dois corpos é diretamente proporcional ao produto das massas destes e inversamente proporcional ao quadrado das distâncias entre eles.”

Segundo Campos (2007) a aplicação deste método aos modelos de transportes considera que o número de viagens produzidas pela ZAT<sub>i</sub> e atraídas pela ZAT<sub>j</sub> é diretamente proporcional ao número total de viagens produzidas na zona *i* e ao número total de viagens atraídas pela zona *j*.

Considerando também, que o número de viagens produzidas pela zona *i* e atraídas pela zona *j* é inversamente proporcional ao fator de impedância ou resistência. A impedância pode ser considerada através de uma variável ou por um conjunto de variáveis, como por

exemplo, a distância, o tempo de viagem ou o custo de transporte. Quando é definida por um conjunto de variáveis denomina-se por custo generalizado (CAMPOS, 2007).

A vantagem deste método é que considera, além da atração, o efeito da separação espacial ou facilidade de interação entre as regiões, definida através da função de impedância.

Por analogia à Lei de Newton e segundo Ortúzar & Willumsen (2011) a equação clássica do Modelo Gravitacional toma a seguinte forma:

$$T_{ij} = \alpha \times \frac{P_i \times P_j}{d_{ij}^c}$$

**Equação 6: Equação clássica do Modelo Gravitacional**

Onde:

- $T_{ij}$  - Número de viagens com origem em  $i$  e destino em  $j$ ;
- $\alpha, c$  – Parâmetros de calibração do modelo;
- $P_i$  - Total de viagens produzidas pela zona  $i$ ;
- $P_j$  - Total de viagens atraídas pela zona  $j$ ;
- $d$  – Fator de impedância ou resistência entre a zona  $i$  e a zona  $j$ .

Segundo Silva (2007) o modelo gravitacional é de fácil compreensão mas possui algumas dificuldades de “reprodução da realidade”, segundo os seguintes fatores:

- Com a distância a diminuição da atração está longe de ser igual para os vários motivos de viagem e estratos sociais;
- A atitude das pessoas é marcada pelos seus próprios hábitos que deixam de ser racionais face às localizações atuais (por conhecerem melhor o território numas zonas do que noutras).

Contudo este é o modelo mais utilizado para o passo de distribuição. Adicionalmente, Ortúzar & Willumsen (2011) consideram este modelo o mais fácil de entender, de entre os modelos de distribuição. Este modelo tem a vantagem de estimar as viagens para cada célula da matriz O/D sem utilizar diretamente uma matriz observada. E tem a desvantagem de necessitar de um considerável número de ajustamentos e manipulações para a obtenção de um resultado satisfatório e a não garantia de que os fatores socioeconómicos e os fatores relacionados com os tempos de viagem sejam válidos no futuro.

### 2.3.3 Modelos de repartição modal

Segundo Campos (2007), o objetivo dos modelos de repartição modal é definir quais as quantidades de viagens nos vários modos de transporte entre as zonas de tráfego.

Como seguimento do processo de distribuição de viagens, utiliza-se os estes modelos para “dividir” a matriz O/D global de viagens em matrizes O/D por modo (ou motivo ou período) de viagem.

Segundo Martins (2009), estes modelos tentam “identificar, estimar e simular os comportamentos dos viajantes” acerca das suas decisões de escolha do modo de transporte. Considerando que os viajantes são compradores de um serviço que, neste caso, é a viagem, estes tipos de modelos enquadram-se nos modelos comportamentais de análise do indivíduo, enquanto consumidor de bens e serviços, tendo por isso uma estreita ligação com a economia comportamental.

As escolhas das viagens variam em função do tipo de indivíduo, tipo de viagem, nível e qualidade de serviço e custo, quer em tempo, quer em preço. As escolhas dos indivíduos feitas com base nas suas variáveis de decisão intrínsecas, transformam-se geralmente num padrão de repartição modal relativamente constante, principalmente nas viagens cíclicas, que só é alterado quando surgem variações significativas nas condições base que suportam as decisões iniciais. Nesse caso, os padrões, são reformulados num processo de decisão que tem em conta as novas variáveis (MARTINS, 2009).

A repartição modal é feita com base nas variáveis consideradas fundamentais para a escolha do utilizador. Os fatores que influenciam este modelo incluem características socioeconómicas (renda, propriedade de veículos) e as características de serviços dos modos de transporte, considerando as seguintes características (ORTÚZAR & WILLUMSEN, 2011):

- Características associadas ao viajante: propriedade de veículos, rendimento, estrutura familiar e nível cultural;
- Características da viagem: motivo da viagem, hora da viagem e destino;
- Características associadas ao meio de transporte: tempo de viagem e custos associados, tempo de espera e frequência do serviço, conforto, acessibilidade e segurança.

Existem dois tipos de modelos de repartição modal: os modelos determinísticos e os modelos probabilísticos.



### 2.3.3.1 Modelos determinísticos

Segundo Martins (2009), estes modelos determinam a quantidade de viagens por cada modo de transporte através de métodos quantitativos, tais como: Regressão Linear, Classificação Cruzada ou Curvas de Desvio.

#### **Modelo de Regressão Linear**

Estes modelos executam a distribuição modal de forma agregada. Determina-se a quantidade de viagens por transporte individual (TI) ou por transporte público (TP) através do número de viagens e das características socioeconómicas dos viajantes (CARDOSO, 2010).

$$Y_i = \theta_0 + \theta_1 \times X_{1i} + \theta_2 \times X_{2i} + \dots + \theta_n \times X_{ni} + E_i$$

**Equação 7: Modelo de Regressão Linear**

Em que:

- $Y_i$  – Número de viagens num determinado modo de transporte  $i$  (Variável dependente);
- $X_{ni}$  – Fatores socio económicos (Variável independente);
- $\theta_n$  – Parâmetros estimados pelo modelo.

#### **Classificação Cruzada**

Este método tenta repartir a população ou zonas de tráfego em grupos homogéneos. Sendo que estes grupos podem ser classificados de acordo com as características do viajante ou com as características dos modos (CARDOSO, 2010).

Segundo Campos (2007), para cada grupo homogéneo obtém-se um valor médio percentual de utilização de cada modo de transporte. Sendo que estes valores são obtidos através de pesquisas ou estimativas feitas com modelos de regressão ou ainda utilizando modelos de escolha discreta (Logit). Nestes modelos considera-se que as percentagens de utilização permanecerão constantes para cada grupo.

#### **Curvas de Desvio**

Estes modelos, atualmente em desuso, determinam a quantidade de viagens entre modos de transporte, através de curvas que relacionam a percentagem de utilização de cada modo com parâmetros (tempo, custo, nível de serviço e rendimento do utilizador) (CARDOSO, 2010).

Segundo Cardoso (2010), estes modelos utilizam o método de regressão para chegar à quantidade de viagens entre os modos de transporte.

### **2.3.3.2 Modelos probabilísticos**

Segundo Campos (2007), estes modelos relacionam a fração de viagem destinada a cada modo com a probabilidade de escolha de cada um. A probabilidade de um utilizador escolher uma alternativa depende da atratividade dessa alternativa, em relação às outras (ORTÚZAR & WILLUMSEN, 2011).

Os modelos deste género mais divulgados assentam no uso de funções de Utilidade ou Desutilidade. Destes destacam-se em termos de uso profissional os mais simples e fiáveis, como os modelos Logit Binários ou Binomiais e os modelo Logit Multimodais.

#### **Funções de Utilidade ou Desutilidade**

Segundo Cardoso (2010), uma Função de Utilidade é uma expressão matemática que estabelece o grau de satisfação do usuário do transporte relativamente às suas escolhas.

$$U = a_0 + a_1 \times x_1 + a_2 \times x_2 + \dots + a_n \times x_n$$

**Equação 8: Funções de Utilidade**

Em que:

- U – Utilidade derivada da escolha dos atributos;
- $a_0$  – Coeficiente independente;
- $x_n$  – Atributos.

Os atributos podem ser: custo e tempo de viagem, tempo de espera e algumas derivações destes.

A utilidade pode ser positiva, negativa ou nula. Quando é negativa é considerada uma desutilidade.

#### **Modelo Logit Multinomial**

Segundo Ortúzar & Willumsen (2011), este é o modelo de escolha discreta mais popular. Sendo que determina a quantidade de viagens por cada modo de transporte:

$$P(k) = \frac{e^{U_k}}{\sum_x e^{U_x}}$$

**Equação 9: Modelo Logit Multinomial**

Em que:

- $P(k)$  – Probabilidade de escolha do modo  $k$ ;
- $k$  – Um modo de transporte;
- $x$  – Todos os modos concorrentes;
- $U_x$  – Utilidade do modo de transporte  $x$ .

### **Modelo Logit Binário ou Binomial**

Este modelo é uma simplificação do Modelo Logit Multinomial, no qual se avalia apenas duas alternativas de transporte.

Considerando-se a distribuição de viagens entre dois modos A e B, e as utilidades relativas dos mesmos como sendo  $U_A$  e  $U_B$ , respetivamente, com a seguinte expressão:

$$p(A) = \frac{1}{1 + e^{U_B - U_A}}$$

**Equação 10: Modelo Logit Binário ou Binomial**

Em que:

- $p(A)$  – Probabilidade de escolha do modo A;
- $p(B) = 1 - p(A)$ .

## **2.3.4 Modelos de afetação de tráfego**

### **2.3.4.1 Caracterização dos modelos de afetação de tráfego**

Depois de caracterizadas as matrizes O/D dos vários modos de transporte passa-se para o último passo da modelação o qual corresponde a afetação da matriz O/D (do tráfego) à rede.

Este processo consiste na simulação das decisões dos utilizadores associadas à escolha do percurso nas deslocações efetuadas num dado modo de transporte (TAVARES, 2003).

Segundo Martins (2009) na afetação de tráfego já são conhecidos os fluxos de viajantes entre cada par O/D e em cada modo de transporte, tendo-se assim que estimar o modo de repartição desses viajantes pelos vários caminhos possíveis. Conseguindo-se assim, determinar qual o volume de tráfego em cada caminho, por modo de transporte.

Segundo Ortúzar & Willumsen (2011), os principais objetivos deste modelo dividem-se em duas áreas:

- Primária: obter estimativas de variáveis agregadas da rede (fluxo nas autoestradas, receita dos serviços de transportes públicos); dos custos de viagens entre zonas num determinado nível de procura; de volumes de tráfego e identificar zonas de congestionamento;
- Secundária: analisar quais os pares O/D que utilizam um dado arco ou percurso; estimar os percursos utilizados entre cada par O/D; obter os movimentos de viragem futuros.

A afetação da matriz O/D pode ser feita de acordo com vários algoritmos, com diferentes sofisticções e campos de aplicação.

**Quadro 6: Relação velocidade/algoritmos**

Sem autocorreção de velocidades	Com autocorreção de velocidades
Tudo ou Nada	Wardrop ou de Equilíbrio
Estocástico	Incremental

*Fonte: Adaptado de Martins, 2009*

O algoritmo “Tudo ou Nada” assume que não existe efeitos do congestionamento e que todas as escolhas de caminhos têm em consideração os mesmos atributos. A ausência do efeito do congestionamento significa que os custos dos arcos da rede são fixos (ORTÚZAR & WILLUMSEN, 2011).

Segundo Martins (2009), este algoritmo considera que todo o tráfego que entra numa zona de origem  $i$  e saia numa zona de destino  $j$  utiliza um só caminho, à partida o de custo mais baixo, ficando assim os outros caminhos vazios.

Segundo Tavares (2003) o algoritmo “Estocástico” permite modelar situações em que os utilizadores tenham diferentes perceções dos custos de viagem, que são descritas através de variáveis aleatórias. Este também não considera os efeitos de congestionamento. Este algoritmo de afetação de tráfego salienta a instabilidade na perceção dos utilizadores nos custos e na medida composta por estes procuram minimizar, por exemplo a distância, o tempo de viagem e os custos generalizados (ORTÚZAR & WILLUMSEN, 2011).

No processo de seleção de percursos, existe uma necessidade de juntar um conceito matemático, introduzido por Wardrop (1952), que permite atingir uma solução de equilíbrio. Os métodos baseados na teoria do equilíbrio de Wardrop procuram fazer com que a afetação do tráfego percorra uma tendência mais realista, procurando mostrar a variação do fluxo ao longo do tempo (TAVARES, 2003).

Considerando que todos os utilizadores da rede compreendem o seu “custo” da mesma forma e que têm um conhecimento total da rede, representa-se assim o “1º Princípio de Wardrop”, mais conhecido por *Equilíbrio Determinístico*.

*“Em condições de equilíbrio o tráfego em redes congestionadas distribui-se de modo a que todos os percursos entre um par de zonas OD têm um custo igual e mínimo enquanto que todos os percursos não utilizados têm custos maiores ou iguais.”*

Segundo Ortúzar & Willumsen (2011), é fácil de ver que, se estas condições não se realizassem, alguns utilizadores seriam capazes de reduzir os seus custos alternando as suas rotas.

O *Equilíbrio Determinístico* baseia-se num modelo incremental de afetação dos dados das viagens, fazendo com que o utilizador escolha um de dois caminhos com a mesma impedância. Considera-se que se está numa situação de equilíbrio quando não é possível ao utilizador diminuir o seu tempo de percurso sem intervenções exteriores sobre as quais não tem capacidade de decisão (RAMOS, 2008).

Conclui-se assim, que os métodos determinísticos consideram que todos os utilizadores têm a mesma perceção dos custos de viagem.

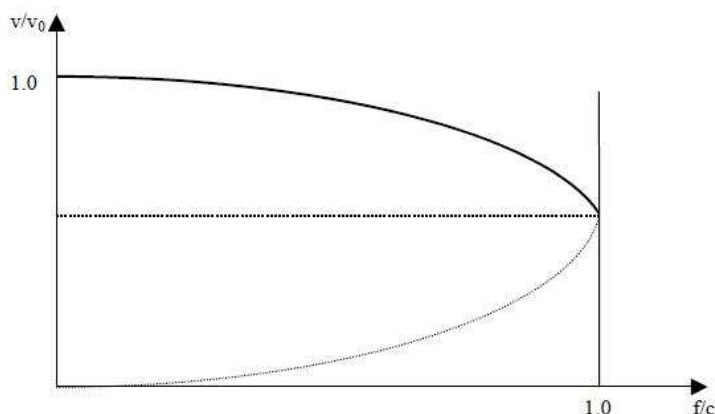
Wardrop (1952) propôs uma alternativa de afetação de tráfego, considerando-se como o “2º Princípio de Wardrop”:

*“Em condições de equilíbrio o tráfego em redes congestionadas distribui-se de tal forma que o custo médio (ou total) da viagem é minimizado.”*

Para que o objetivo da afetação seja realizado, é preciso proceder à afetação de uma matriz de viagens O/D à rede, através do qual o modelo precisa de determinar quais os percursos a utilizar entre cada par de zonas. Logo, existe a necessidade de definir uma medida de comparação entre as várias opções de ligações entre cada par de zonas de forma a determinar o(s) caminho(s) mais curto(s) (TAVARES, 2003).

Segundo Ortúzar & Willumsen (2011), este é um princípio de construção, sendo direccionado para o planeamento de transportes, tentando-se fazer a gestão do tráfego de forma a minimizar os custos de viagem e, portanto, para alcançar um equilíbrio social.

Por seu lado, os algoritmos “incremental” e “por equilíbrio” reconhecem o problema do congestionamento, tirando assim partido do “Diagrama Fundamental da Engenharia de Tráfego”, que relaciona a velocidade de circulação em cada eixo com a quantidade de fluxo que lhe seja atribuída.



**Figura 6: Diagrama Fundamental da Engenharia de Tráfego**

Segundo Ortúzar & Willumsen (2011), a afetação incremental é uma abordagem mais interessante e realista. O modelador divide a matriz total das viagens  $T$ , num certo número de matrizes fracionadas através de um conjunto de fatores proporcionais  $p_n$ , de tal modo que  $\sum_n p_n = 1$ . As matrizes fracionadas são carregadas, incrementalmente, cada uma é calculada utilizando os custos dos arcos, dos últimos fluxos acumulados.

Os volumes de tráfego provenientes das afetações são acumulados aos das afetações anteriores. As matrizes fracionadas têm que ser de dimensões decrescentes, visto a curva de variação da velocidade ter um declive negativo, crescente à medida que se aproxima da capacidade do arco (VIEGAS, 2010).

É um algoritmo muito fácil de programar e dá resultados aceitáveis, os seus resultados podem ser interpretados como a acumulação do congestionamento para o período de ponta (ORTÚZAR & WILLUMSEN, 2011).

## 2.4 Súpula do capítulo

A acessibilidade pode ser definida como a facilidade de alcançar bens, serviços, atividades e destinos (oportunidades) e definida em termos potenciais (oportunidades que podem ser alcançadas) ou em termos reais (oportunidades que realmente são alcançadas).

A mobilidade refere-se ao fluxo de pessoas ou bens em si e assume que qualquer aumento da capacidade da rede viária ou da velocidade de circulação favorece a mobilidade e, indiretamente, a sociedade.

O planeamento de transportes é uma área de estudo que visa adequar as necessidades de transportes de uma região ao seu desenvolvimento de acordo com as suas características estruturais, envolvendo, portanto, a implementação de novos sistemas ou a melhoria dos sistemas já existentes. Um planeamento de transportes eficaz resulta na criação de serviços de transporte com qualidade e a um custo razoável.

O modelo fundamental para o planeamento de transportes é o Modelo dos Quatro Passos: *produção/atração*, em que se estima quantas viagens são iniciadas e/ou concluídas em cada Zona de Análise de Tráfego (ZAT); *distribuição*, em que se estima o modo como as viagens de cada origem se repartem pelos vários destinos, ou vice-versa; *repartição modal*, em que se estima como é que as viagens realizadas entre cada par de ZAT se repartem pelos diferentes modos disponíveis para essa ligação, e *afetação de tráfego*, na qual se calculam os caminhos das viagens realizadas entre cada um dos pares O/D e em cada um dos vários modos de transporte disponíveis, tendo em atenção as redes de cada um desses modos e, eventualmente, os seus níveis de congestionamento decorrentes das escolhas dos outros viajantes.

Este capítulo focou-se também na variante clássica do Modelo dos Quatro Passos aplicado ao planeamento rodoviário. Nos próximos capítulos será dada ênfase à construção do modelo, com especial enfoque na geração da matriz O/D (correspondente aos primeiro e segundo passo da formulação clássica) e à construção do modelo de rede e correspondente afetação de tráfego – equivalente ao quarto passo da formulação clássica. Na análise só será considerado tráfego rodoviário, pelo que o (terceiro) passo - escolha modal – não será abordado.





## 3. Construção de um modelo de análise

### 3.1 Introdução

A construção de um modelo inicia-se pela tomada de decisões relativamente à definição do nível de detalhe e conseqüente recolha e compilação da informação necessária para um bom desempenho do mesmo. Depois da formulação do problema e da obtenção de todos os dados necessários é assim possível proceder-se à codificação da rede, ou seja, ao tratamento dos dados de forma a serem suscetíveis de interpretação de uma forma automática (TAVARES, 2003).

Tendo em consideração a rede a modelar, a tomada de decisão pode ser auxiliada através da análise crítica às respostas ao conjunto das três questões a seguir mencionadas (HMSO, 1996 e 1991; FHWA, 1983 in TAVARES, 2003):

1. Qual o objetivo do modelo? Neste ponto deverá ser definida qual a escala da rede (regional, urbana, nacional, etc.) bem como as infraestruturas e o modo de transporte a analisar.
2. Qual o tipo de informação que está disponível ou pode vir a ser disponibilizada? A disponibilidade de dados relativamente ao funcionamento da rede (tráfego, níveis de serviço, gestão, controlo), ou aos dados geográficos e socioeconómicos para a caracterização da procura.
3. Qual o tempo e os recursos disponíveis? A construção de um modelo a partir do “nada” pode influenciar a dimensão da rede a analisar.

Na análise também é importante ter em atenção qual o *software* de cálculo disponível e possível de ser utilizado tendo em conta os objetivos propostos, bem como as especificações do mesmo relativamente aos dados necessários.

Posteriormente, pode então começar-se o desenvolvimento do modelo, que se inicia com a definição do zonamento e a seleção dos arcos e nós que constituirão a rede.

É de salientar que a seleção da rede a modelar e o zonamento se encontram relacionados, visto que existe uma ligação direta entre estes dois aspetos, sem esquecer os objetivos da afetação. Assim, os mesmos devem ser estabelecidos de forma a

permitirem um dimensionamento eficiente para que o objetivo final previamente fixado seja cumprido.

Uma vez definido o nível de detalhe do modelo deve proceder-se à codificação da rede de modo a possibilitar o processamento e a sua análise, através do cálculo automático. A codificação consiste na identificação de todos os arcos que constituem a rede selecionada, bem como na definição dos seus atributos, sendo esta indispensável para a simulação das condições de funcionamento da rede em si.

Após a codificação da rede é necessário determinar os vários custos associados (valor do tempo e custo operacional), os coeficientes relativamente a cada tipo de via para a definição da função de degradação da velocidade e associá-los a cada tipo de arco, para que seja possível fazer a afetação do tráfego de forma adequada.

Por último é necessário proceder-se a um detalhado processo de calibração, tentando corrigir-se os erros de codificação e minimizar os de previsão. Após a calibração do modelo pode então proceder-se à validação do mesmo para se poder garantir que se está perante um modelo com capacidade para a realização dos estudos definidos (TAVARES, 2003).

No caso concreto deste trabalho, após a obtenção de toda a informação, esta será introduzida no *software* de análise de sistemas de transportes escolhido e através das suas ferramentas específicas (cuja utilização será descrita neste capítulo), proceder-se-á à afetação do tráfego (gerado através da matriz O/D) à rede, fazendo-se a análise das características funcionais dessa afetação em função de um conjunto de parâmetros calculados, como a saturação, velocidade de circulação ou o nível de serviço.

### **3.2 Ferramenta de análise - VISUM**

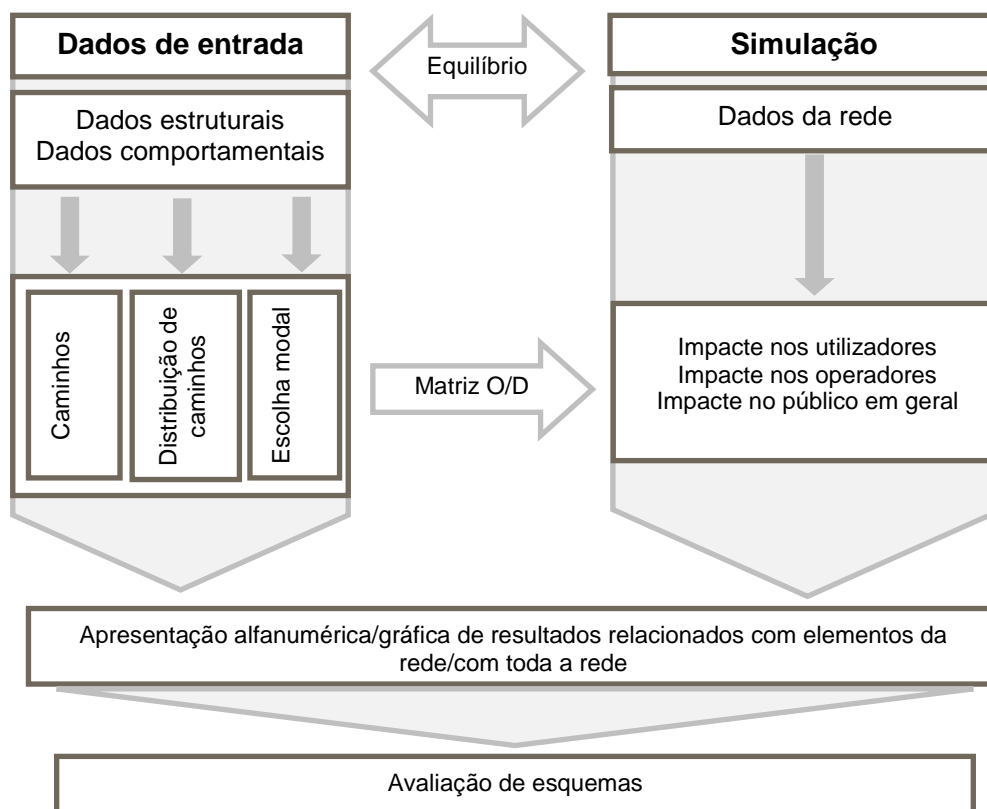
Existem vários *softwares* no mercado que permitem fazer análises de afetação de tráfego, tendo-se neste caso optado pelo *software* VISUM, devido às vantagens deste em vários aspetos, nomeadamente na facilidade de aprendizagem, à garantia da qualidade dos resultados e ao apoio técnico que foi gentilmente disponibilizado.

O VISUM é um *software* criado pela PTV – *Planung Transport Verkehr* AG, para o apoio à análise e planeamento de redes de transportes, possibilitando o estudo de mais do que um sistema de transporte em simultâneo, uma vez que abrange o transporte público e privado.

De acordo com a revisão da literatura de apoio ao VISUM, o programa permite efetuar a simulação estática do comportamento da procura de transportes na sua utilização de uma ou várias redes, existentes ou em fase de projeto. Esta análise efetua-se através da criação de “pontos de injeção” do tráfego, os centróides, a partir dos quais este se distribui de acordo com a oferta de vias existentes e com os destinos pretendidos, em resultado da execução dos algoritmos de afetação escolhidos. O VISUM é também reconhecido pela boa interface gráfica que disponibiliza ao utilizador e possui um número vasto de ferramentas que permitem efetuar variadíssimas análises, das quais a análise de afetação apresentada é um subconjunto (VISUM 11.5 BASIC, 2010).

O objetivo principal da análise de afetação de tráfego é calcular fluxos de veículos e passageiros nas redes de tráfego, incluindo a interação entre transportes públicos e privados, ajudando à construção de cidades sustentáveis com base no desenvolvimento de modelos de transportes correntemente utilizados na conceção e avaliação de sistemas de dimensão considerável e abrangência multimodal (VISUM 11.5 BASIC, 2010).

A estrutura de funcionamento dos modelos desenvolvidos no VISUM tem por base o seguinte esquema:



**Figura 7: Estrutura de funcionamento do VISUM**

*Fonte: Adaptado de VISUM 11.5 BASIC, 2010*

Nas próximas subsecções descrevem-se algumas das características da ferramenta VISUM.

### **3.2.1 Noções fundamentais associadas ao Zonamento**

Na construção de um modelo o primeiro passo é o *zonamento* da área do território no qual se vai realizar o estudo, ou seja, a definição do sistema de zonas, tarefa essa de grande relevância, uma vez que é a base para a representação das origens e destinos das viagens e dos fluxos da matriz O/D (TAVARES, 2003).

O zonamento consiste numa divisão do território em zonas com determinadas características espaciais e de ligação destas à rede de transportes. As zonas devem ser homogéneas em termos socioeconómicos e devem representar todas as origens e destinos com tráfego significativo.

O conceito de zona resulta da impossibilidade de representar cada habitação, cada lugar de trabalho, lugar de comércio ou qualquer outra atividade geradora de viagens como um ponto isolado de origem e/ou destino de viagens. Assim, estas entidades são agregadas em zonas, sendo as viagens “transferidas” para a rede de transportes através do “centro de mobilidade” da zona, designado *centróide*, que “concentra” essa distribuição das viagens que partem ou chegam às zonas (TAVARES, 2003).

Relativamente aos centróides, estes devem ser localizados no já referido “centro de mobilidade” de cada zona. No presente trabalho, e por uma questão de simplificação, tendo em consideração a escala nacional do modelo proposto, os centróides foram definidos com base nas sedes do concelho. As suas ligações com a rede são de extrema importância uma vez que têm influência na seleção dos percursos e nos volumes de tráfego nos arcos, visto que coincidem com as origens e destinos das viagens.

Sempre que possível as ligações dos centróides à rede devem ser efetuadas nos arcos com nível hierárquico mais baixo, evitando efetuar-se ligações nas intersecções importantes, nos arcos com nível hierárquico elevado e que possam constituir um caminho alternativo. Desta forma, o tráfego modelado consegue fluir na rede e assim haver uma maior distribuição do mesmo, o que leva à diferente escolha de caminhos, sendo esta a situação mais próxima da realidade.

A definição de zonas e das suas ligações à rede, ou seja, da ligação dos centróides aos arcos ou aos nós, é de extrema importância uma vez que pode ter uma grande influência nos resultados finais do modelo. Por este motivo, a conceção da rede requer o

conhecimento do seu funcionamento, devendo ser devidamente testada, de modo a minimizar os erros de agregação/simplificação associados aos conceitos acima expostos.

### 3.2.2 Elementos da Rede

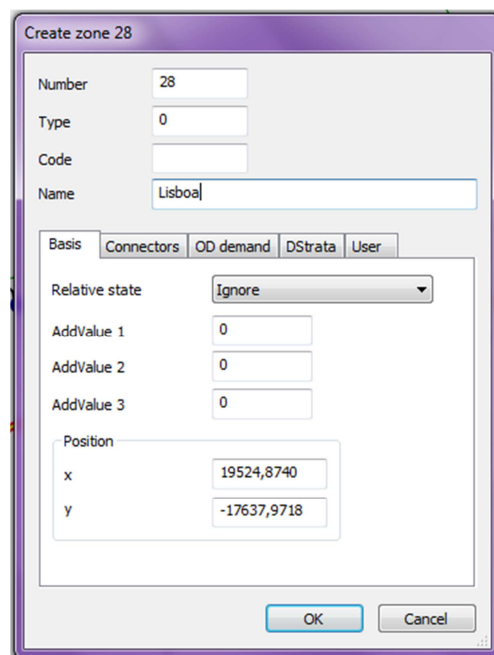
Para a conceção de uma rede no VISUM é indispensável o conhecimento dos termos utilizados pelo programa para cada um dos seus diversos elementos.

Apesar de o programa possibilitar a utilização de muitas outras funcionalidades, muitas delas não foram contempladas neste estudo por não serem necessárias para os objetivos propostos. Foram utilizados quatro elementos de rede (zonas, nós, arcos e conectores), descritos em seguida e acompanhados por imagens das respetivas janelas de introdução de dados do programa (na versão 11.5).

#### 3.2.2.1 Zonas (“Zones”)

As zonas são objetos que descrevem áreas com caracteres espaciais e de uso de solos, específicas das localizações dentro da rede, correspondendo a pontos de origem e destino das viagens dentro da zona em análise. Ao seu “centro de mobilidade” chama-se *centróide*.

As zonas ligam-se à rede de transportes através de conectores, podendo ter mais do que um conector. Os conectores são arcos fictícios com características especiais. Uma zona é identificada pelo seu número, pelo nome e pelas coordenadas que correspondem ao seu centróide.



The image shows a software dialog box titled "Create zone 28". It contains several input fields and a set of tabs. The "Number" field is set to 28, "Type" to 0, and "Name" to "Lisboa". Below these are tabs for "Basis", "Connectors", "OD demand", "DStrata", and "User". The "Basis" tab is selected, showing a "Relative state" dropdown menu set to "Ignore", three "AddValue" fields (1, 2, 3) all set to 0, and a "Position" section with "x" set to 19524,8740 and "y" set to -17637,9718. At the bottom are "OK" and "Cancel" buttons.

Figura 8: Janela de identificação de zona no VISUM

### 3.2.2.2 Nós (“Nodes”)

Os nós são os objetos que definem a posição das intersecções na rede modelada e são os pontos onde os arcos começam e acabam. Constituem os pontos onde se dão as viragens de um arco para outro, representando os cruzamentos e definindo os movimentos descritos pelos utilizadores da rede.

São caracterizados pelo seu número, nome e coordenadas, podendo ainda ser-lhes atribuída capacidade de forma a limitar a afluência de tráfego aos mesmos. Os nós podem também ser classificados, por exemplo, como cruzamentos semaforizados ou como nós de autoestrada e podem ainda ter associados valores específicos de impedância, sendo que estes detalhes de modelação podem fazer com que os caminhos da procura se alterem por força das restrições aplicadas.

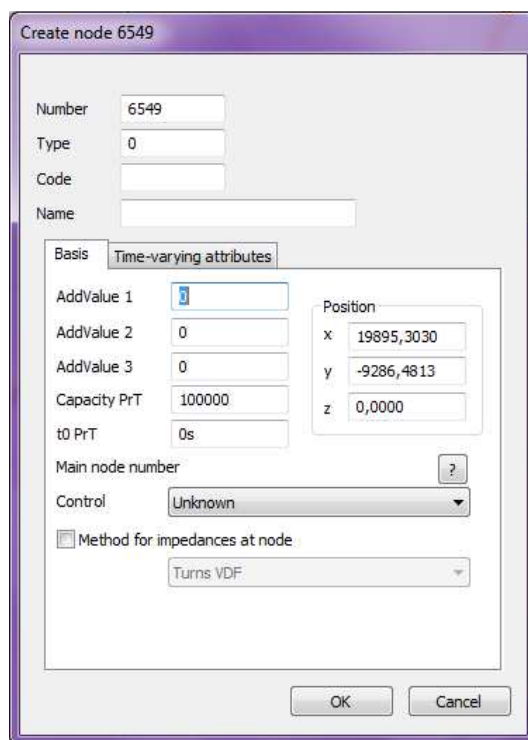


Figura 9: Janela de identificação dos nós no VISUM – nó 6549

### 3.2.2.3 Arcos (“Links”)

Os arcos ligam os nós e podem ser usados por um conjunto de sistemas de transporte e, deste modo, representam por exemplo, uma infraestrutura rodoviária, ferroviária, ou outro tipo de espaço canal dedicado.

Para o VISUM cada arco tem um sentido único em particular, de modo que o sentido oposto tem que ser representado por um outro arco, geometricamente sobreposto, mas

de sentido contrário. É possível que a mesma ligação entre dois nós tenha configurações diferentes nos dois sentidos de tráfego – útil, por exemplo, nas estradas onde existe via de lentos.

Este tipo de elemento é definido por vários atributos:

- O número;
- Os nós de origem e destino;
- O tipo de arco (é atribuída uma cor e características base a cada tipo de arco);
- O comprimento da ligação que representa;
- A velocidade base;
- O número de vias;
- A capacidade do troço;
- Os modos de transporte que nele podem operar (transporte individual, transporte coletivo e/ou peões).

Podem ainda ser atribuídos valores relativos às contagens de tráfego e a custos de portagens.

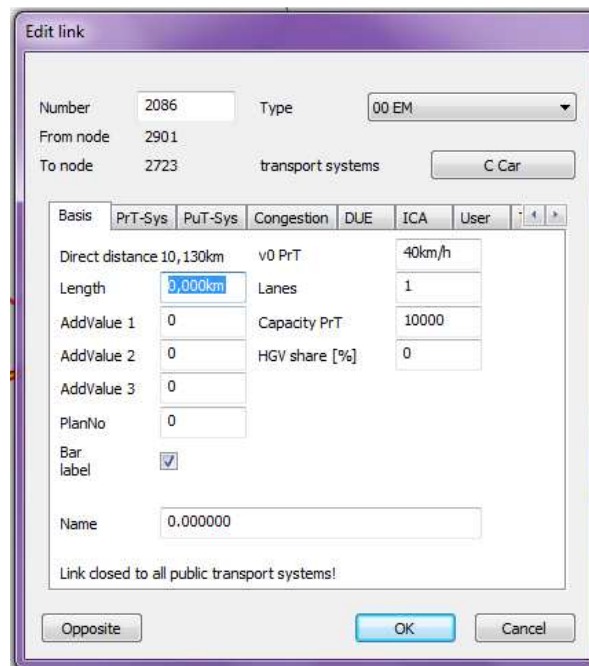


Figura 10: Janela de identificação do arco no VISUM

#### 3.2.2.4 Conectores (“Conectores”)

Estes elementos são arcos fictícios que efetuam a ligação entre o centróide de uma zona e a rede envolvente. Cada conector tem dois sentidos.

A sua identificação é feita pelo número da zona de origem e o número do nó na rede. Uma zona pode conectar-se à rede através de vários conectores ligados cada um a um nó da rede distinto, simulando a admissão de fluxo na rede através de vários pontos da mesma.

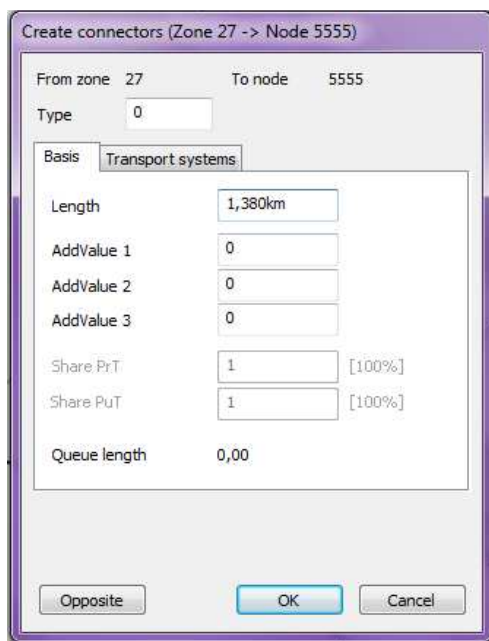


Figura 11: Janela de identificação do conector no VISUM

### 3.3 Caracterização da rede

No caso de modelos de afetação de tráfego rodoviário, a infraestrutura de transportes é constituída pela rede viária. O processo mais simples de representação da rede traduz-se por um grafo<sup>6</sup> orientado onde os arcos correspondem às vias e os nós às intersecções (VASCONCELOS, 2004) - Figura 12.

A rede deve ser codificada com um nível de detalhe adequado para se atingirem os objetivos de análise pretendidos. Segundo Vasconcelos (2004), o elemento que deve ser explicitamente codificado é o arco, ficando assim os nós implicitamente definidos.

---

<sup>6</sup> Grafo – é representado como um conjunto de pontos ligados por retas. Os grafos são muito úteis na representação de problemas da vida real, em vários campos profissionais. Por exemplo, pode-se representar um mapa de estradas através dos grafos.





**Figura 12: Modelação de interseções**

*Fonte: Adaptado de Vasconcelos, 2004*

A seleção das vias rodoviárias a integrar na rede também é uma tarefa importante no desenvolvimento de um modelo uma vez que as mesmas representam a infraestrutura de transporte a analisar. Para assegurar uma boa escolha da rede devem ser considerados os seguintes critérios (HMSO, (1996 e 1991); FHWA, (1983), in TAVARES, (2003)):

- I. Delimitação da área de estudo;
- II. Classificação e hierarquização da rede viária de acordo com as suas funções de acessibilidade/mobilidade (vias coletoras, distribuidoras principais, distribuidoras secundárias e vias locais);
- III. Seleção dos arcos, assegurando que se incluem as vias com nível hierárquico imediatamente inferior àquele para o qual se pretendem obter bons resultados de afetação<sup>7</sup>;
- IV. Seleção de arcos adicionais, mesmo não pertencendo aos níveis hierárquicos a estudar, quando em presença das seguintes situações:
  - Os vários tipos de vias selecionadas não formam uma rede contínua;
  - Existência de vias com volumes significativos de tráfego;
  - Existência de várias vias “paralelas” que, em conjunto, são responsáveis por grandes volumes de tráfego, definidos como um eixo;
  - Estabelecimento de ligações a centróides.

No caso em estudo, adotou-se a seguinte tipologia de caracterização dos arcos:

<sup>7</sup> A importância de incluir este nível hierárquico deve-se à necessidade de, preferencialmente, efetuar as ligações dos centróides a arcos pertencentes a um nível mais baixo da hierarquia de forma a ultrapassar alguns problemas.

**Quadro 7: Tipologia de caracterização dos arcos na rede**

Tipo de Arco	Designação	Tipo de Arco	Designação
1 - 9	EM	55 – 59	IP (AE) com três vias
10 – 19	EN com uma via	60 – 69	IC (Não AE) com duas vias
20 – 29	EN com duas vias	70 – 79	IP (AE) com duas vias
30 – 39	IC (AE) com duas vias	80 – 89	IP (AE) com três vias
40 – 49	IC (AE) com três vias	90 - 98	IP (AE) com quatro vias
50 – 54	IC (Não AE) com uma via	99	Rede Futura

### 3.4 Custos do congestionamento e atrasos

Os custos do congestionamento e atrasos são custos consequentes do facto dos utilizadores demorarem mais tempo nas suas viagens, do que se o sistema estivesse totalmente livre, ou seja, corresponde ao tempo despendido na viagem e ao valor monetário desse tempo. Como resultado do congestionamento existe uma redução da velocidade dos veículos, aumentando assim os tempos de viagem e os custos operacionais associados ao veículo.

O conceito de custo marginal corresponde aos atrasos provocados nos outros utilizadores pela entrada do “último” veículo no sistema, como se verá à frente.

O congestionamento pode ocorrer devido a dois motivos:

- Atrasos nos arcos, devido à elevada densidade de tráfego, a qual obriga os condutores a abrandarem a sua velocidade e a sofrerem atrasos;
- Filas de espera junto a cruzamentos e estrangulamentos.

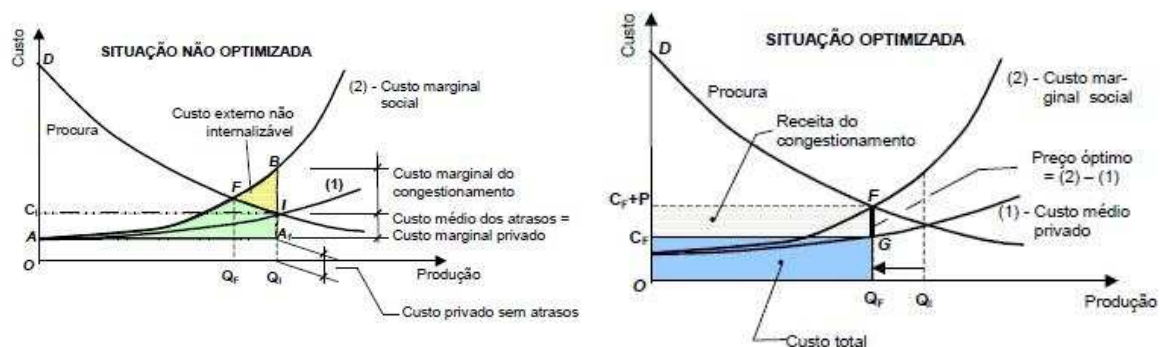
Segundo Martins (2001), quando se começa um estudo cujo objetivo é avaliar e quantificar os impactos dos atrasos e congestionamento, é fundamental especificar que tipo de objetivos se deseja atingir:

- Se se deseja fazer uma gestão mais eficiente do sistema de transportes em causa, impedindo que os níveis de serviço instalados excedam determinados valores padrão, considerados aceitáveis, então estamos na presença de uma abordagem de *gestão de recursos escassos*, podendo o cálculo de custos ser feito só com base nos custos totais ou médios;
- Caso contrário, se for desejada uma abordagem mais complexa, do tipo *maximização do bem-estar social*, a qual envolva a identificação do “nível ótimo”

do sistema e a criação de condições, através da utilização de políticas de custo marginal, para conseguir esse nível, nesse caso além dos custos anteriores será necessário estimar o custo marginal e prever a sua variação com os níveis de utilização do sistema.

Tanto a abordagem da *maximização do bem-estar social*, como a abordagem de *gestão de recursos escassos*, implica a criação de mecanismos específicos que possibilitem simular/prever as reações dos utilizadores (o mercado) e a sua evolução, em situações de facto complexas, quer pela instabilidade dos mercados em si, quer pelo duplo papel dos utilizadores, enquanto consumidores e produtores do ato de transporte (MARTINS, 2001).

A figura seguinte explica a comparação teórica entre a situação otimizada (figura da direita) e não otimizada, em termos de eficiência económica, para a internalização do custo do congestionamento e a maximização da renda social (MARTINS, 2001).



**Figura 13: Internalização eficiente do congestionamento**

Fonte: Martins, 2001 adaptado de INFRAS/IWW, 1999

Na figura do lado esquerdo, a situação não otimizada é determinada pelo equilíbrio, no ponto *I*, entre a oferta e a procura. Sendo que este ponto corresponde à situação corrente na maioria dos sistemas de transporte, na qual a “transação” é efetuada com base no custo médio do tempo de viagem<sup>8</sup> (MARTINS, 2001).

A “otimização” do mercado corresponde à definição do preço (figura da direita) com base no conceito de custo marginal.

Neste trabalho será somente abordada a primeira categoria de atrasos, para a qual já foram desenvolvidas formulações matemáticas estáveis que permitem efetuar estimativas

<sup>8</sup> O custo médio do tempo de viagem é a soma do tempo sem atrasos (fluxo livre), com o valor médio dos atrasos por utilizador.

de qualidade. A introdução de modelos de filas de espera associados aos atrasos nos nós não será abordada devido à escala da análise.

### 3.4.1 Custo do tempo perdido

O tempo perdido pode ser estimado através da utilização de modelos de tráfego nos quais as condições reais da corrente de tráfego são comparadas com as condições ideais de fluxo livre<sup>9</sup> (RODRIGUES, 2007).

O custo do tempo é caracterizado através de dois parâmetros:

- Tempo perdido nos atrasos ou congestionamento;
- Valor monetário atribuído ao tempo (Valor do Tempo) pelos utilizadores ou passageiros.

O cálculo do tempo perdido, segundo Martins (2001), pode ser realizado com recurso a *métodos expeditos* ou com recurso a *formulações diretas*. Os métodos expeditos só possibilitam o cálculo dos custos totais e médios em situações reais. As formulações diretas possibilitam não só quantificar os custos totais e médios, como também os custos marginais, podendo ser aplicadas à escala elementar (vias e nós das redes de transporte) e em situações hipotéticas.

Neste trabalho foram utilizadas formulações diretas complementares com a utilização de modelos de tráfego, calculando-se através dos mesmos os tempos de viagem na situação de “fluxo livre” e de fluxo real, utilizando para esse efeito uma matriz O/D.

Neste trabalho optou-se pelo estudo e utilização dos modelos de curvas americanas (Bureau of Public Roads (usada no HCM de 1965)) e do Reino Unido (COBA Manual, 1996). Qualquer que seja a curva adotada ela deve ser calibrada e adaptada à situação específica da área em estudo.

A equação abaixo corresponde à relação fluxo-velocidade, que irá ser utilizada neste trabalho:

$$V(q) = \frac{V_0}{1 + \alpha \cdot \left[ \frac{q}{q_c \times c} \right]^\beta}$$

**Equação 11: Fórmula do BPR**

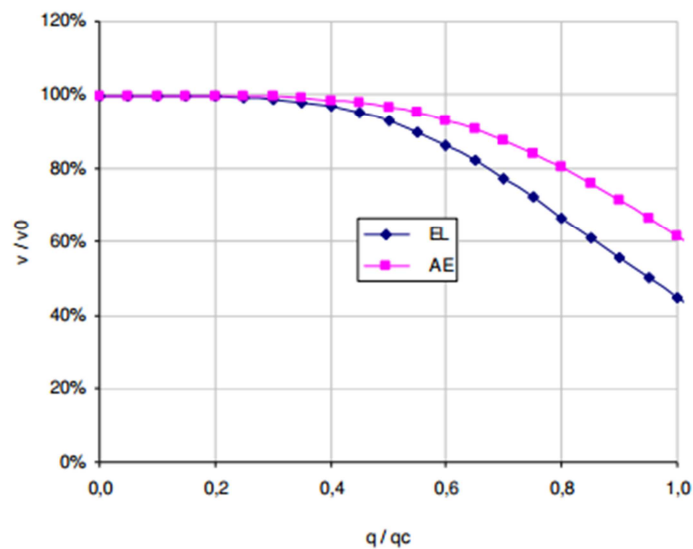
---

<sup>9</sup> De acordo com os conceitos da Engenharia de Tráfego, os níveis de serviço variam entre A (fluxo livre) e F (congestionamento).

Em que:

- $V(q)$  – Velocidade real [km/h];
- $V_0$  – Velocidade base [km/h];
- $q_c$  – Capacidade;
- $q$  – Fluxo real [u.v.e./h];
- $\alpha$ ,  $\beta$  e  $c$  – Parâmetros de calibração da curva.

Os parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $c$  devem ser calibrados para a situação específica de cada via tendo em consideração as características de cada uma das situações, de modo a permitir verificar para que relação fluxo – capacidade, a velocidade de circulação se degrada mais acentuadamente.



**Figura 14: Curva Fluxo Velocidade do HCM**

*Fonte: TIS, 2001*

Com base nestas curvas, pode ser calculada a redução de velocidade em função do fluxo ( $q$ ), permitindo quantificar os acréscimos de tempo (atrasos) em relação à situação de fluxo livre.

De seguida aponta-se a metodologia de cálculo desenvolvida por Martins (2001), que permite calcular os custos totais e médios do congestionamento com base em qualquer premissa inicial, isto é, fluxo livre ou nível de serviço pré-especificado, bem como o custo marginal em função de um tempo de referência  $T_0$ .

#### **3.4.1.1 Custos totais**

Segundo Martins (2001), a função de Custo Total do Congestionamento,  $CT_{cong}$ , pode ser obtida de acordo com a equação seguinte:

$$CT_{cong} = (T - T_0) \times q \times VDT = \Delta T \times q \times VDT$$

**Equação 12: Custo total**

Em que:

- $T_0$  – Tempo de viagem na situação considerada “não congestionada”;
- $T$  – Tempo real de viagem;
- $q$  – Fluxo real;
- VDT – Valor do Tempo, cuja forma de obtenção será abordada mais adiante.

A função  $CT_{cong}$  diz respeito à totalidade dos utilizadores, não abrangendo no entanto os custos privados gerados na situação de fluxo aceitável.

**3.4.1.2 Custos Médios**

Segundo Martins (2001), o valor do custo médio de congestionamento por cada utilizador corresponde ao custo privado de viagem acima da situação considerada aceitável. A função do Custo Médio do Congestionamento,  $CMed_{cong}$ , apresenta-se de seguida:

$$CMed_{cong} = \frac{CT_{cong}}{q} = (T - T_0) \times VDT = \Delta T \times VDT$$

**Equação 13: Custo médio**

**3.4.1.3 Custos Marginais**

O custo marginal corresponde á derivada do custo total. Como  $T = T(q)$  o  $CT_{cong}$  não é linear, pelo contrário cresce de uma forma bem acentuada. A expressão vai ser separada em duas parcelas.

A primeira diz respeito aos custos marginais privados, que coincidem com os custos médios privados e a segunda aos custos marginais externos ao indivíduo (MARTINS, 2001).

$$CMarg_{cong} = \frac{\partial}{\partial q} CT_{cong} = (T - T_0) \times VDT + \frac{\partial T}{\partial q} \times VDT \times q = \Delta T \times VDT + \frac{\partial T}{\partial q} \times VDT \times q$$

**Equação 14: Custos marginais privados**

O valor real dos vários custos, particularmente do custo marginal depende em grande medida da função utilizada para o cálculo do tempo  $T(q)$ . As expressões que se obtêm para os atrasos nos arcos de rede variam em função do tipo de curvas de variação da velocidade utilizadas nos estudos.

De acordo com Martins (2001) e adotando a fórmula do BPR, o custo marginal do congestionamento pode ser obtido através da seguinte equação:

$$CMarg_{cong} = \frac{\partial}{\partial q} CT_{cong} = \Delta T \times VDT + \frac{s}{V_0} \times \alpha \times \beta \times \left(\frac{q}{q_c}\right)^\beta \times VDT$$

**Equação 15: Custo marginal do congestionamento**

Em que:

- $V_0$ - Velocidade de fluxo livre;
- $S$  - Distância percorrida no intervalo de tempo  $\Delta T$ .

Segundo Martins (2001), e adotando a fórmula do Manual COBA, o custo marginal do congestionamento é calculado como:

$$CMarg_{cong} = \frac{\partial}{\partial q} CT_{cong} = \Delta T \times VDT + \frac{s \times \beta \times q}{v(q)^2} \times VDT$$

**Equação 16: Custo marginal do congestionamento**

Segundo Martins (2001), a partir destas duas equações pode-se concluir que o valor do custo marginal é independente do ponto a partir do qual o congestionamento deve ser contabilizado como fator externo. No entanto, se esse ponto for definido a partir do fluxo livre, pode obter-se as seguintes relações entre o custo médio e o custo marginal não privado:

- Adotando a fórmula do BPR, esta relação toma o valor:

$$CMarg_{np} = CMed_{cong} \times \beta$$

**Equação 17: Custo marginal não privado**

- Mas se adotar as fórmulas do Manual COBA, obtêm-se a equação abaixo:

$$CMarg_{np} = CMed_{cong} \times \frac{v_0}{v} = CMed_{cong} \times \frac{T}{T_0}$$

**Equação 18: Custo marginal não privado**

Segundo Martins (2001), verifica-se que a relação entre os dois tipos de custos é dependente da fórmula utilizada, sendo que no caso da fórmula do BPR é constante e no caso do Manual COBA aumenta para as funções lineares.

### 3.4.2 Valor do Tempo (VDT)

Segundo Rodrigues (2007), o valor atribuído ao tempo depende de vários fatores como o motivo da viagem, a extensão do percurso, o tipo de veículo e representa o montante máximo que um determinado indivíduo está disposto a pagar para poupar tempo de viagem.

O custo do tempo é caracterizado por dois parâmetros:

- O tempo perdido nos atrasos ou congestionamentos (gasto adicional de tempo entre a situação de “fluxo livre” e a situação de fluxo real verificado);
- O valor monetário atribuído ao tempo pelos utentes ou passageiros.

Segundo Martins (2001), o cálculo do tempo perdido pode ser efetuado com recurso a dois tipos de abordagem. O primeiro tipo assenta essencialmente no custo económico do tempo perdido – o valor do tempo é determinado com base nos salários ou no valor produtivo dos indivíduos. A segunda abordagem assenta na observação e análise das escolhas dos indivíduos face às variações dos atributos de viagem, especialmente do preço e do tempo – modelos de escolha discreta baseados na Teoria da Utilidade Estocástica, nomeadamente aqueles obtidos a partir de inquéritos de Preferência Declarada.

O valor do custo do tempo varia de acordo com a categoria do veículo e é diferente em cada país, sendo que em Portugal (Fonte: Eva-Manual, 1991 em PETS D7, 1998 e ECT 2000) o valor do tempo apresenta-se na tabela seguinte:

**Quadro 8: Valor do tempo estimado para Portugal em PETS em euros por hora**

Tipo de veículo	VDT (€/h)	Taxa de ocupação	VDT final (€/h/pass)
Automóvel	8,86	1,4	12,4
Light Goods Vehicles	15	1	15
Heavy Goods Vehicles	37	1	37

*Fonte: PETS D7, 1998*

Na tabela seguinte apresentam-se os valores recomendados para Portugal pelo projeto UNITE para 2006, os quais foram atualizados para 2010, com base em viagens de negócio ou privadas.



**Quadro 9: Valor do tempo para veículos ligeiros e pesados (€/hora)**

	VDT	
	Negócios	Privados
Veículos Ligeiros	18,35	5,24
Veículos Pesados	37,57	-

Fonte: Adaptado de UNITE, 2003.

### 3.4.3 Custo de Operação de Veículos

Os custos de operação dos veículos referem-se a todos os custos relacionados com a utilização dos mesmos, particularmente aos custos que dependem e variam com a distância percorrida e a velocidade de operação.

Segundo Rodrigues (2007), estes custos podem ser desagregados em dois grandes tipos de custos:

- Custos relacionados com o consumo de combustível;
- Custos relacionados com a utilização do veículo, ou seja, custos relacionados com os restantes consumíveis, por exemplo, óleos e pneus, manutenção, depreciação devido ao uso do veículo, etc.

Os custos dos veículos variam de acordo com o tipo de veículo, as condições do pavimento, o gradiente da estrada e a velocidade. Os custos de operação de veículos estão, deste modo, correlacionados com os parâmetros do projeto da estrada (por exemplo tipo do pavimento), a estratégia de manutenção da estrada, os impactes ambientais, a composição do fluxo e o congestionamento.

Neste trabalho optou-se pela utilização de uma das metodologias, de referência, mais utilizadas para o cálculo dos custos de operação, que é a metodologia da TAG (2009) – Transport Analysis Guidance do Departamento de Transportes do Reino Unido. Este procedimento apresenta uma metodologia para o cálculo dos custos de operação de veículos, de acordo com a divisão pretendida, isto é custos de combustível (L) e outros custo associados à utilização do veículo (C) e permite a determinação dos custos em unidades monetárias por veículo.kilómetro.

O custo total de operação de um veículo médio é dado pela soma dos dois termos descritos, ou seja,  $c_0 = L + C$ .

A expressão de cálculo do custo dos recursos dos combustíveis é a seguinte:

$$L = [a + b \times v + c \times v^2 + d \times v^3] \quad [\text{unidades monetárias / veículo.km}]$$

**Equação 19: Custos dos combustíveis**

E a expressão para o cálculo do custo de todos os outros recursos, que variam com a distância e a velocidade média de circulação é dada por:

$$C = a_1 + \frac{b_1}{v} \quad [\text{unidades monetárias / veículo.km}]$$

**Equação 20: Custos de todos os outros recursos**

Nas duas expressões a, b, c, d, a<sub>1</sub> e b<sub>1</sub> são parâmetros monetários expressos em centimos de Euros e v a velocidade média de circulação em km/h, estimada pela curva de degradação da velocidade em função do fluxo.

**Quadro 10: Valores dos vários parâmetros monetários relativamente aos vários modos de transporte**

	a	b	c	d	a <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>
<b>TI</b>	0,178	-0,004	0,00005	-0,0000001	3,308	19,048
<b>LGV</b>	0,196	-0,003	0,00002	0,00000006	5,910	33,970
<b>OGV1</b>	0,768	-0,023	0,0003	-0,000001	5,501	216,165
<b>OGV2</b>	1,024	-0,03	0,0004	-0,000002	10,702	416,672
<b>PSV</b>	0,635	-0,019	0,0003	-0,000001	24,959	569,094

*Fonte: Tabela do manual TAG Unite 3.5.6*

Ao tratar de custos numa ótica de custo-benefício para a sociedade, os custos operacionais não têm presentes os impostos incidentes sobre os combustíveis e outros consumíveis do automóvel (quer no país de circulação, quer nos de origem do produto), sendo por isso necessário considerar um fator de conversão f<sub>c</sub> e f<sub>0</sub> para a estimação dos custos suportados pelos viajantes. A equação anteriormente apresentada para o cálculo do custo operacional assume a seguinte forma:

$$C_0 = L \times f_c + C \times f_0$$

**Equação 21: Custo operacional**

### 3.5 Capacidades e Níveis de Serviço

A *capacidade* corresponde ao número máximo de veículos que por unidade de tempo pode passar numa dada secção de estrada, de forma estável, para certas condições existentes da rede e do tráfego. Quando o volume de tráfego numa determinada secção corresponde à capacidade, a infraestrutura fica saturada e as condições de circulação passam a ser instáveis.

Segundo Martins A. P. et al. (2006) o objetivo da determinação da *capacidade* de uma rede é quantificar o seu grau de “competência” para receber os volumes de tráfego existentes e previstos, permitindo a análise técnica e económica da medida em que asseguram o escoamento daqueles volumes em condições aceitáveis.

Embora seja um dado básico, a capacidade não traduz plenamente as condições de utilização da rede pelos utilizadores, pois ela só se refere ao número de veículos que pode circular e ao intervalo de tempo dessa circulação. Outros fatores de utilização, tais como: velocidade e tempo de percurso, segurança, conforto, custos de operação, etc. não são considerados na determinação da capacidade.

#### 3.5.1 Capacidade

A capacidade é uma característica física da infraestrutura. Associado à mesma, para caracterizar a qualidade da utilização desta pela procura (os utilizadores), foi criado o conceito de “Nível de Serviço”. Este conceito, apesar de ter uma leitura direta qualitativa (pois varia numa escala entre A, “excelente” e F, “péssimo”), traduz na realidade os fatores quantitativos de utilização, face à capacidade da via. Por outras palavras, o nível de serviço mede o fluxo de utilizadores que se movem na infraestrutura (face à sua capacidade) e as condições em que o fazem (velocidade praticada), permitindo aferir da adequabilidade e qualidade da oferta à procura existente.

Esse conceito, introduzido através do *Highway Capacity Manual* – HCM, na sua edição de 1965, possibilita a avaliação do grau de eficiência do serviço oferecido desde um volume de tráfego quase nulo até ao volume máximo ou capacidade da via.

É de notar que a capacidade das vias depende de fatores tão complexos e variáveis (como os fatores associados ao clima, ou as variações locais de geometria), que é praticamente impossível efetuar um cálculo detalhado com precisão, sendo razoável a sua estimativa com valores aproximados.

O cálculo das capacidades é feito através de valores padrão de capacidade associados a cada tipo de via. A capacidade pode ser definida em unidades de veículos equivalentes (u.v.e.) por hora, ou por dia. Habitualmente, em estudos metropolitanos e urbanos a unidade de capacidade relevante é a de u.v.e. por hora. No caso de estudos de âmbito regional e nacional, muitos autores optam, por questões de adequabilidade prática, por períodos de análise diária e nesse caso, a definição da capacidade faz-se com valores diários. Um dos motivos para esta última prática prende-se com o facto das variações dos picos horários (horas de ponta) serem diferentes entre zonas urbanas e rurais e mesmo entre diferentes zonas urbanas. São sempre considerados fatores de conversão entre as capacidades e fluxos diários e os intervalos horários, tal como acontece entre os intervalos horários e de 15 ou 5 minutos. Apresentam-se no quadro os valores adotados no presente trabalho para a velocidade base e a capacidade diária, em u.v.e., por tipo de via.

**Quadro 11: Valor adotado para a velocidade base e capacidade por cada tipo de via**

<b>Tipo de via</b>	<b>Nº de vias por sentido</b>	<b>Velocidade base (Km/h)</b>	<b>Capacidade diária (u.v.e.)</b>
<b>Estrada Municipal</b>	1	40	10.000
<b>Estrada Nacional</b>	1	50	15.000
<b>Estrada Nacional</b>	2	80	40.000
<b>IP ou IC</b>	1	90	20.000
<b>IP ou IC</b>	2	110	40.000
<b>Autoestrada</b>	2	115	48.000
<b>Autoestrada</b>	3	120	70.000
<b>Autoestrada</b>	4	120	90.000
<b>Acessos a Autoestradas</b>	1	60	15.000
<b>Estrada Urbana</b>	1	40	15.000
<b>Estrada Urbana</b>	2	60	35.000

### 3.5.2 Nível de Serviço

De acordo com Martins A. P. et al. (2006), são considerados pelo HCM seis níveis de serviço distintos, designados pelas seis primeiras letras do alfabeto, e que se passam a descrever:

- Nível A – Permite uma circulação livre, pelo que os utilizadores não são afetados uns pelos outros, sendo a liberdade de escolha da velocidade desejada extremamente elevada. O nível de conforto e conveniência proporcionado aos utilizadores é excelente;



**Figura 15: Nível de Serviço A**

*Fonte: HCM, 2000*

- Nível B – Permite correntes de tráfego estáveis, mas começa a sentir-se o efeito da presença de outros utilizadores. A escolha da velocidade desejada não é praticamente afetada, mas há uma diminuição da liberdade de manobra, pois a presença de outros utilizadores começa a condicionar o comportamento individual;



**Figura 16: Nível de Serviço B**

*Fonte: HCM, 2000*

- Nível C – Permite correntes de tráfego estáveis, mas as condições operacionais dos utilizadores começam a ser seriamente afetadas pela interação dos outros condutores. A seleção da velocidade é afetada, e as manobras requerem grande atenção dos utilizadores;



**Figura 17: Nível de Serviço C**

*Fonte: HCM, 2000*

- **Nível D** – A corrente de tráfego ainda é estável, mas os volumes são elevados. A velocidade e a liberdade de manobra são severamente restringidas a o nível de conforto e conveniência dos utilizadores é diminuta. Um pequeno aumento do volume de tráfego ocasiona normalmente grandes dificuldades ocasionais;



**Figura 18: Nível de Serviço D**

*Fonte: HCM, 2000*

- **Nível E** – As condições operacionais são as correspondentes à capacidade. A velocidade de todos os veículos é reduzida mas uniforme, e o conforto e a conveniência são extremamente diminutos, sendo a frustração elevada. A circulação a este nível é instável, pelo que um pequeno aumento do volume, ou a menor perturbação na corrente de tráfego, provocará a interrupção da circulação;



**Figura 19: Nível de Serviço E**

*Fonte: HCM, 2000*

- **Nível F** – Corresponde à circulação forçada com interrupções. Este nível de serviço verifica-se quando o volume de tráfego excede a capacidade da estrada, provocando a formação de filas de espera. As condições operacionais caracterizam-se por ondas pára-arranca, sendo fortemente instáveis.



**Figura 20: Nível de Serviço F**

*Fonte: HCM, 2000*

O cálculo do nível de serviço foi realizado através da metodologia apresentada em HCM (2000, capítulo 23). Em primeiro lugar determina-se a velocidade de regime livre (FFS) a qual é calculada a partir da velocidade base em regime livre e à qual são aplicadas correções que atendem às características geométricas da estrada em estudo, conforme se mostra na seguinte equação:

$$FFS = BFFS - f_{LW} - f_{LC} - f_N - f_{ID}$$

**Equação 22: Velocidade de Regime Livre**

Em que:

- BFFS – Velocidade base em regime livre (km/h);
- $f_{LW}$  – Fator de ajustamento do efeito da largura das vias (Quadro 12);
- $f_{LC}$  – Fator de ajustamento para o efeito da desobstrução lateral direita (Quadro 13);
- $f_N$  – Fator de ajustamento para o número de vias (Quadro 14);
- $f_{ID}$  – Fator de ajustamento para o efeito da densidade de pontos de convergência (Quadro 15).

Nos quadros seguintes (HCM, 2000) apresentam-se os parâmetros de ajustamento à velocidade em regime livre base, correspondentes aos fatores anteriores.

**Quadro 12: Fator de ajustamento para o efeito da largura das vias ( $f_{LW}$ )**

Largura da via (m)	Valores de $f_{LW}$ (km/h)
3,6	0,0
3,5	1,0
3,4	2,1
3,3	3,1
3,2	5,6
3,1	8,1
3,0	10,6

A velocidade base é reduzida até 10,6 km/h à medida que a largura da estrada passa dos 3,6 metros para 3,0 metros.

**Quadro 13: Fator de ajustamento para o efeito da desobstrução lateral direita ( $f_{LC}$ )**

Desobstrução lateral direita (m)	Valores de $f_{LC}$ (km/h)			
	Vias numa direção			
	2	3	4	≥5
≥1,8	0,0	0,0	0,0	0,0
1,5	1,0	0,7	0,3	0,2
1,2	1,9	1,3	0,7	0,4
0,9	2,9	1,9	1,0	0,6
0,6	3,9	2,6	1,3	0,8
0,3	4,8	3,2	1,6	1,1
0,0	5,8	3,9	1,9	1,3

Neste caso, a redução da velocidade base varia até 5,8 km/h, tendo em conta não só a desobstrução lateral, mas também o número de vias por direção de tráfego.

**Quadro 14: Fator de ajustamento para o número de vias em zonas urbanas e suburbanas ( $f_N$ )**

Em AE, em zonas urbanas e suburbanas	
Número de vias (num sentido)	Valores de $f_N$ (km/h)
≥5	0,0
4	2,4
3	4,8
2	7,3



A redução da velocidade base varia até 7,3 km/h à medida que o número de vias também varia.

**Quadro 15: Fator de ajustamento por efeito da densidade de pontos de convergência ( $f_{ID}$ )**

Pontos de convergência por quilómetro	Valores de $f_{ID}$
≤0,3	0,0
0,4	0,1
0,5	2,1
0,6	3,9
0,7	5,0
0,8	6,0
0,9	8,1
1,0	9,2
1,1	10,2
1,2	12,1

O fator de ajustamento varia até 12,1 conforme o aumento dos pontos de convergência até aos 1,2.

Seguidamente determina-se o fluxo horário de cálculo ( $v_p$ ) que permite calcular o fluxo para o período de ponta de 15 minutos, com base nos valores do volume de tráfego medido para a hora de ponta, através da seguinte expressão apresentada no HCM (2000, capítulo 23):

$$v_p = \frac{V}{FPH \times N \times f_{HV} \times f_p}$$

**Equação 23: Fluxo horário de cálculo**

Em que:

- V – Volume horário total (veículos/hora);
- FPH – Fator de ponta horário;
- N – Número de vias no mesmo sentido;
- $f_{HV}$  – Fator de ajustamento para veículos pesados;
- $f_p$  – Fator de ajustamento para o tipo de condutor.

Considera-se que o volume horário total, V, equivale a cerca de 10% do Tráfego Médio Diário do sublanço respetivo.

Os fatores de ajustamento definidos na referência seguida (HCM, 2000) são os seguintes:

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + [1 + P_T \times (E_T - 1)]}$$

**Equação 24: Fator de ajustamento para veículos pesados**

Em que:

- $P_T$  – Percentagem de pesados no tráfego;
- $E_T$  – Fator de conversão em veículos ligeiros equivalentes de camiões.

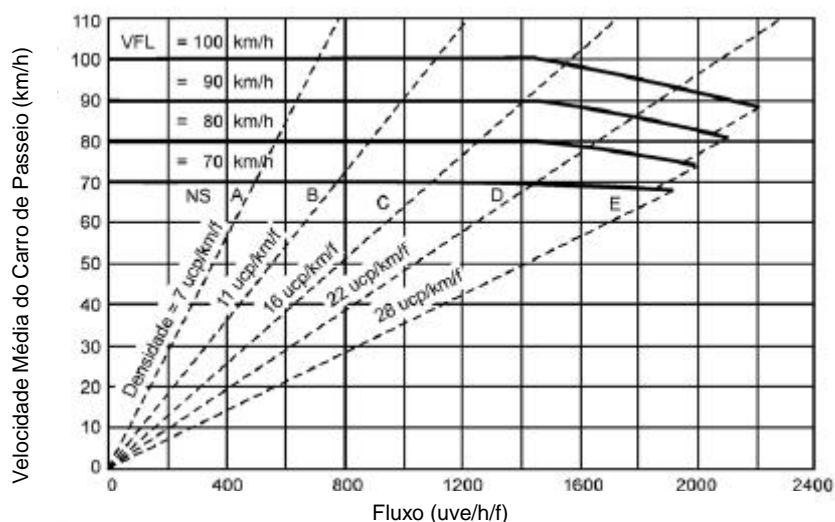
**Quadro 16: Fator de conversão em veículos ligeiros equivalentes de camiões**

Fator	Tipo de terreno		
	Plano	Ondulado	Montanhoso
$E_T$	1,5	2,5	4,5

O fator horário de ponta (FPH) varia normalmente entre 0,75 e 0,95. Os valores mais baixos são típicos das zonas rurais, enquanto que os mais elevados se verificam em zonas suburbanas. Não se dispondo de dados locais adapta-se normalmente 0,85 como fator horário de ponta em zonas rurais e 0,90 em zonas suburbanas.

O fator de ajustamento  $f_p$  é o fator de ajustamento da população, igual a 1 para populações de condutores regulares na estrada em análise, e 0,85 para estradas usadas sobretudo por tráfegos turísticos.

A velocidade média é determinada através do seguinte gráfico na figura:



**Figura 21: Gráfico para determinar o valor da velocidade média (S)**

Fonte: HCM, 2000.

Finalmente, o valor do nível de serviço pode ser estimado com base no valor da densidade (K) que, de acordo com a equação fundamental do tráfego, relaciona o fluxo horário equivalente ( $v_p$ ) em u.v.e., com a velocidade média estimada pelo modelo (S).

$$K = \frac{v_p}{S}$$

**Equação 25: Densidade (veic/km)**

Com base nas densidades obtidas caso a caso, e de acordo com a definição qualitativa adotada (HCM, 2000), identificam-se as estimativas do nível de serviço instaladas na rede. Nesta fase, deve lembrar que este indicador depende dos fluxos afetados à rede e em última instância da matriz O/D utilizada e do respetivo processo de afetação.

**Quadro 17: Nível de Serviço (HCM)**

Densidade (uve/km/vias)	Nível de Serviço
0 – 7	A
>7 – 11	B
>11 – 16	C
>16 – 22	D
>22 – 28	E
>28	F

### 3.6 Contagens de tráfego

De acordo com Macedo (2004) as contagens de tráfego são feitas com o objetivo de se conhecer o número de veículos que passam num determinado ponto da estrada, durante um certo período, permitindo assim estimar o Volume Médio Diário (VMD), a composição do tráfego, etc. Estes dados servem para a avaliação do número de acidentes, classificação das estradas e estudos de tráfego.

Permitem, ainda, aglomerar dados essenciais para a obtenção de séries temporais para análise de diversos elementos, tais como a tendência de crescimento do tráfego e variações de volume.

Na avaliação do tráfego de uma estrada faz-se as contagens volumétricas em Postos Permanentes (contagens 24 horas por dia, durante todo o ano), Postos Sazonais (contagens com objetivo turístico) e em Postos de Cobertura (contagens uma vez no ano, durante 48 horas, com objetivo da determinação do VMD). Estas contagens permitem estabelecer tendências de crescimento do tráfego, bem como permitir fazer correções nos dados de tráfego obtidos, considerando assim as variações existentes (MACEDO, 2004).

Desta forma, podem fazer-se projeções de tráfego para o ano horizonte, projeções estas que são também úteis na programação de melhorias na rede rodoviária.

As contagens de tráfego servem, também, para ajudar a calibrar a matriz O/D, através do *software* de afetação de tráfego, que neste trabalho será o VISUM. Estas contagens vão permitir calibrar o modelo de tráfego, de forma a que as contagens modeladas se aproximem das contagens reais através da reestruturação da matriz O/D. Para isso utilizou-se a ferramenta do “TFlowFuzzy” que o *software* do VISUM dispõe, para ajudar no processo de convergência da matriz O/D com as contagens de tráfego reais. Isto é, das contagens do modelo com as contagens reais.

### 3.7 Valores da impedância

Designa-se por impedância a medida que traduz o custo generalizado de uma viagem, podendo ser representado em tempo, unidade monetária ou comprimento fictício (RAMOS, 2008).

Portanto, a impedância de uma viagem é função das impedâncias de cada um dos elementos (arcos, nós, conectores), sendo calculada através de uma expressão definida

pelo VISUM, função do tempo de percurso, da extensão da escolha de caminhos e do custo da viagem (pode ser direto, em portagens ou indireto, como o custo operacional do veículo), e representa o inverso da utilidade que cada condutor atribui a essa viagem, escolhendo, sempre que possível, a melhor utilidade (RAMOS, 2008).

Depois de conhecidas estas variáveis que motivam o condutor a decidir sobre qual o caminho a tomar, é necessário que estejam todas na mesma unidade, por forma a representarem um valor coerente e que possa ser utilizado como objeto de comparação pelo VISUM no momento de distribuir os condutores. Normalmente usa-se como unidade de referência o custo generalizado ou o tempo.

A impedância corresponde a uma medida de resistência ao deslocamento que os algoritmos de afetação usam para calcular os caminhos mínimos entre as origens e os destinos. Os caminhos são mínimos na impedância, ou seja, os algoritmos identificam os caminhos de viagem correspondentes às impedâncias mínimas entre uma origem e um destino. Por outro lado, a impedância deve refletir as opções de escolha de caminhos dos utilizadores.

Se os utilizadores escolherem os seus caminhos de viagem com base no tempo, então a impedância da afetação deve ser o tempo de viagem. Se as opções de percursos de viagem forem feitas com base na distância, ou no custo generalizado da deslocação, então a impedância deve refletir estes valores.

### **3.8 Especificidades da afetação no VISUM**

O VISUM dispõe de um número vasto de modelos de afetação de tráfego, alguns dos quais em que a variável tempo é também um parâmetro. Neste estudo não serão efetuadas afetações dinâmicas – modelos nos quais o tempo é também objeto da modelação, uma vez que os modelos de afetação estáticos se revelam adequados para o objetivo do trabalho.

São utilizados frequentemente, nos estudos de tráfego, o modelo de equilíbrio e o modelo estocástico.

O modelo de equilíbrio baseia-se, inicialmente, num modelo incremental de afetação dos dados das viagens, levando o condutor a escolher um de dois caminhos com a mesma impedância. Considera-se, por isso, que se está numa situação regida por um modelo de equilíbrio quando não é possível ao condutor diminuir o seu tempo de percurso sem intervenções exteriores sobre as quais não tem poder de decisão.

Ao contrário do modelo de equilíbrio, o modelo estocástico assenta numa distribuição probabilística, sendo sujeito a uma aleatoriedade que deriva, por exemplo, do hábito e das preferências de cada condutor. É claro, desta forma, que a solução do modelo estocástico não é única.

Definido o tipo de modelo a utilizar, há que identificar os seus parâmetros para que a afetação origine resultados válidos. Entre os vários processos que devem ser calibrados, destaca-se a escolha dos parâmetros associados diretamente ao algoritmo de afetação e o processo de estimação da procura, o qual será desenvolvido com base num algoritmo proprietário do VISUM.

### 3.8.1 Parâmetros do modelo de equilíbrio

Nos próximos parágrafos descrevem-se os principais parâmetros que caracterizam o modelo de afetação.

Na primeira parte do separador (Figura 22), são colocados diferentes valores, os quais correspondem ao “fatiamento” incremental da matriz O/D definido para aplicação do processo de afetação. Ou seja, a matriz original vai ser segmentada em diferentes proporções (correspondentes aos valores escolhidos pelo utilizador), e para cada uma destas fatias é realizada uma iteração do processo de afetação.

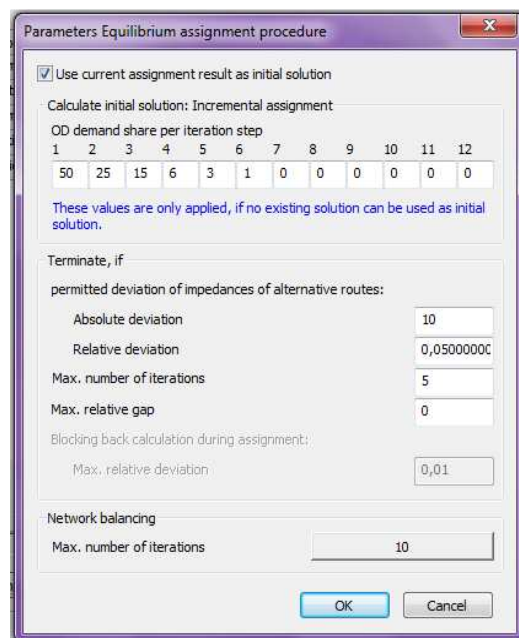


Figura 22: Parâmetros do método de equilíbrio

A afetação do tráfego é feita em várias iterações, sendo que em cada uma delas apenas é afetada à rede a percentagem de tráfego definida nesta caixa de diálogo. As diferentes

iterações correm sequencialmente, o que significa que, ao fim de cada uma delas, o modelo vai reavaliando as condições de circulação (ou seja, a impedância das viagens), o que pode conduzir às diferentes escolhas de caminhos ao longo deste processo iterativo, que é o método do equilíbrio.

Na última parte é colocado o valor das iterações que irão ser feitas na afetação por equilíbrio, sendo que neste caso se considerou 10 iterações.

Na Figura 23 são definidos os parâmetros da impedância, ou seja, os parâmetros que caracterizam as relações fluxo-velocidade e as curvas de degradação da mesma para cada tipo de via.

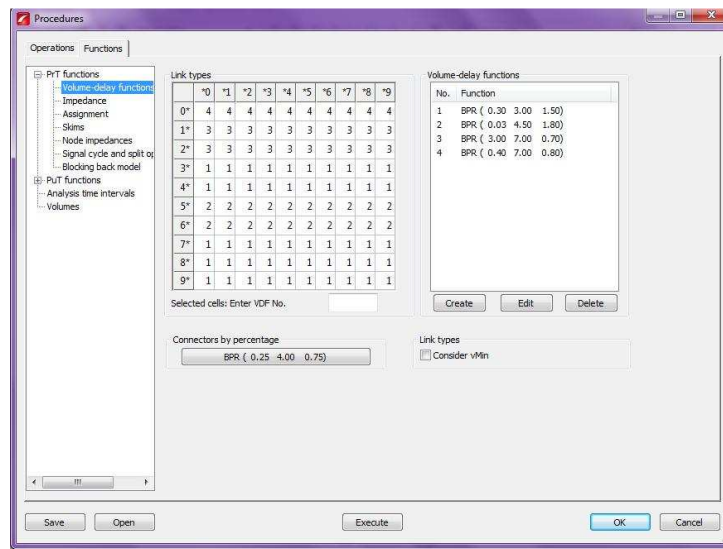


Figura 23: Parâmetros de modelação da curva fluxo-velocidade

No presente caso definiu-se quatro tipos de funções de degradação da velocidade, considerando que o tipo 1 é referente a Autoestradas, o tipo 2 aos Itinerários Principais e Itinerários Complementares, o tipo 3 corresponde às Estradas Nacionais e o tipo 4 às Estradas Municipais.

Os coeficientes admitidos referentes à fórmula do BPR foram:

	a	b	c
<b>Tipo 1</b>	0,3	3	1,5
<b>Tipo 2</b>	0,03	4,5	1,8
<b>Tipo 3</b>	3	7	0,7
<b>Tipo 4</b>	0,4	7	0,8

Na Figura 24 são definidos os parâmetros de impedância relativo ao custo generalizado utilizado para a escolha dos caminhos mínimos.

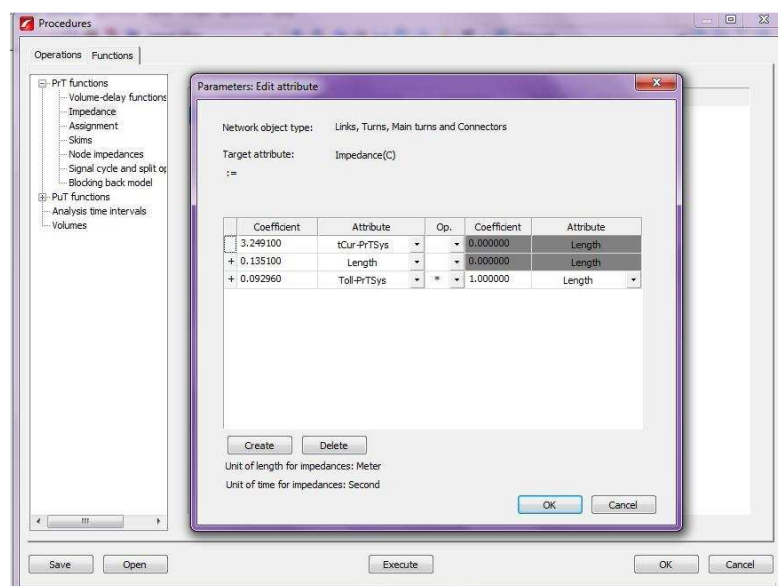


Figura 24: Parâmetros de impedância

### 3.8.2 “TFlowFuzzy”

Os modelos de equilíbrio, só por si conseguem encontrar soluções matematicamente viáveis para a identificação dos caminhos mínimos de viagem entre os vários pares O/D. No entanto, quando se compara os resultados dessas afetações de tráfego, ou seja, os fluxos instalados nos arcos da rede com os valores de contagens de tráfego medidas na realidade, verifica-se que existem grandes dispersões de valores.

Essas diferenças poderão ter duas origens. A calibração indevida dos parâmetros da rede, o que leva à escolha de caminhos de viagem alternativos, diferentes daqueles escolhidos na realidade. O facto de a matriz O/D que possa estar a ser utilizada ser uma matriz incompleta, obtida com base em dados parciais, e que é necessária completar. O VISUM possui uma ferramenta, designada “TFlowFuzzy”, que possibilita a utilização das contagens de tráfego reais para adequar (corrigir) os fluxos iniciais da matriz O/D, de forma a que os resultados das afetações gerem fluxos nos arcos (seleccionados) o mais próximo possíveis dos valores das contagens de tráfego (VISUM 11.5 BASIC, 2010).

Em síntese, o “TFlowFuzzy” corrige a matriz inicial comparando os fluxos de tráfego nos arcos resultantes da afetação com as contagens disponíveis, sendo o seu objetivo final o de validação dessas contagens através da ‘adequação’ da matriz O/D, de forma a aproximar ao máximo os fluxos de tráfego modelados da realidade.

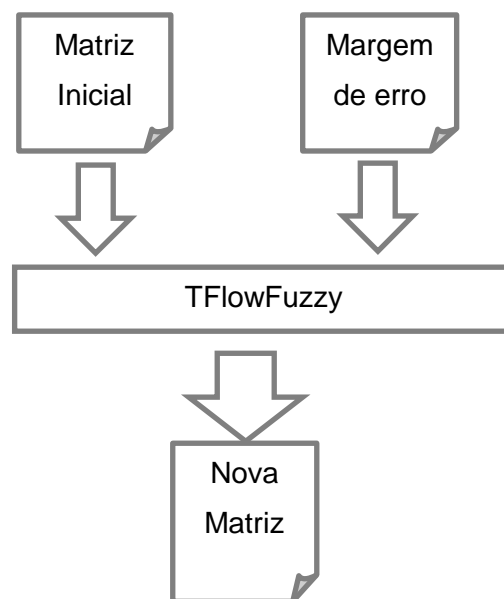


Como todos os procedimentos de correção de uma matriz, “TFlowFuzzy” ajusta a matriz de procura, de modo a que os seus resultados de afetação consigam satisfazer a oferta real observada. O “TFlowFuzzy” foi desenvolvido para corrigir matrizes de viagens, tanto de transporte público, como de transporte privado, utilizando dados de contagens atuais e valores de referência. Os novos dados da matriz são calculados com o auxílio de um método iterativo, o qual se baseia em caminhos calculados a partir de pares O/D individuais.

De acordo com o manual VISUM 11.5 BASIC (2010, capítulo 3), este procedimento pode ser utilizado em diversas situações:

- Quando a matriz da procura, obtida com base em dados de inquéritos está desatualizada e se quer atualizá-la, sem recorrer a uma nova campanha;
- Quando se quer calibrar uma matriz gerada a partir de um modelo de planeamento de transporte (como o modelo dos Quatro Passos), usando as contagens de tráfego;
- Quando se quer melhorar uma matriz gerada a partir de dados incompletos ou não confiáveis, utilizando dados atuais de volume e contagens mais fiáveis.

O algoritmo “TFlowFuzzy” auxilia a resolução destes problemas, tanto para o transporte público como para o transporte privado. A atualização apenas afeta a matriz de procura de viagens, e não a série temporal, referindo-se sempre ao volume total (em vez de volumes por intervalo de tempo) (VISUM 11.5 BASIC, 2010).



**Figura 25: Processo de calibração do “TFlowFuzzy”**

*Fonte: Adaptado de VISUM 11.5 BASIC (2010).*

Para a atualização, os valores da contagem são comparados com os volumes de tráfego modelados, que resultam de uma afetação pré-calculada, da matriz de procura anterior. As diferenças entre os valores de contagem e os volumes são equilibradas pelo ajuste da matriz de procura para o segmento de procura afetado. O caso mais simples refere-se ao segmento de procura individual.

O “TFlowFuzzy” também pode atualizar simultaneamente as matrizes de procura dos diversos segmentos de procura, se apenas os valores de contagem total forem especificados para todos os segmentos de procura.

Em seguida, os dados da contagem específica são distribuídos proporcionalmente à respetiva procura do segmento dos volumes de afetação. A matriz de procura para cada segmento é então atualizada individualmente.

Este é um processo iterativo, visto que recomeça com a diminuição na margem de erro e utiliza a nova matriz calibrada como base. O processo termina quando não se conseguir minimizar mais o volume de tráfego nos arcos.



**Figura 26: Processo iterativo da metodologia “TFlowFuzzy”**

*Fonte: Desenvolvido pela autora com o apoio da Tis.PT*

Na implementação deste algoritmo escolhe-se a opção que determina que o “TFlowFuzzy” só deve considerar a calibração nos arcos que possuem fluxos e contagens de tráfego. É necessário criar uma margem de erro (que se pode guardar na variável “AddValue3”), que ao longo das iterações vai diminuindo, começando com 90%. Deve indicar-se também que o volume calibrado será uma aproximação ao volume

contado (que poderá ser incluído na variável “AddValue1”), mais ou menos a margem de erro.

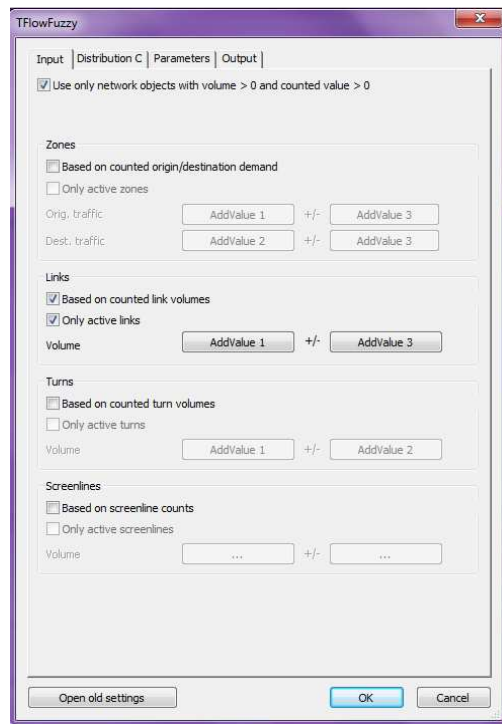


Figura 27: Parâmetros do "TFlowFuzzy"

Na janela do Output, indica-se o lugar onde se irá guardar a matriz O/D resultante.

Operations		Functions			
<input type="checkbox"/> All active					
	Active	Operation	Reference object(s)	Procedure/File	Comment
1	<input type="checkbox"/>	Init assignment		All	
2	<input type="checkbox"/>	Open matrix	2 New matrix	C:\Users\Mafalda\Desktop\TESE\PrT	
3	<input type="checkbox"/>	PrT assignment	C Car	Equilibrium assignment	
4	<input type="checkbox"/>	Calculate PrT skim matrix	C Car		
5	<input type="checkbox"/>	Demand Matrix Correction (TFlowFuzzy)	C Car		

Figura 28: Operações efetuadas na afetação

Finalizada a afetação, deve confirmar-se se os valores agora admitidos pelo “TFlowFuzzy” não diferem em demasia dos originais.

### 3.9 Súmula do capítulo

A construção de um modelo inicia-se pela definição do nível de detalhe, recolha e junção da informação necessária para um bom desempenho do mesmo. Depois é possível proceder-se à codificação da rede, ou seja, ao tratamento dos dados de forma a serem suscetíveis de interpretação de uma forma automática.

É importante também ter em atenção qual o programa de cálculo automático disponível e passível de ser utilizado, em função dos objetivos propostos, bem como as respetivas especificações relativamente aos dados necessários.

Posteriormente pode então começar-se o desenvolvimento do modelo com a definição do zonamento e a seleção dos arcos e nós que constituirão a rede.

Seguidamente deve proceder-se à codificação da rede de modo a possibilitar o seu processamento e análise através de modelos automáticos de afetação.

Após a codificação da rede é necessário determinar os vários custos associados (valor do tempo e custo operacional), os coeficientes relativamente a cada tipo de via para a definição da função de degradação da velocidade e associá-los a cada tipo de arco, para que seja possível obter estimativas de afetação fidedignas e aceitáveis.

Por último efetua-se a um detalhado processo de calibração, tentando corrigir os erros de codificação e minimizar os de previsão. Neste último caso, utilizou-se um algoritmo específico, o “TFlowFuzzy” para, através da aproximação dos fluxos modelados aos fluxos contados, se chegar a uma matriz O/D mais próxima da realidade, sem necessidade do desenvolvimento específico de inquéritos O/D em grande escala.

Após a obtenção de toda a informação, esta será introduzida no VISUM, o programa de cálculo utilizado, que através das suas ferramentas fará a afetação, distribuindo o tráfego pela rede.

## **4. Estudo de Caso**

### **4.1 Introdução**

Neste capítulo é apresentado o modelo de desenvolvimento rodoviário, sendo que a rede a analisar abrange toda a Rede Rodoviária Nacional (RRN) (Figura 29), com especial ênfase nos troços comuns à Rede Transeuropeia (RTE). As bases para a construção do modelo de rede foram fornecidas pelo INIR em formato ArcGIS, referentes ao ano de 2010.

Os dados de tráfego utilizados também foram fornecidos pelo INIR e foram obtidos através das contagens de tráfego relativas ao ano de 2010 fornecidas pelas concessionárias ao INIR.

Para este estudo considerou-se inicialmente construir um zonamento agregado à NUTIII, no entanto, com recurso aos dados disponíveis concluiu-se que tal não era possível visto não existirem dados sobre o volume de tráfego diferenciados para todos os sublanços, tendo-se concluído que o zonamento mais adequado para este modelo coincide com os concelhos (Figura 30).

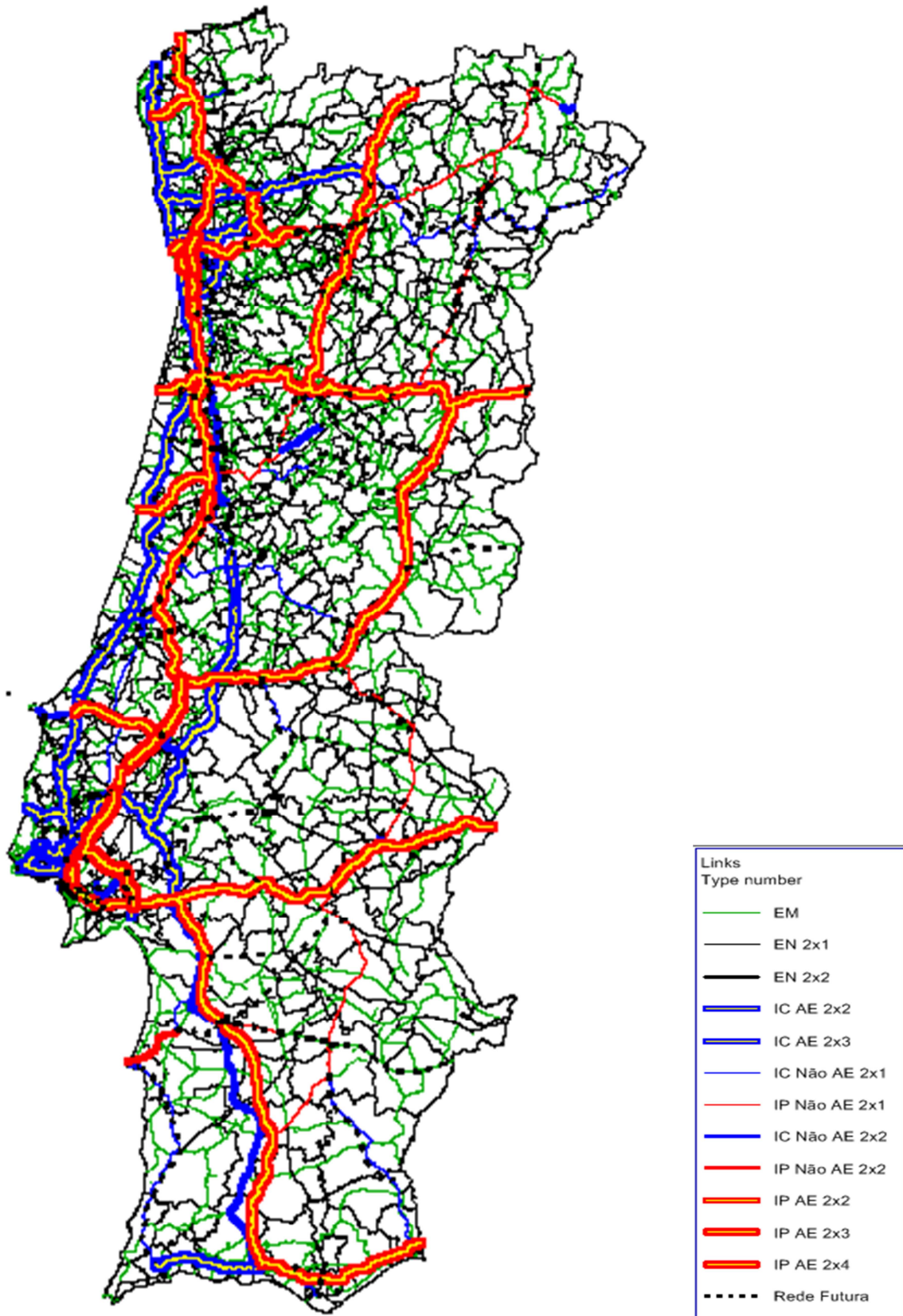


Figura 29: Rede Rodoviária Nacional

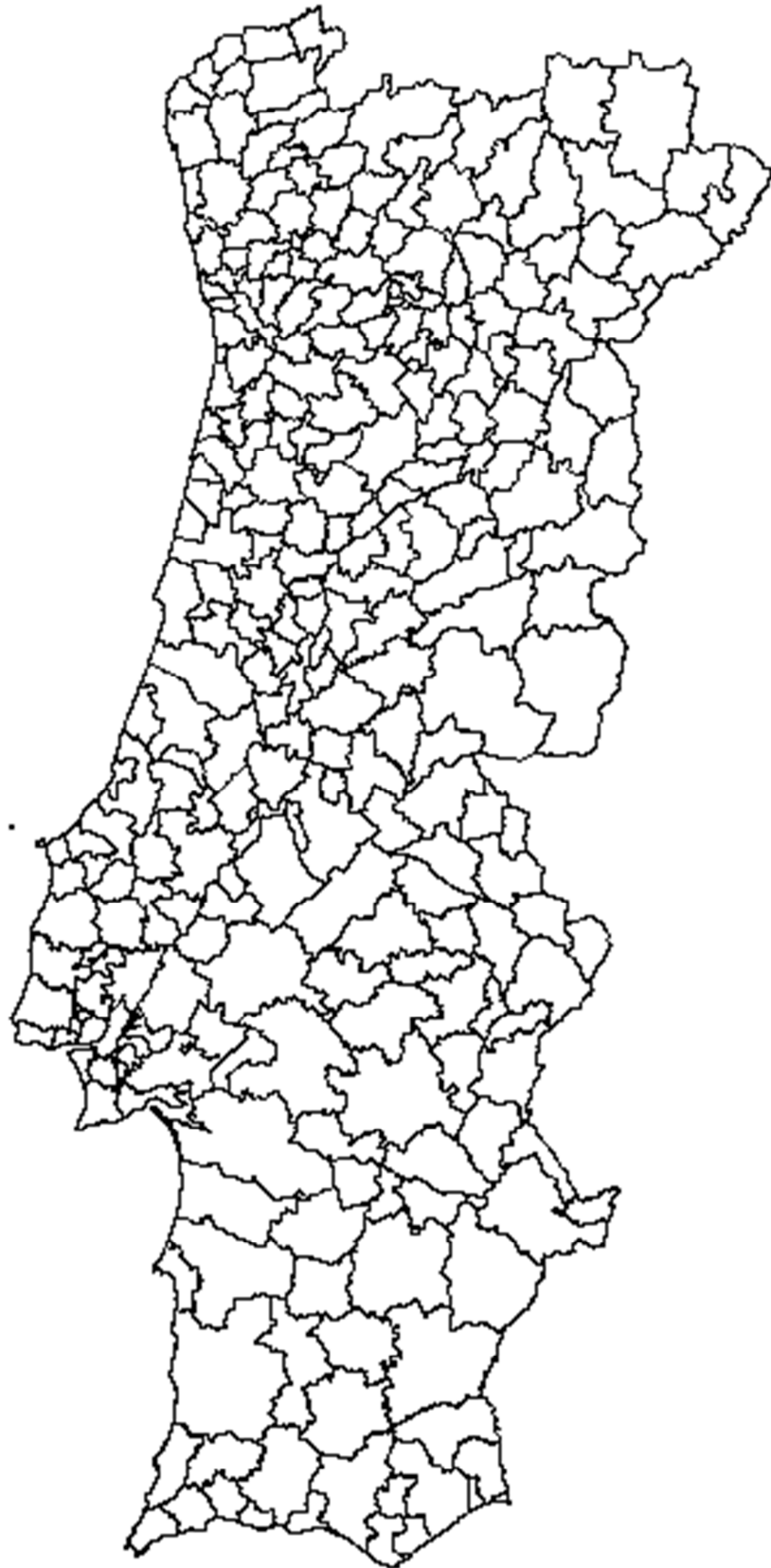


Figura 30: Zonamento ao concelho

A RTE (Figura 31) tem por base a rede estabelecida no Plano Rodoviário Nacional (PRN) que constitui, no âmbito do sistema de gestão territorial, o instrumento sectorial que traduz as opções e objetivos a alcançar em matéria de política de transportes, no domínio das infraestruturas rodoviárias.

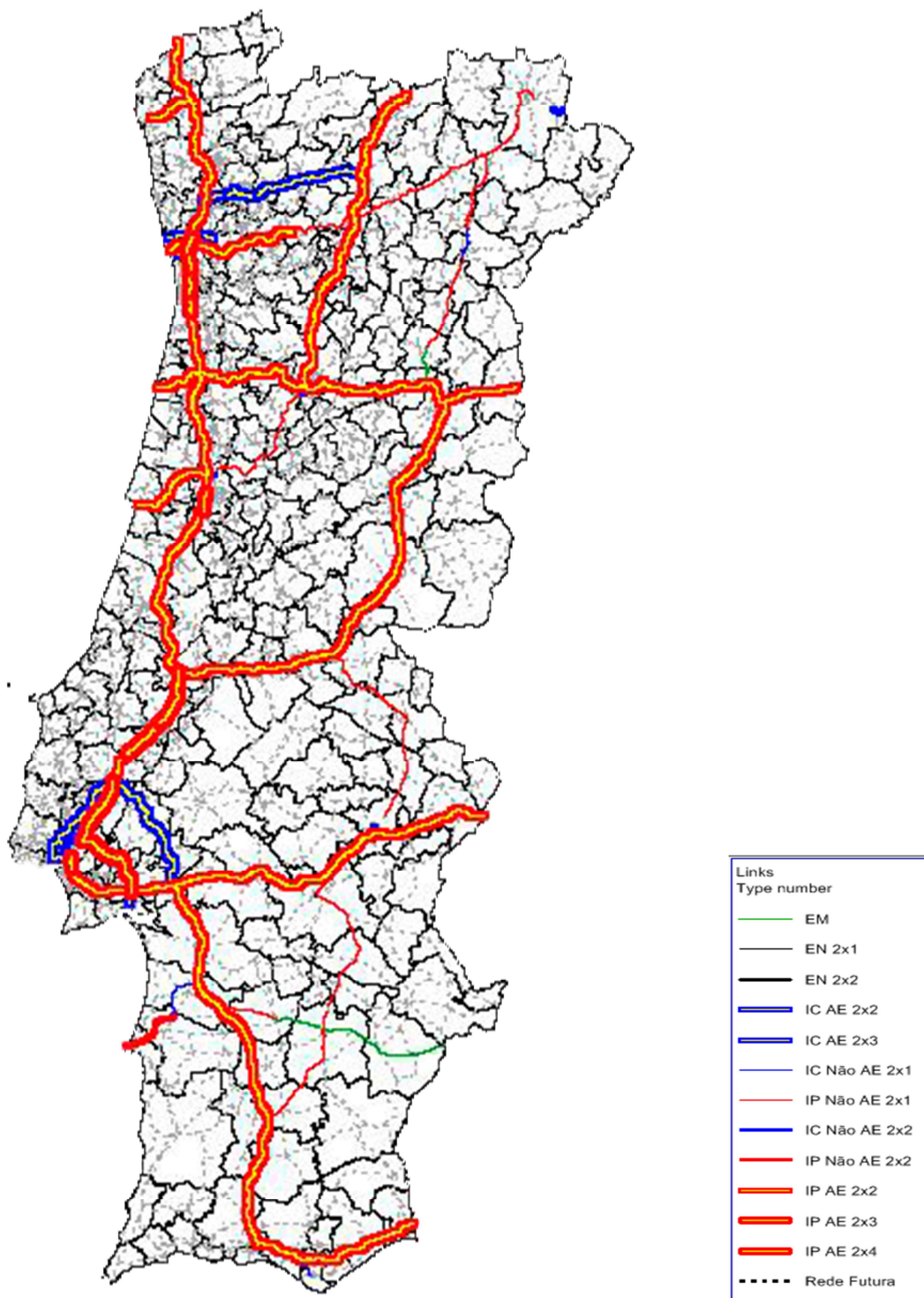


Figura 31: Rede Transeuropeia



Cerca de 69% da RTE são autoestradas e 20% são vias de elevada qualidade de serviço, com nós desnivelados, acessos condicionados e utilização exclusiva para tráfego automóvel. Grande parte dos restantes 11% está assegurada por estradas nacionais (EN) e carece de requalificação no sentido de melhorar e uniformizar as suas características.

A rede foi fornecida numa *shapefile* do ArcGIS, tendo sido posteriormente importada para o VISUM. Neste processo houve necessidade de efetuar várias adaptações, sendo que uma destas correspondeu à existência de diferenças entre o modelo de conectividade dos arcos e nós entre o ArcGIS e o VISUM.

## 4.2 Implementação

Procedeu-se à importação da rede do ArcGIS. De seguida, já no VISUM, foram estabelecidas diferentes classes de arcos (*link type*), segundo as classificações já apresentadas anteriormente, com o objetivo de diferenciar as características da rede em função do tipo de estrada. Por exemplo: tipo de sistema de transporte, capacidade, velocidade, tipos de vias, número de vias, etc.. De seguida associou-se a cada arco (*link*) um *link type*, fazendo com que as características de cada tipo de arcos sejam ‘herdadas’ pelos respetivos arcos.

### 4.2.1 Contagens de tráfego

As contagens de tráfego, referentes ao ano de 2010, foram fornecidas pelo Gabinete de Controlo de Gestão e Sistemas de Informação do InIR. Os elementos de tráfego foram apresentados por sublanço de autoestrada, desagregados por mês e por classes de portagem<sup>10</sup>, tendo sido necessário fazer o cálculo do tráfego por veículos ligeiros e por veículos pesados, para uma melhor análise.

Para o cálculo do tráfego médio diário (TMD) dos veículos ligeiros a fórmula utilizada foi:

$$TMD \text{ ligeiros} = \text{Classe 1} + 70\% \text{ Classe 2} + \text{Classe 5}$$

**Equação 26: Cálculo do tráfego médio diário dos veículos ligeiros**

Para o cálculo do tráfego médio diário dos veículos pesados utilizou-se a seguinte fórmula:

---

<sup>10</sup> Site com as classificações das classes de portagem da brisa: <http://www.brisa.pt/PresentationLayer/conteudo.aspx?menuid=18>

$$TMD \text{ pesados} = 30\% \text{ Classe 2} + \text{Classe 3} + \text{Classe 4}$$

**Equação 27: Cálculo do tráfego médio diário dos veículos pesados**

Como os dados do tráfego utilizados foram fornecidos por mês, calculou-se em primeiro lugar o valor do tráfego anual e depois dividiu-se pelos 365 dias, relativos a um ano. Conseguindo-se assim obter um valor do tráfego médio diário de veículos ligeiros e de veículos pesados por sublanço de autoestrada.

**Quadro 18: Exemplo de contagem de tráfego do sublanço Alverca (A1/A9) - V. F. Xira II, 2010**

Alverca (A1/A9) – Vila Franca de Xira II									
	Classes de portagem					TMD mês	TDM Ligeiros	TMD pesados	TMDA total
	1	2	3	4	5				
<b>Janeiro</b>	51.065	8.090	521	3.737	43	63.456	56.771	6.685	
<b>Fevereiro</b>	53.504	8.854	575	4.244	59	67.236	59.761	7.475	
<b>Março</b>	53.999	8.858	581	4.451	57	67.946	60.257	7.689	
<b>Abril</b>	56.862	8.906	565	4.246	95	70.674	63.191	7.483	
<b>Mai</b>	56.800	9.120	567	4.190	102	70.780	63.286	7.494	
<b>Junho</b>	54.568	8.872	561	4.336	115	68.452	60.894	7.559	
<b>Julho</b>	57.133	9.200	601	4.483	112	71.529	63.685	7.845	
<b>Agosto</b>	56.805	8.512	536	4.174	116	70.143	62.880	7.263	
<b>Setembro</b>	56.667	9.003	586	4.459	106	70.820	63.074	7.745	
<b>Outubro</b>	55.916	8.625	543	4.080	84	69.248	62.038	7.211	
<b>Novembro</b>	54.819	8.833	561	4.269	67	68.548	61.069	7.479	
<b>Dezembro</b>	55.370	8.109	507	3.857	36	67.880	61.083	6.797	
<b>TOTAL</b>							61.507	7.391	68.898

No processo de modelação a procura de tráfego foi trabalhada à unidade veículo ligeiro equivalente (u.v.e.), tendo-se considerado um fator de equivalência unitário no caso dos veículos ligeiros e duplo no caso dos veículos pesados, como se apresenta no quadro a título ilustrativo:

Quadro 19: Exemplo de conversão do tráfego para unidade de veículo ligeiro equivalente (u.v.e.), 2010

Sublanço	TMDA	Ligeiros	Pesados	Conversão em u.v.e.	
				Tráfego	Tráfego por sentido
Alverca – V.F.Xira II	68.898	61.507	7.391	76.289	38.145
V.F. Xira II - V.F.Xira I	70.463	61.765	8.698	79.161	39.581
V.F. Xira I – A1/A10	37.805	34.415	3.390	41.195	20.598

As contagens foram adicionadas no VISUM no campo de dados (definidos pelo utilizador) no atributo “AddValue1”.

Relativamente a este estudo, em algumas situações não foi possível considerar as contagens de tráfego por sublanço visto o zonamento adotado (demasiadamente agregado), não permitir explicar as diferenças de procura de tráfego que se registam entre sublanços. Nesses casos foi calculado um valor médio ponderado do conjunto dos sublanços, assumindo-se, para efeitos de modelação, que essa é a procura registada.

#### 4.2.2 Valor do Tempo

Relativamente ao cálculo do valor do tempo, designado no VISUM por “TCur\_PrTSys”, foram adotados os seguintes valores.

Quadro 20: Cálculo do Valor do Tempo

		Fonte UNITE (2006) <sup>11</sup>	Valores Atualizados ao Ano de Estudo (2010)
Ligeiros	Casa-Trabalho	5,24	5,784
	Em negócio	18,35	20,26
Pesados		37,57	41,47

Nota: custos constantes de 2010 [Euros/hora]

Admitiu-se que cerca de 82% dos veículos ligeiros faziam casa – trabalho e cerca de 18% circulavam em negócio e chegou-se a um valor médio de 8,38€/h relativamente aos veículos ligeiros.<sup>12</sup>

<sup>11</sup> Valores referentes ao projeto Europeu UNITE, para Portugal, que foram atualizados através da taxa de inflação para 2010.

<sup>12</sup> Valores assumidos após consulta de especialistas da área.

Sendo que os ligeiros representavam cerca de 90% dos veículos registados nos dados de tráfego e os pesados os restantes 10% dos veículos circulantes, estimou-se assim que o valor do tempo médio global em cerca de 11,70€/h.

#### 4.2.3 Custos de operação

Relativamente ao custo de operação dos veículos, somente foram considerados custos quilométricos e foram adotados os valores apresentados no Quadro 21. Não se considerou a fórmula utilizada no capítulo 3, visto ser uma fórmula usada predominantemente para a análise custo/benefício gerando valores muito elevados que não são eficazes em termos de análise de mobilidade.

Considerou-se que cerca de 40% de veículos ligeiros em circulação consomem gasolina e os restantes 60% (a maioria) consome gasóleo. Já no caso dos pesados, admitiu-se que todos consomem gasóleo, tendo-se assim obtido os seguintes valores para os custos por quilómetro:

Quadro 21: Cálculo dos custos de operação

		Consumo específico dos veículos	Custo do combustível (20-05-2011)	
		l/100km	€/l	€/veic.km
Ligeiros Gasolina 95	40%	8	1,63	0,130
Ligeiros Gasóleo	60%	8	1,44	0,115
Veículo ligeiro equivalente (40% Gasolina + 60% Gasóleo)		8	1,516	0,121
Pesados Gasóleo		18	1,44	0,259

Admitindo também que cerca de 90% dos veículos eram ligeiros e 10% eram pesados, conclui-se assim que o custo total por veículo tipo equivalente será de cerca de 0,135€ por quilómetro.

Relativamente ao valor da portagem, designado no VISUM por “*Toll\_PrTSys*”, este custo é, talvez, o que o condutor se apercebe mais facilmente e que tem bastante influência na sua decisão para a escolha de caminhos. Os dados utilizados para o cálculo são referentes aos custos das portagens relativas ao ano de 2010.

Sabendo a quantidade de veículos ligeiros e pesados que circulam por classe de portagem e sabendo a tarifa referente a cada classe de portagem, conseguiu-se assim estimar um valor aproximado por veículo.kilómetro (vkm) para a portagem.

Considerou-se que os ligeiros representam cerca de 92% da classe 1 e 8% da classe 2, e que os pesados representam 25% da classe 2, 15% da classe 3 e 60% da classe 4 de portagem, tendo-se assim obtido os seguintes valores, como se ilustra, a título de exemplo, nos quadros seguintes:

**Quadro 22: TMDA nas várias classes de portagem**

Sublanço	TMDA Ligeiros	TMDA Pesados	Ligeiros		Pesados		
			Classe 1	Classe 2	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Alverca (A1/A9) – V.F.Xira II	61.507	7.391	56.586	4.921	1.848	1.109	4.435
Santarém – A1/A15	37.451	3.959	34.455	2.996	990	594	2.375
Pombal – Condeixa	24.239	2.387	22.300	1.939	597	358	1.432

Para o cálculo da tarifa média ponderada por quilómetro de veículo foi necessário em primeiro lugar calcular uma tarifa média ponderada por quilómetro relativamente a ligeiros e pesados.

**Quadro 23: Tarifas por classes de portagens (Ligeiros e Pesados)**

Sublanço	TMDA Ligeiros	Ligeiros		Tarifa por km		Tarifa/Km
		Classe 1	Classe 2	Classe 1	Classe 2	
Alverca (A1/A9) – V.F.Xira II	61.507	56.586	4.921	0,00 <sup>13</sup>	0,00	0,000
Santarém – A1/A15	37.451	34.455	2.996	0,06	0,11	0,067
Pombal - Condeixa	24.239	22.300	1.939	0,06	0,11	0,067

<sup>13</sup> A portagem é nula por ser um sublanço sem portagem.

Sublanço	TMDA Pesados	Pesados			Tarifa por km			Tarifa/ Km
		Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 2	Classe 3	Classe 4	
Alverca (A1/A9) – V.F.Xira II	7.391	1.848	1.109	4.435	0,00	0,00	0,00	0,000
Santarém – A1/A15	3.959	990	594	2.375	0,11	0,14	0,16	0,144
Pombal - Condeixa	2.387	597	358	1.432	0,11	0,14	0,16	0,144

Posteriormente calculou-se a tarifa média ponderada por quilómetro de veículo utilizando a seguinte equação:

$$Tarifa\ média = \frac{TMDA\ Ligeiro \times Tarifa\ de\ ligeiro + TDMA\ Pesado \times Tarifa\ Pesado}{TDMA}$$

**Equação 28: Cálculo da Tarifa média**

Tendo-se assim obtido uma média ponderada da tarifa média, cujo valor final do custo de portagem é de cerca de 0,09€/km, sendo que por uma questão de simplificação se optou por usar este valor único em toda a rede.

#### 4.2.4 Definição inicial da matriz O/D

Relativamente à matriz Origem-Destino (O/D) inicial, foi utilizada uma matriz de inquéritos à mobilidade, por concelho, disponibilizada pelo INE (Instituto Nacional de Estatística), referente aos modos de transportes utilizados pelas pessoas relativamente a deslocações casa – trabalho – casa. A matriz refere-se às deslocações no ano 2001, tendo sido usada no modelo com os centróides definidos à sede do concelho, como já foi referido antes.

Com base nesta matriz de inquéritos foi produzida uma matriz O/D inicial para as deslocações no modo rodoviário (como condutor), uniformizada aos concelhos. No processo de transformação da matriz foi necessário fazer a simetrização da mesma, visto que a matriz de viagens fornecida não era simétrica e para a análise de padrões regionais de viagens diárias, a matriz O/D deve ser considerada simétrica. Para tal, fez-se a média de ambos os pares O/D simétricos, obtendo-se assim, a matriz O/D base a utilizar no estudo de caso.

Quadro 24: Extrato da Matriz O/D base

	1	2	3	4	5	6	7	...	278
1	0	70	16	70	16	8	3	...	1
2	70	0	34	104	198	30	64	...	1
3	16	34	0	10	341	2034	50	...	0
4	70	104	10	0	17	12	5	...	0
5	16	198	341	17	0	94	198	...	0
6	8	30	2034	12	94	0	30	...	0
7	3	64	50	5	198	30	0	...	1
...	...	...	...	...	...	...	...	...	0
278	1	1	0	0	0	0	1	0	0

Após a uniformização da matriz constatou-se que existiam muitos pares O/D nulos, e como o VISUM não permite fazer a afetação da matriz à rede com valores nulos, esses valores foram alterados, adotando-se nos mesmos um valor constante, não nulo, de 0,1.

Para que o tráfego transfronteiriço pudesse ser considerado, houve necessidade de criar quatro novas zonas, correspondentes às ligações externas, às quais foram associados conectores para que se conseguisse simular os volumes de tráfego nas ligações de fronteira.

Visto que a matriz de inquéritos do INE só se referia a deslocações casa-trabalho-casa, foi considerada a majoração das viagens descritas, multiplicando cada par O/D por uma constante. Utilizaram-se várias constantes para o efeito e após algumas tentativas de afetação, e conjugadas com a consulta de outros trabalhos similares e o apoio de peritos na área, assumiu-se que o mais indicado seria efetuar uma majoração de 15% à matriz O/D inicial.

**Quadro 25: Extrato da Matriz O/D majorada**

	1	2	3	4	5	6	7	...	282
1	0	80,5	18,4	80,5	18,4	9,2	3,45	...	0,115
2	80,5	0	39,1	119,6	227,7	34,5	73,6	...	0,115
3	18,4	39,1	0	11,5	392,15	2339,1	57,5	...	0,115
4	80,5	119,6	11,5	0	19,55	13,8	5,75	...	0,115
5	18,4	227,7	392,15	19,55	0	108,1	227,7	...	0,115
6	9,2	34,5	2339,1	13,8	108,1	0	34,5	...	0,115
7	3,45	73,6	57,5	5,75	227,7	34,5	0	...	0,115
...	...	...	...	...	...	...	...	...	0,115
282	0,115	0,115	0,115	0,115	0,115	0,115	0,115	0,115	0

#### 4.2.5 Estimação da matriz O/D com base na metodologia “TFlowFuzzy”

Inicialmente introduziu-se a matriz de O/D base no VISUM para se proceder à calibração dos arcos (*links*). Verificou-se para todos os arcos (*links*) que possuíam contagens de tráfego reais se estes tinham ou não volumes de tráfego, e nos casos que não tinham verificou-se qual o motivo e procedeu-se às devidas correções. O principal motivo estava geralmente associado à existência de uma velocidade muito elevada em estradas de hierarquia mais baixa, o que fazia com que determinado tráfego escolhesse esses caminhos secundários e não um caminho através de estradas com uma hierarquia mais elevada.

Relativamente às cidades com grandes dimensões e importância regional, como por exemplo, Lisboa, Loures, Cascais, Figueira da Foz, Porto, Vila Nova de Gaia, optou-se pela criação de dois ou mais conectores para uma distribuição mais homogénea do volume de tráfego da zona, por cada conector, fazendo com que o tráfego se distribua mais uniformemente pela rede.

O processo de calibração da matriz base foi um processo muito demorado composto por várias iterações, tendo sido utilizada uma folha de cálculo em Excel como ferramenta auxiliar.

Primeiramente procedeu-se à validação dos valores das contagens de tráfego comparando as contagens fornecidas com os volumes de tráfego modelado no VISUM (Quadro 26).



**Quadro 26: Exemplo de validação inicial dos valores das contagens**

RNA	Nome	Contagens	Modelo	Diferença	
				%	Valor
A1	Carregado – Aveiras de Cima	29.804	14.033	-53	-15.771
A1	Torres Novas - Fátima	15.107	10.687	-29	-4.420
A23	Zibreira – Torres Novas	6.378	8.395	32	2017

Numa primeira iteração adotou-se um intervalo de margem de erro de cerca de  $\pm 40\%$  tendo-se diminuído este valor ao longo do processo até chegar a cerca de  $\pm 20\%$ , visto as variações de tráfego não serem muito elevadas.

**Quadro 27: Exemplo de validação final dos valores das contagens**

RNA	Nome	Contagem	Modelo	Diferença	
				%	Valor
A1	Carregado – Aveiras de Cima	29.804	29.100	-2	-704
A1	Torres Novas – Fátima	15.107	14.984	-1	-123
A23	Zibreira – Torres Novas	6.378	6.360	0	-18

Calculou-se a diferença, em valor e em percentagem, entre o volume de tráfego que o modelo de afetação calcula e as contagens de tráfego fornecidas, conseguindo-se assim proceder à verificação dos arcos (*links*) que possuíam volumes muito baixos ou volumes muito elevados. Como se pôde verificar no quadro, em certos casos existia um volume de procura muito inferior ao registado nas contagens, pelo que, para esses casos, foi necessário calibrar o arco (*link*).

Para a calibração dos arcos (*links*) que apresentavam grandes diferenças entre os volumes e as contagens de tráfego calculou-se um valor médio dessa diferença e, conhecendo-se o número de pares O/D da matriz inicial que possuíam valor nulo (mais concretamente 0,1), determinou-se o quociente entre estes dois valores.

Com o auxílio da matriz do arco (*link*) em questão, acrescentou-se esse valor calculado à matriz inicial, obtendo-se assim uma nova matriz. Este processo foi executado para todos os arcos (*links*) que possuíam este problema.

**Quadro 28: Calibração dos arcos (links) com volumes muito baixos**

Contagem	Modelo
43.038	20.780

<b>Valor médio da diferença</b>	11.129
<b>Pares O/D nulos no link</b>	2.826
<b>Valor distribuído para cada par O/D</b>	3,938

Ao mesmo tempo que se corrigiam os arcos (*links*), fazia-se o controlo da matriz.

No processo de calibração da matriz, inicialmente, admitiu-se um intervalo de  $\pm 20\%$  para a variação da matriz inicial como um limite superior e inferior que a matriz possa variar, mas após várias tentativas verificou-se que não era possível e adotou-se uma variação de cerca de  $\pm 40\%$ , como já foi referido.

De seguida, calculou-se a diferença, tanto em percentagem, como em valor, entre os pares O/D da matriz do "TFlowFuzzy" com os da matriz inicial.

**Quadro 29: Controlo da matriz inicial com a matriz do "TFlowFuzzy"**

O	D	Matriz inicial	Matriz "TFF"
1	1	0	0
1	2	80,5	151
1	3	18,4	67
1	4	80,5	151
1	5	18,4	67
1	6	9,2	76
1	7	3,45	67
1	8	2,3	55
1	9	0	3

Admitiu-se, ainda, um valor absoluto de 50 como uma margem para os casos em que a matriz inicial possuía valores muito baixos nos pares O/D, restringindo assim a calibração da matriz final a valores tão baixos. Experimentou-se com valores mais baixos do que 50, mas os resultados obtido não foram satisfatórios.

Quadro 30: Limites do intervalo de variação

Diferença		-40%	+40%
Valor	%	Limite inferior	Limite Superior
0	0%	0	0
71	188%	48	113
49	365%	11	26
71	188%	48	113
49	365%	11	26
67	829%	6	13
64	1947%	2	5
53	2387%	1	3
3	275%	0	0

Com estas restrições, determinou-se uma “*matriz controlada1*” na qual o valor de cada par O/D foi calculado através da seguinte condição: se o valor do par O/D da matriz do “TFlowFuzzy” for inferior ou superior ao intervalo de variação ( $\pm 40\%$ ), considera-se o valor do limite correspondente, inferior ou superior, senão considera-se o valor da matriz do “TFlowFuzzy”.

Obtida a “*matriz controlada1*”, calculou-se outra matriz, que se designou “*matriz controlada2*”, a qual restringe os valores dos pares O/D calculados na “*matriz controlada1*” com valores de viagens não muito baixos, respeitando assim o valor absoluto da margem aplicada. Utilizou-se a seguinte restrição: se o valor da “*matriz controlada1*” for inferior à margem e se a diferença em valor entre a matriz do “TFlowFuzzy” e a matriz inicial for superior à margem, então considera-se o valor da margem, senão considera-se o valor da “*matriz controlada1*”.

Quadro 31: Matrizes controladas

Matriz controlada 1	Matriz controlada 2
0	0
113	113
67	67
113	113
67	67
13	50
5	50
3	50
3	3

Depois de concluídas estas etapas todas conseguiu-se determinar uma matriz O/D o mais fidedigna possível a um estado de tráfego que reflita contagens nos arcos muito próximas das contagens reais obtidas por monitorização da rede. **Ou seja, a partir de um inquérito (só viagens casa-trabalho-casa) do INE, disponível ao público, conseguiu-se ‘calibrar’ uma matriz O/D muito satisfatória e obter um modelo global que permite alcançar os objetivos propostos de forma bastante próxima da realidade.**

Quadro 32: Extrato da matriz O/D final

	1	2	3	4	5	6	.....	281	282
1	0	151	67	151	67	76	.....	0	0
2	151	0	98	225	428	89	.....	59	0
3	67	98	0	67	738	4400	.....	59	0
4	151	225	67	0	67	79	.....	0	0
5	67	428	738	67	0	203	.....	59	0
6	76	89	4400	79	203	0	.....	34	0
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
281	0	59	59	0	59	34	.....	0	0
282	0	0	0	0	0	0	.....	0	0

#### 4.2.6 Resultados síntese do processo de ajustamento da matriz O/D

Nesta subsecção apresentam-se os principais resultados do processo intermédio de validação das contagens de tráfego. Como se pode observar nos gráficos (Figuras 32 e

33), através de aplicação das técnicas de modelação descrita na subsecção anterior conseguiu-se melhorar muito o volume das contagens de tráfego estimados pelo VISUM e, conseqüentemente, a matriz O/D que esteve na sua base. Isto, de forma a aproximar os fluxos estimados das contagens de tráfego reais nos sublanços onde estas foram disponibilizadas.

O gráfico da Figura 32 representa nas abcissas o valor das contagens de tráfego fornecidas (organizadas em função do seu valor) e nas ordenadas os valores do volume (fluxo de u.v.e.) estimado pelo modelo. Quanto mais estes valores se aproximarem da reta de igual ajustamento, melhor serão as estimativas obtidas a partir do modelo.

Cada símbolo representa um sublanço de autoestrada.

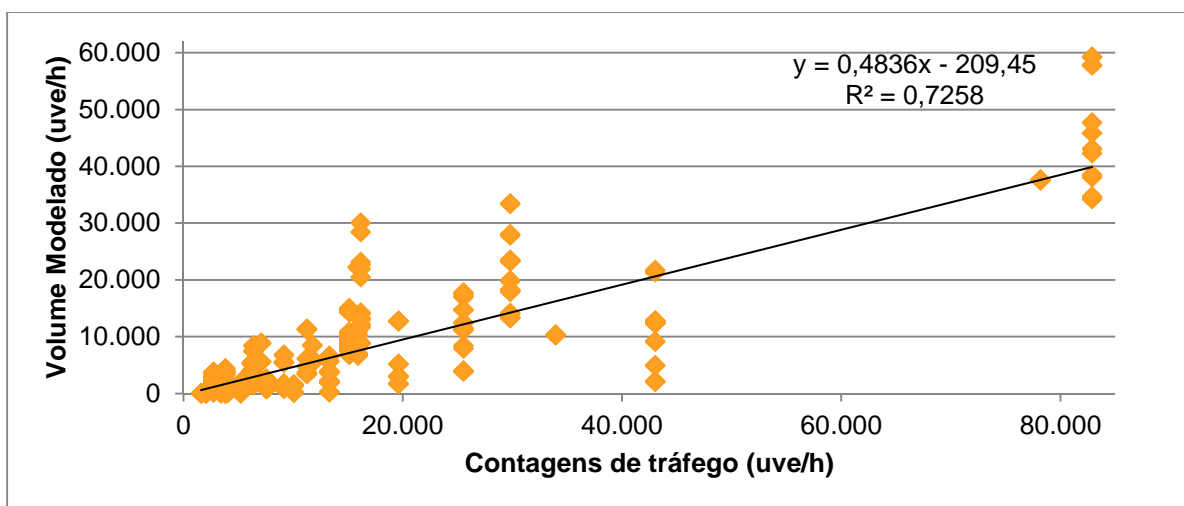


Figura 32: Gráfico da validação das contagens de tráfego (inicial)

Ao longo do processo de validação conseguiu-se uniformizar bastante o volume de tráfego modelado, tendo-se obtido ao fim de várias iterações, o ajustamento ilustrado no gráfico da Figura 33, o qual pode ser considerado bastante bom.

Como se pode observar existem algumas discrepâncias em certos valores de contagens, que ocorrem devido a situações específicas que já foram descritas anteriormente, em que foi necessário calcular um valor de contagem ponderado, devido ao tipo zonamento utilizado.

Referem-se os valores de cerca de 80.000 u.v.e./h na autoestrada A5, os valores de cerca de 30.000 u.v.e./h no início da autoestrada A1 e a 2ª Circular, e os valores de cerca de 20.000 u.v.e./h, em que o volume do modelo toma valores de quase o dobro e que se referem à autoestrada A9.

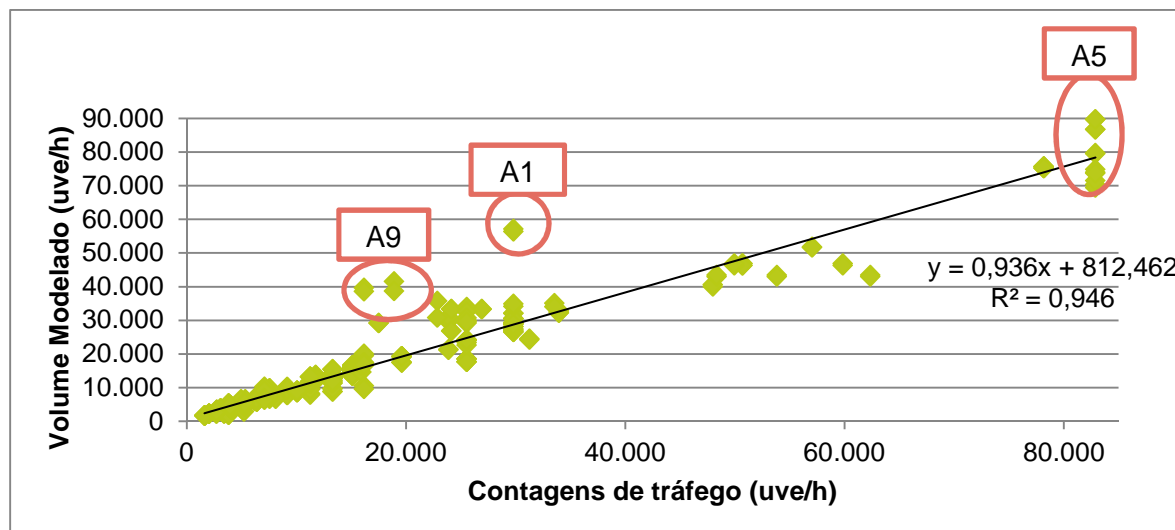


Figura 33: Gráfico da validação das contagens de tráfego (final)

Estes valores “desajustados” poderão vir a ser corrigidos numa futura versão do modelo que contenha um zonamento mais desagregado em torno destas vias.

#### 4.2.7 Cálculo dos Níveis de Serviço

Relativamente ao cálculo do nível de serviço adaptaram-se as fórmulas do HCM como base para o cálculo da densidade e subsequentemente, do nível de serviço. Para tal admitiu-se que os fluxos horários equivalentes,  $V_p$ , representam aproximadamente 10% do valor do TMDA, que foi o volume usado no modelo. Foi também utilizada a velocidade média,  $V_{cur}$ , do VISUM, que corresponde à velocidade corrente gerada pelo modelo para cada sublanço.

Com base na análise de projetos similares e documentação conexa (facultada e acedida no InIR), foi admitido um fator de ponta horária (quociente entre o débito da ponta máxima de 15 minutos e o volume da hora de ponta) de 0,81.

Depois de calculada a densidade (K) e com o auxílio do Quadro 17, conseguiu-se estimar o nível de serviço de cada sublanço.

Quadro 33: Cálculo do nível de serviço

Sublanço	Volume Modelo	Fluxo horário (u.v.e.)	V <sub>cur</sub> (km/h)	Densidade k (u.v.e./km)	Nível de Serviço
Carregado – Aveiras de Cima	29.100	2.910	118	25	E
Cartaxo – Santarém	26.503	2.650	119	22	E
Torres Novas – Fátima	14.984	1.498	120	12	C

Concluído o processo de calibração e de estimação da matriz O/D final, o modelo ficou preparado para se proceder a análises com o mesmo. Os resultados destas análises são apresentados na secção seguinte.

### **4.3 Análise de resultados**

Foram analisados três cenários futuros de variação dos níveis de tráfego, com pressupostos diferentes, cujo horizonte é de 20 anos, mas que servem para balizar, dentro de probabilidades plausíveis de ocorrência, os desenvolvimentos que expectavelmente irão ocorrer no setor da infraestrutura rodoviária:

- Um cenário otimista, considerando um crescimento anual do tráfego de 1%;
- Um cenário muito otimista, com um crescimento anual do tráfego de 2%;
- Um cenário pessimista, com uma redução de 1% anual no tráfego.

De forma simplificada, admite-se que a procura (a matriz O/D) tem um crescimento uniforme ao longo do período de desenvolvimento dos cenários, tendo-se optado por não fazer diferenciação de crescimento entre zonas urbanas e zonas rurais.

Apresenta-se uma síntese das análises obtidas através do desenvolvimento dos cenários já definidos. Adicionalmente foi feita a comparação no envelope definido pelos três cenários propostos do valor dos indicadores de nível de serviço, saturação e velocidade corrente.

#### **4.3.1 Resultados para o cenário otimista – crescimento do tráfego a 1% ao ano**

Como já foi referido, posteriormente à fase de modelação procedeu-se à elaboração de vários cenários de evolução. Em primeiro lugar foi desenvolvido um cenário otimista, no qual foi admitido um crescimento anual do tráfego de cerca de 1% durante 20 anos.

De acordo com as características do modelo desenvolvido, cuja calibração assentou principalmente na aferição das contagens de tráfego em postos de contagem existentes na rede de autoestradas, e tendo em conta as limitações de recursos e tempo que um trabalho académico desta natureza implica, procedeu-se somente à análise detalhada da rede rodoviária transeuropeia (RTE). Para esta rede apresentam-se os gráficos síntese correspondentes aos indicadores de saturação, velocidade corrente e níveis de serviço, para o cenário otimista e para os outros cenários nas respetivas secções.

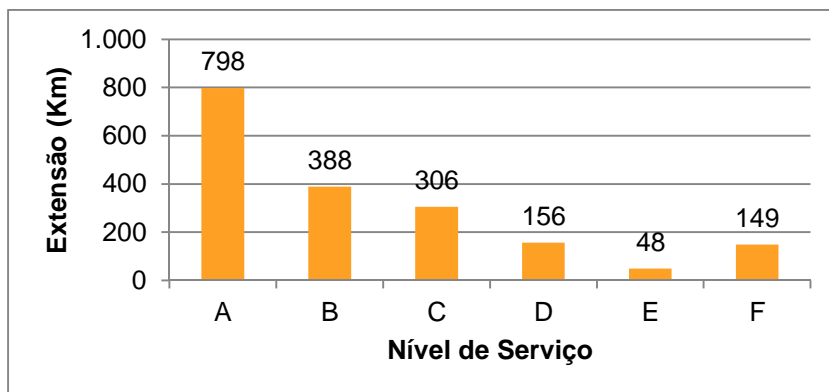


Figura 34: Extensão de vias classificadas em cada nível de serviço, no cenário otimista

O cenário de crescimento otimista implica a existência de cerca de 150 km de rede com nível de serviço F e cerca de 50 km com nível de serviço E.

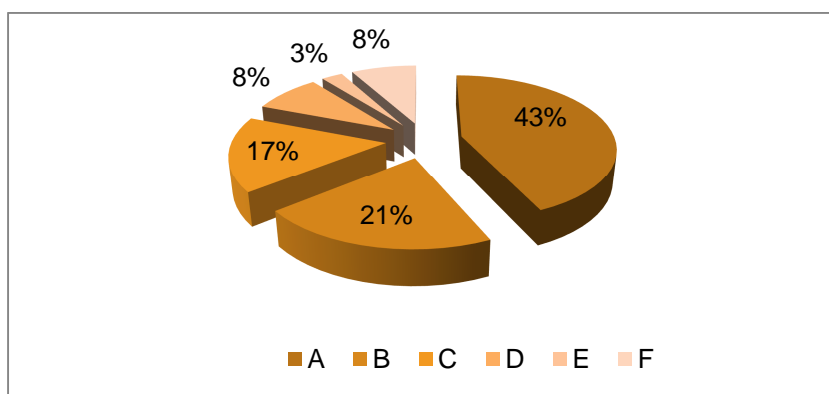


Figura 35: Percentagens da extensão de vias de cada nível de serviço, no cenário otimista

Através da análise dos gráficos constatou-se que o nível de serviço A é aquele que se verificará numa maior extensão de rede, o que reflete o elevado nível de qualidade global da RTE. Especificamente, a rede com nível de serviço A terá no horizonte de 20 anos, uma cobertura de cerca de 43% da extensão total analisada. Somente cerca de 8% da rede terá qualidade de nível de serviço F e 3% de nível de serviço E.

Em relação ao indicador da saturação, a figura seguinte demonstra, relativamente à rede em estudo, quais as vias que no ano horizonte de projeto se encontrarão mais ou menos saturadas.



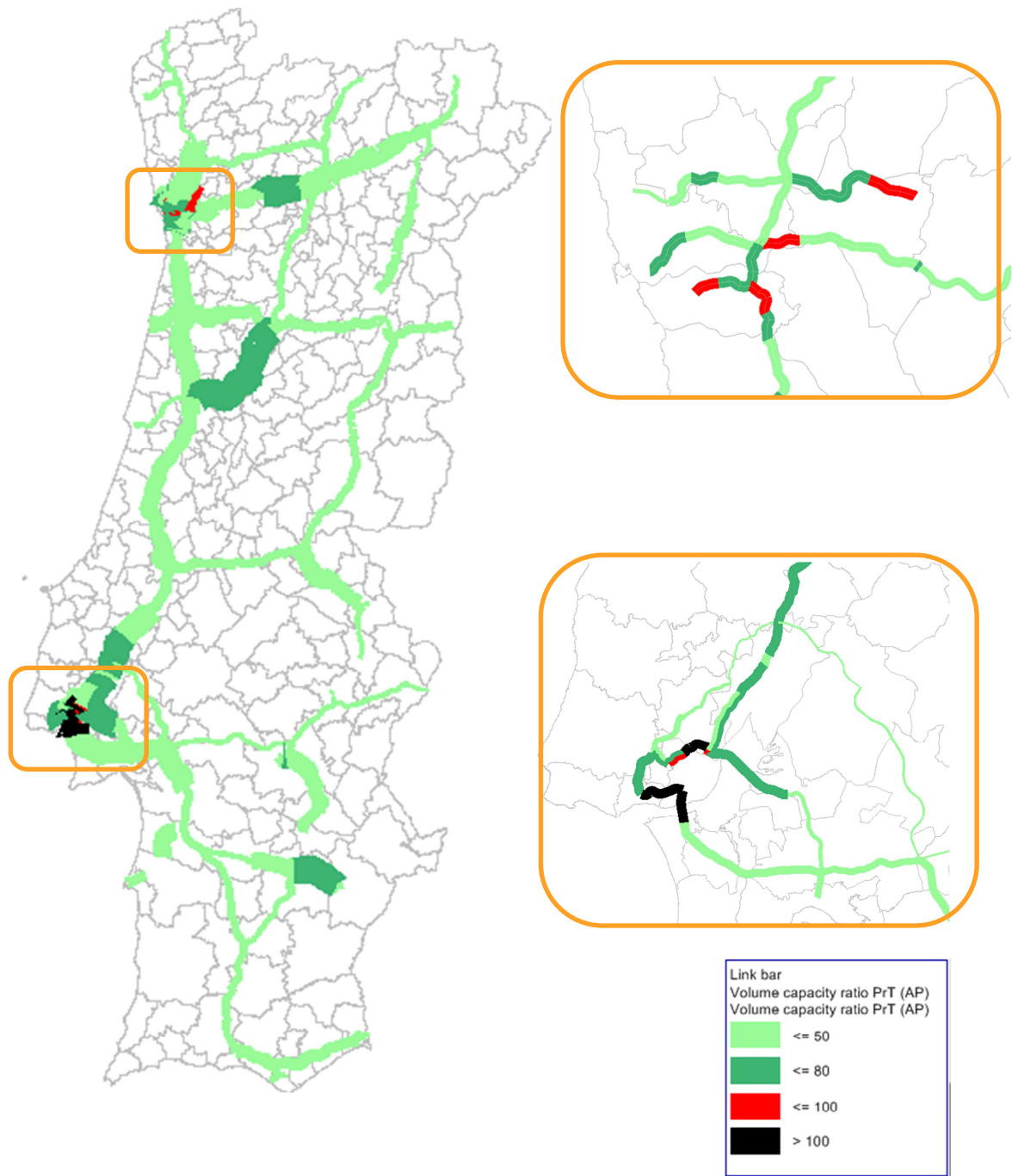


Figura 36: Mapa de saturação da rede no cenário otimista

Como se pode observar, nas áreas metropolitanas de Lisboa e Porto existem sublanços que terão níveis de saturação muito elevados, sendo que na zona de Lisboa correspondem às autoestradas A5, IC17 e Ponte 25 de Abril e no Porto à A20, A4 e A41.

Relativamente à velocidade corrente, na figura seguinte observa-se que na maior parte da rede de autoestrada será possível circular a uma velocidade superior a 100km/h, sendo que nas vias de hierarquia mais baixa, nos IP's, se circulará a uma velocidade superior a 50km/h.

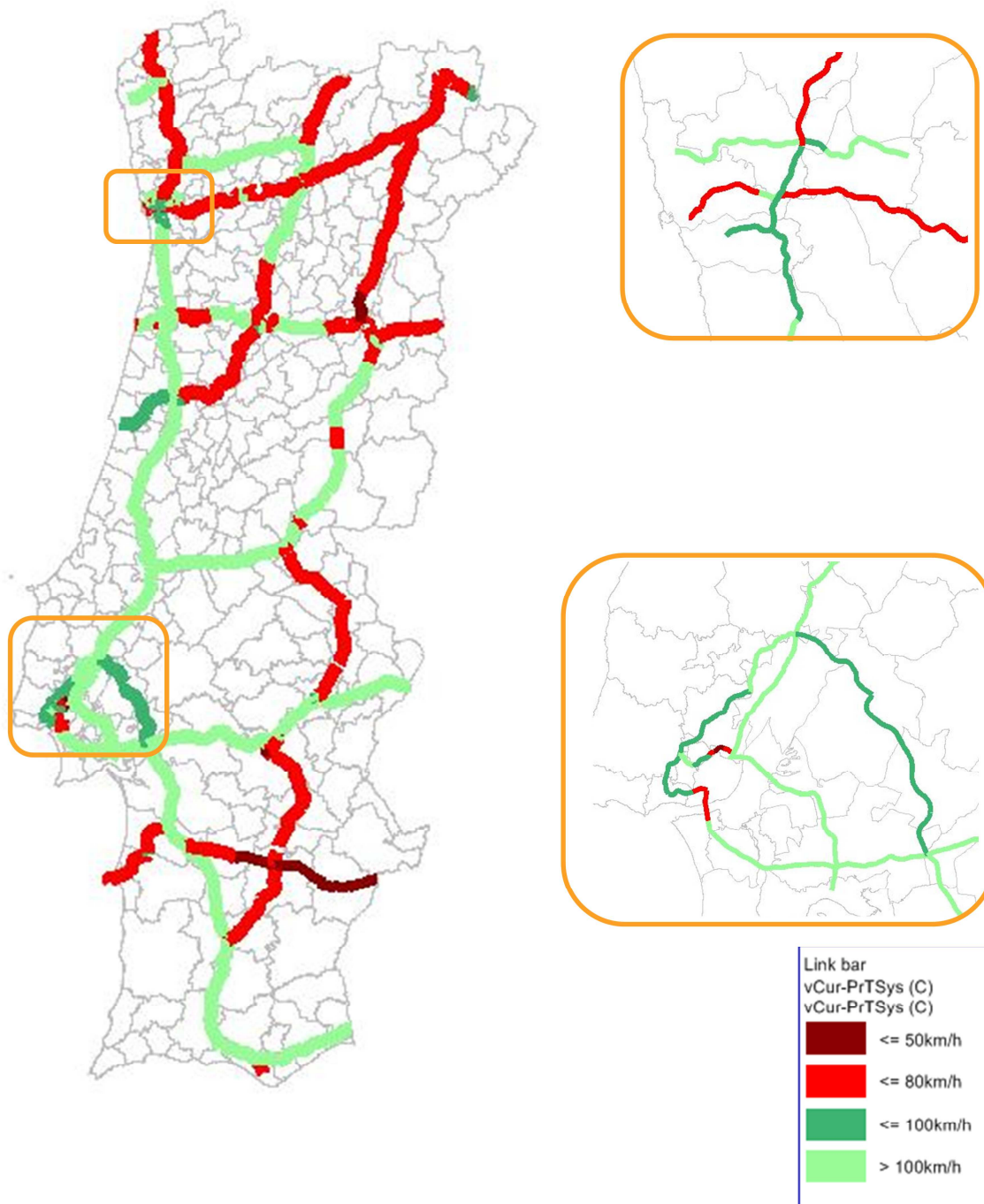


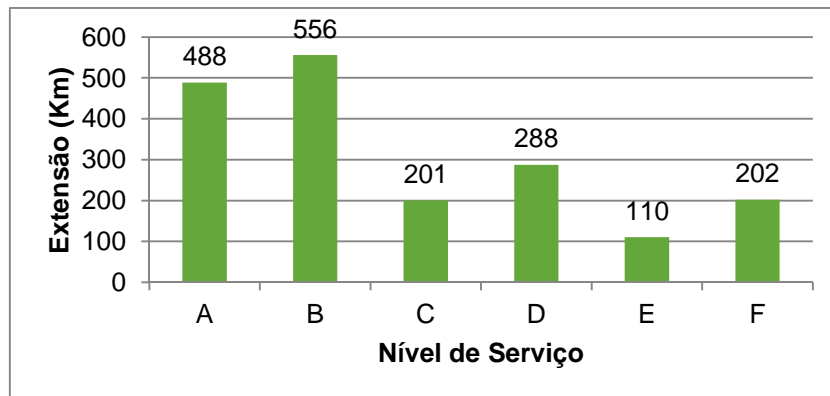
Figura 37: Mapa de velocidade corrente no cenário otimista

Relativamente às áreas metropolitanas de Lisboa e Porto a velocidade de circulação é superior a 80km/h, atingindo, em algumas zonas, 100km/h.

#### 4.3.2 Resultados para o cenário muito otimista – crescimento do tráfego a 2% ao ano

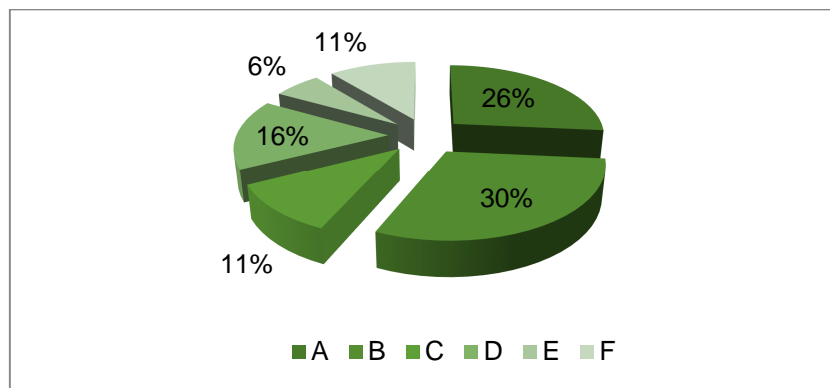
O segundo cenário corresponde a uma situação económica muito otimista, para a qual foi admitido um crescimento anual de tráfego de cerca de 2%. Os gráficos das imagens

seguintes representam a extensão de cada nível de serviço e a percentagem correspondente, apresentados para este cenário.



**Figura 38: Extensão de vias classificadas em cada nível de serviço, no cenário muito otimista**

Como se pode observar, em relação ao cenário otimista, existe uma substancial degradação do nível de serviço que a infraestrutura oferece, com a duplicação do número de quilómetros que passam a ser classificados nos níveis de serviço E e F.



**Figura 39: Percentagens da extensão de vias de cada nível de serviço, no cenário muito otimista**

Através da análise dos gráficos consegue perceber-se que o nível de serviço com maior extensão de rede passa a ser o B, correspondendo a cerca de 30% da extensão da mesma. O nível de serviço E ocorre em cerca de 6% da rede e o nível de serviço F, em cerca de 11%.

Em relação ao grau de saturação, a figura seguinte demonstra relativamente à rede em estudo, quais as vias mais ou menos saturadas.

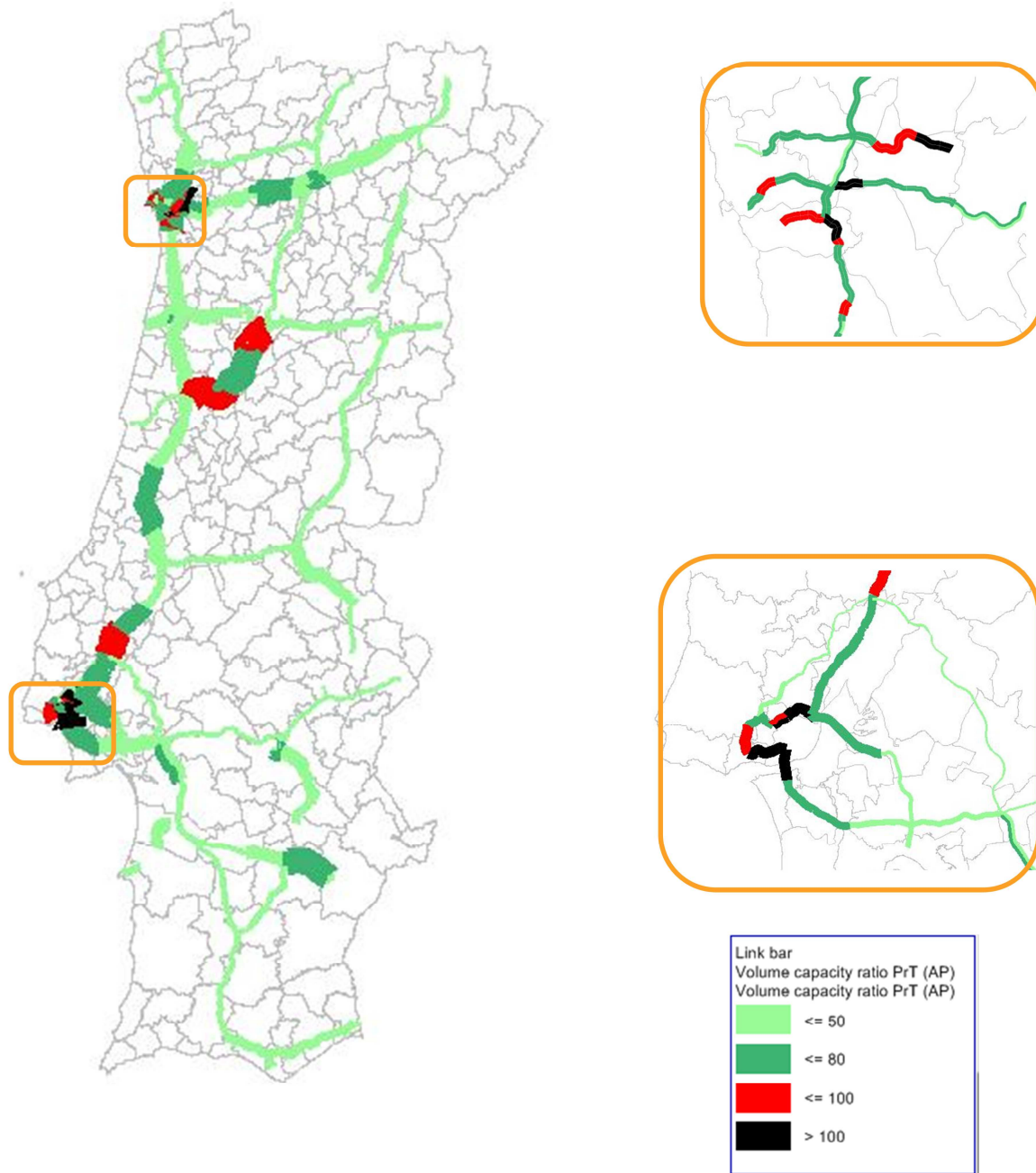


Figura 40: Mapa de saturação da rede no cenário muito otimista

Como se pode observar e comparando com o cenário anterior, nas áreas metropolitanas de Lisboa e Porto as vias que atingem a maior saturação são as mesmas, A5, IC17 e Ponte 25 de Abril e A20, A4 e A41, respetivamente. Contudo em Lisboa na A9 (CREL) a saturação passa dos 80%, sendo este indicador, expectavelmente, um pouco pior, com vários sublanços das áreas metropolitanas a entrarem em saturação completa ( $> 100\%$ ).

Relativamente à velocidade média corrente ao longo do dia, na figura seguinte observa-se que na maior parte da rede de autoestradas a velocidade de circulação é superior a

100Km/h., sendo que nas vias de hierarquia mais baixa, os IP's, a mesma é superior a 50Km/h.

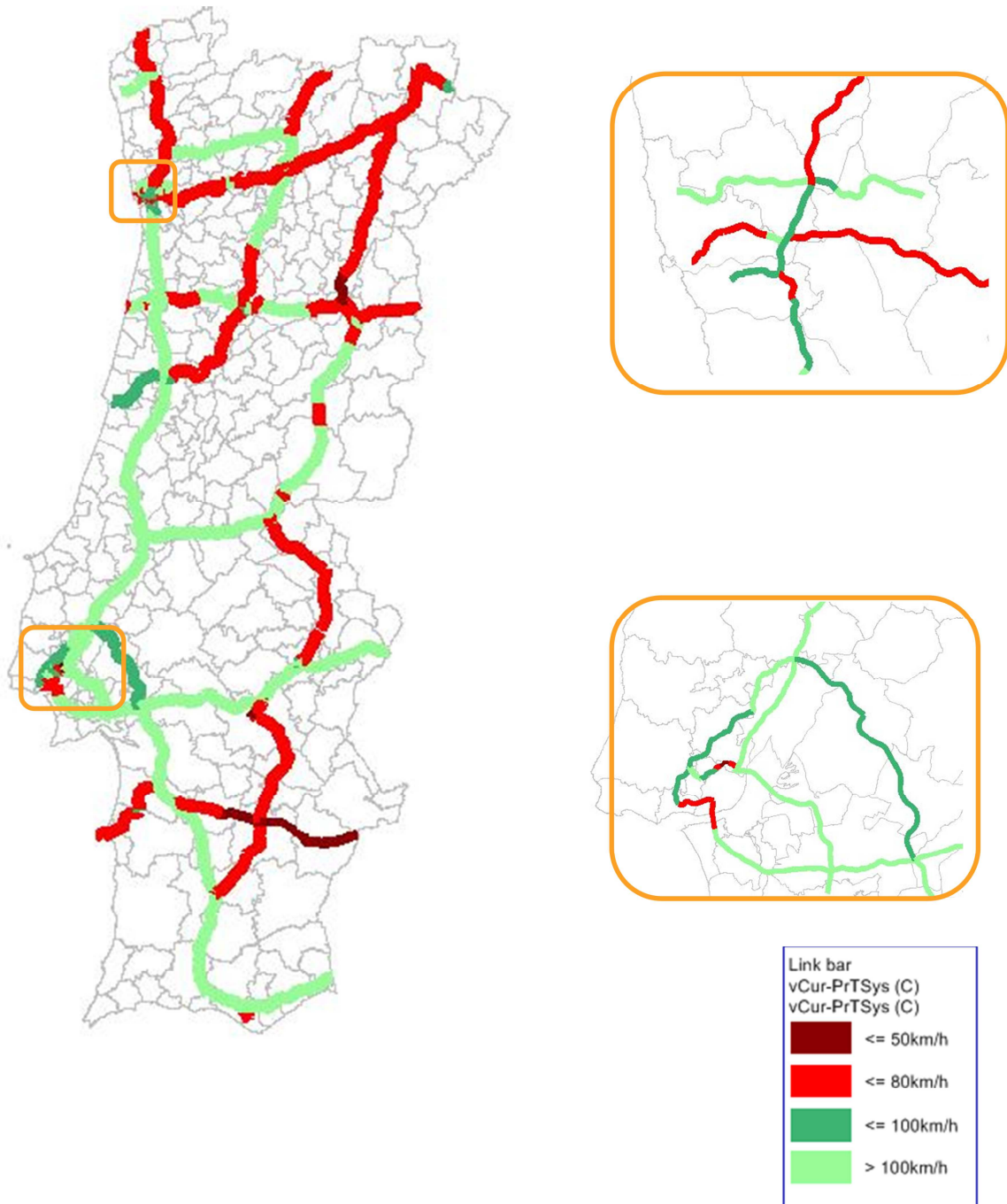


Figura 41: Mapa de velocidade corrente no cenário muito otimista

Relativamente à área de Lisboa, o tráfego consegue circular a uma velocidade superior a 80km/h, atingindo em algumas zonas 100km/h. Contudo, numa zona do IC17 a velocidade atinge os 50km/h. E na área do Porto o tráfego circula a uma velocidade padrão sempre superior a 80km/h, atingindo em alguns casos velocidades superiores a 100km/h.

### 4.3.3 Resultados para o cenário pessimista – diminuição do tráfego a 1% ao ano

O terceiro cenário analisado corresponde a uma perspetiva pessimista, segundo a qual foi admitida uma diminuição anual do tráfego de cerca de 1%. Os gráficos seguintes representam a extensão de rede para cada nível de serviço e a percentagem correspondente.

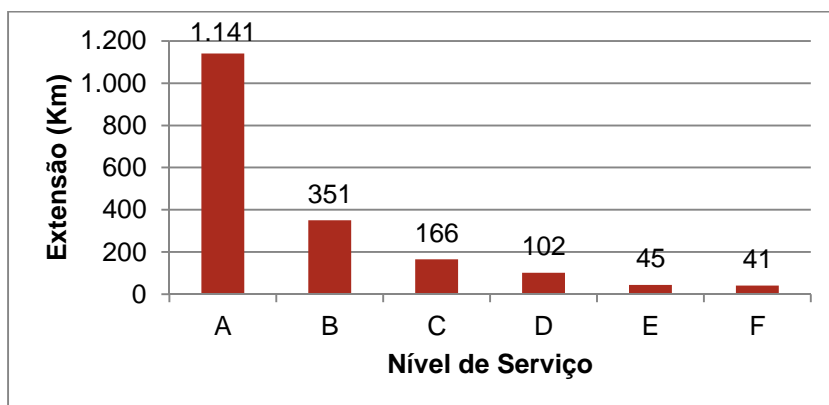


Figura 42: Extensão de vias classificadas em cada nível de serviço, no cenário pessimista

Da análise dos gráficos verifica-se que o nível de serviço com maior extensão de rede é o A, correspondendo a cerca de 62% da rede, e o de menor extensão é o F, com cerca de 2% da rede. A extensão de rede nos níveis de serviço E e F é muito reduzida.

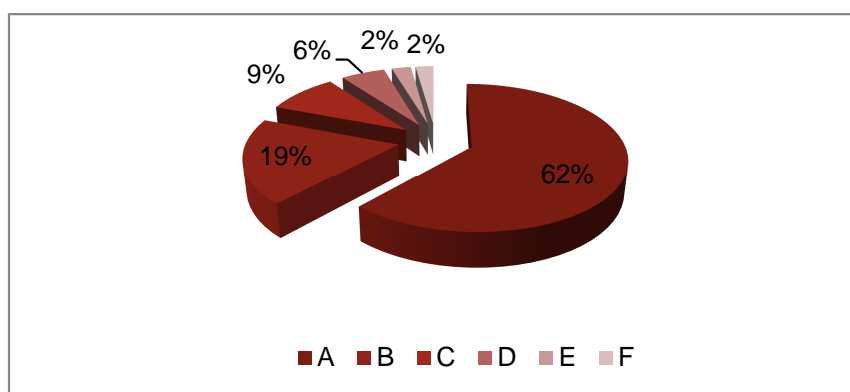


Figura 43: Percentagens da extensão de vias de cada nível de serviço, no cenário pessimista

Em relação ao grau de saturação, a figura seguinte ilustra quais as vias mais ou menos saturadas.

Como se pode observar e comparando com os cenários anteriores, na área metropolitana de Lisboa as vias que atingem a saturação são pequenos sublanços da A5 e do IC17 sendo que na Ponte 25 de Abril e no resto da A5 a saturação já é inferior a 100%. No

resto da rede a saturação é inferior a 50%. E na área metropolitana do Porto a situação é um pouco melhor, sendo a saturação das vias sempre inferior a 80%.

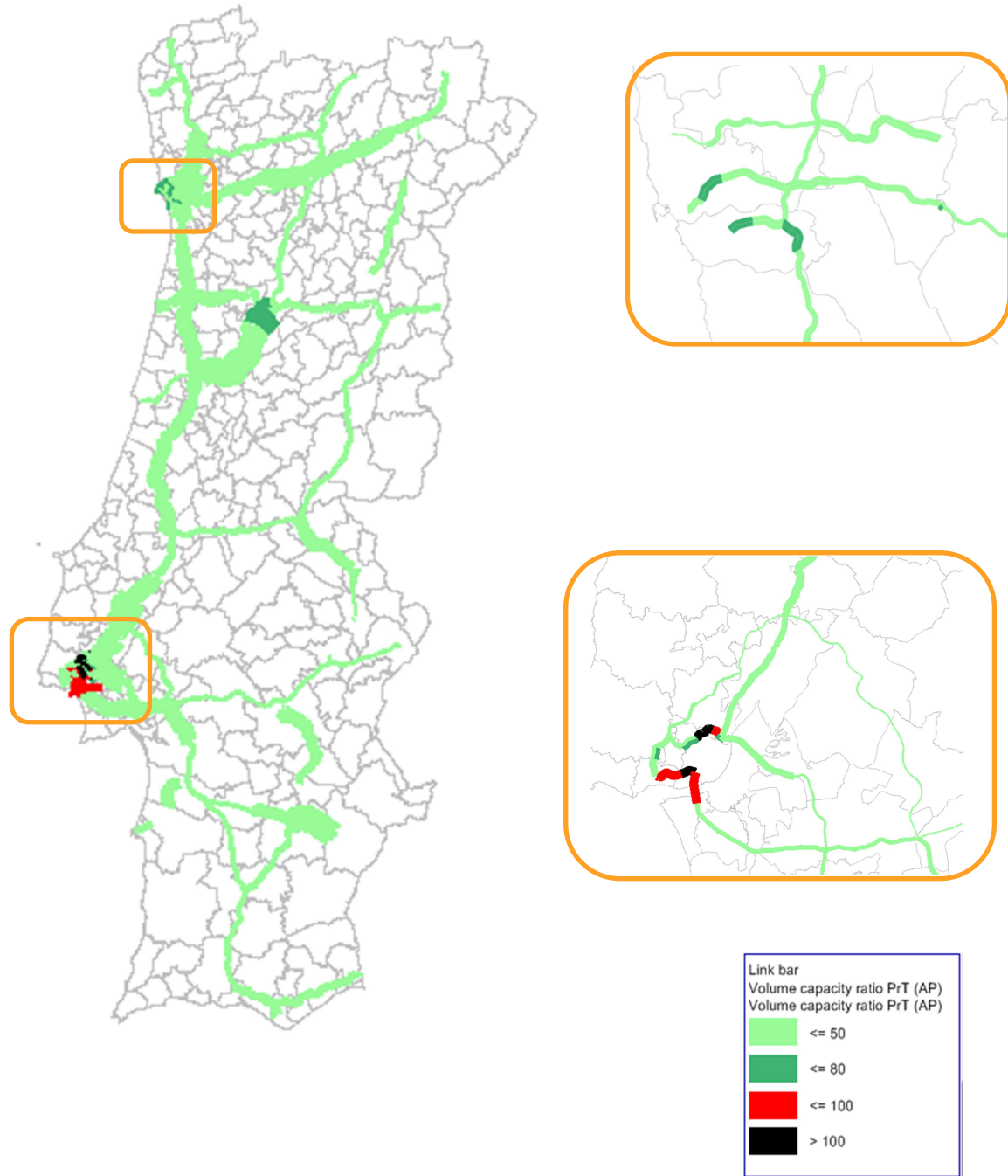


Figura 44: Mapa de saturação da rede no cenário pessimista

Relativamente à velocidade, na figura seguinte observa-se que a velocidade de circulação na maior parte da rede de autoestradas é superior a 100Km/h, sendo nas vias de hierarquia mais baixa, os IP's, superior a 50Km/h.

Relativamente à área de Lisboa, a circulação é possível com uma velocidade superior a 80Km/h, atingindo em algumas zonas 100Km/h, sendo que num sublanço do IC17 a velocidade é inferior a 80Km/h.

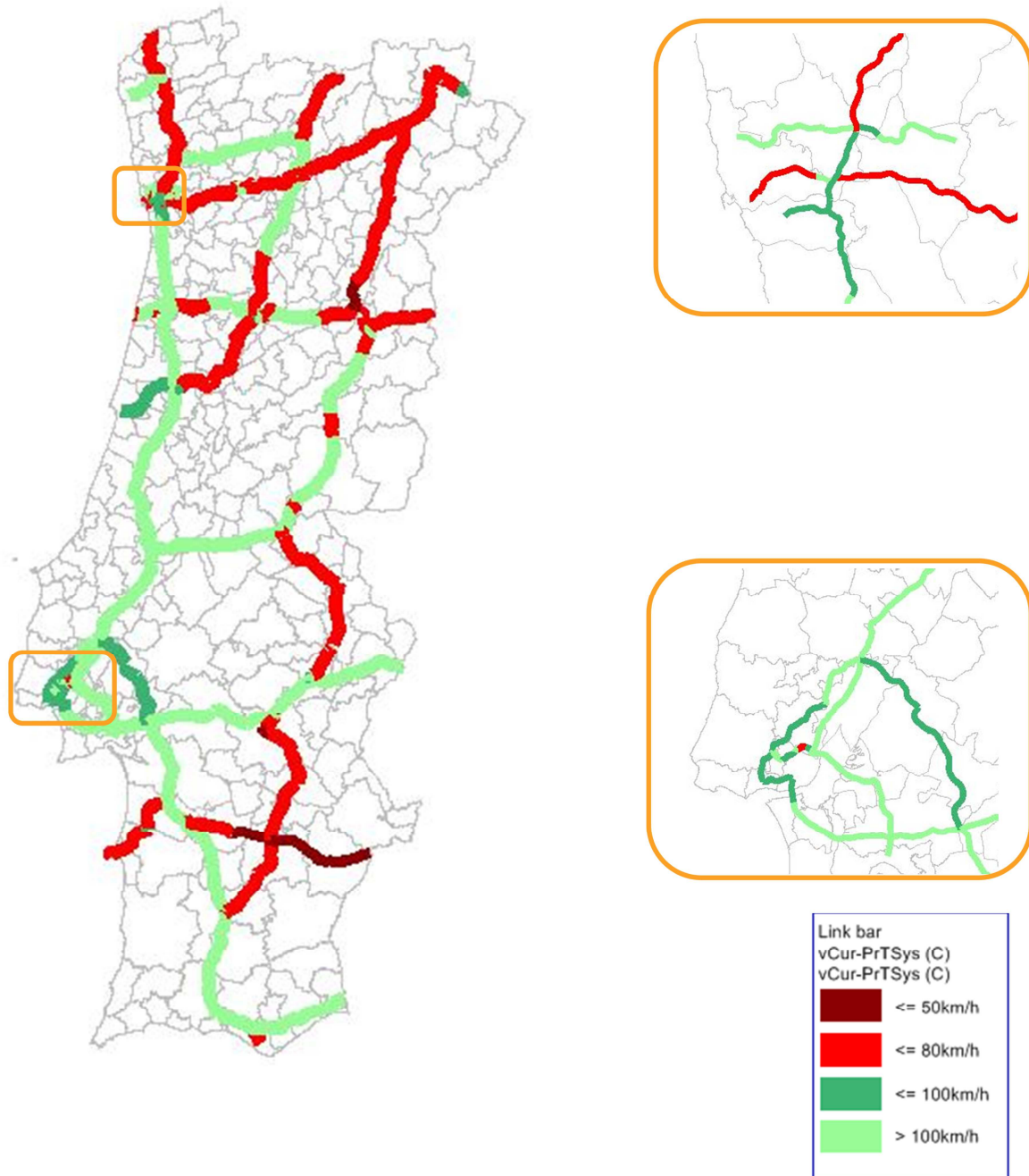


Figura 45: Mapa de velocidade corrente no cenário pessimista



#### 4.3.4 Comparação entre os vários cenários

No gráfico apresenta-se a comparação da extensão da rede classificada nos vários níveis de serviço para os três cenários analisados. Admitindo os dois cenários extremos como minorante e majorante da evolução real do tráfego ao longo dos próximos 20 anos, este gráfico permite antever os limites previsíveis de variação da extensão de rede analisada nos vários níveis de serviço.

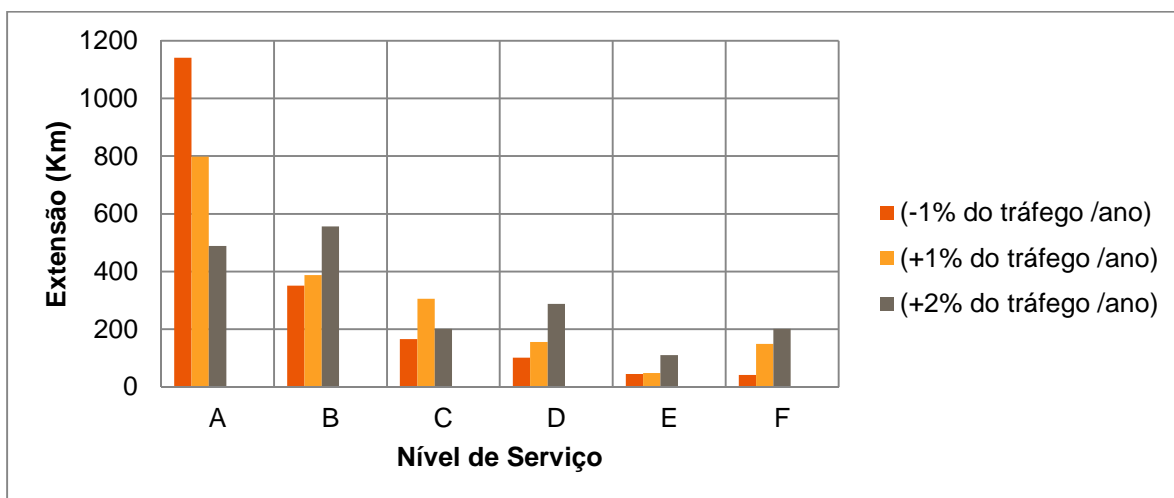


Figura 46: Gráfico de barras com a extensão de cada nível de serviço nos três cenários

Esta análise global, poderá ser detalhada sublanço a sublanço, permitindo identificar quais as ligações e as zonas que potencialmente poderão vir a entrar em rotura, ou enfrentar perda de qualidade acentuada, permitindo identificar de antemão ações mitigadoras e corretivas no âmbito dos instrumentos de planeamento ao dispor do INIR.

#### 4.3.5 Comparação entre a situação atual e o cenário muito otimista

Adicionalmente, procedeu-se à comparação entre a situação atual (que poderemos designar de cenário base) e o cenário futuro “muito otimista”, correspondente ao crescimento anual médio de 2% ao ano do tráfego. Os resultados do cenário base não são apresentados, mas a metodologia aplicada foi a mesma que foi utilizada para os três cenários já descritos. Apresenta-se somente a comparação.

Analisando o gráfico conclui-se que atualmente existem cerca de 1.000km de rede com nível de serviço A e que no cenário “muito otimista” aquele nível só abrangerá cerca de 500km. Existirá também uma degradação acentuada da rede com um aumento considerável da extensão classificada em nível de serviço D, como se pode observar. O mesmo acontece para o nível de serviço F, que atualmente tem uma extensão de 65km e que, neste cenário, atingirá uma extensão quase quatro vezes superior, de cerca de

200km. Por outro lado, o número de quilómetros em nível de serviço B aumentará, devido à desclassificação de sublanços que se encontravam no patamar A, o que não é positivo. O nível de serviço D cresce, como já foi referido, não à custa da diminuição dos sublanços classificados em E ou F, mas sim devido à degradação do serviço em sublanços classificados atualmente em B e C.

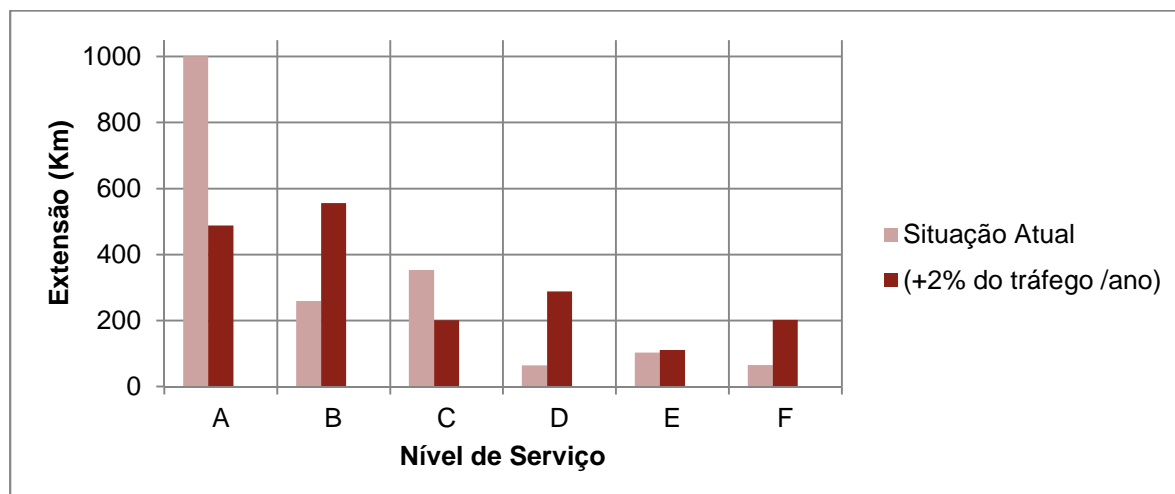


Figura 47: Gráfico de barras com a extensão de cada nível de serviço

A figura seguinte mostra os níveis de serviço correspondentes à situação atual, ou seja, ao cenário base. Pode concluir-se que grande parte da rede apresenta nível de serviço A e B, sendo que no corredor entre Lisboa e o Porto e nas zonas circundantes destas cidades (áreas metropolitanas) o nível de serviço passa para D e E, atingindo em alguns sublanços o nível F.

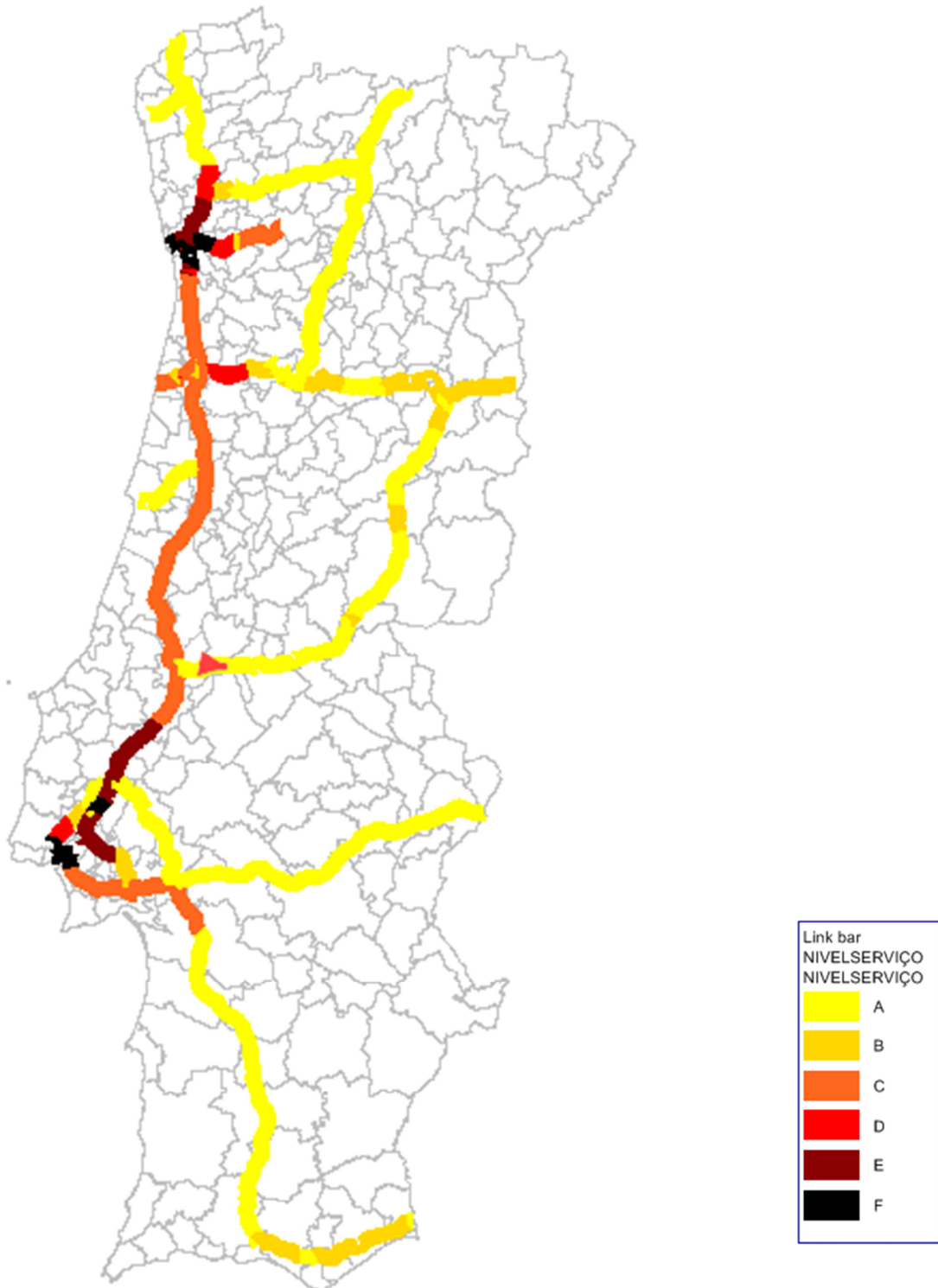


Figura 48: Nível de serviço no cenário base – situação atual

Da mesma forma, procedeu-se também ao mapeamento dos níveis de serviço correspondentes ao cenário muito otimista. A maior parte da rede atinge níveis de serviço B e C, sendo que no corredor entre as zonas de Lisboa e Porto são alcançados níveis de serviço D, E e F de forma mais recorrente.

Comparando com a situação atual, e como já foi verificado anteriormente, demonstra-se que ocorre uma degradação dos níveis de serviço ao longo da rede, ou seja, rede com nível de serviço A ou B passa para nível de serviço C ou D e redes C e D passam para E e F.

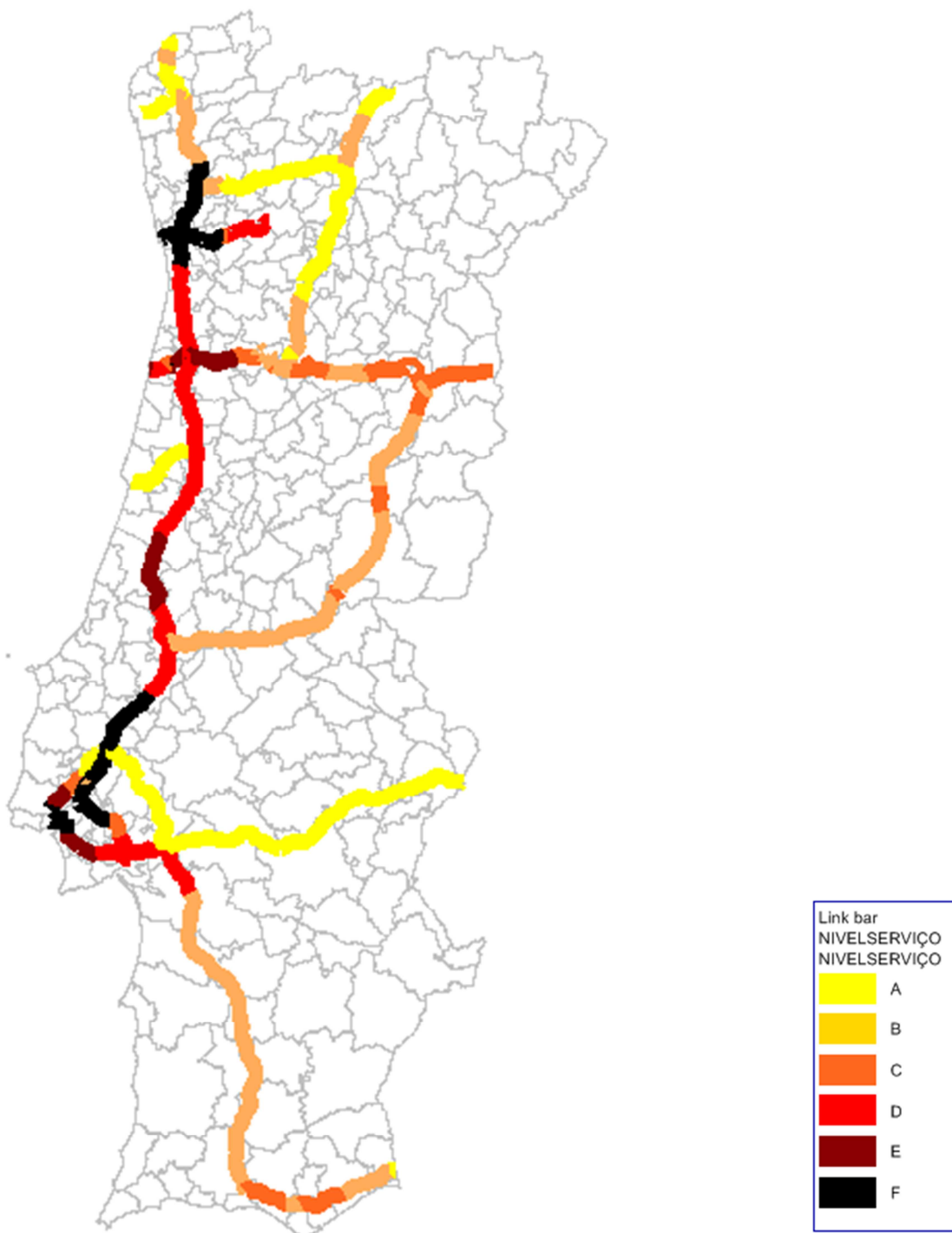
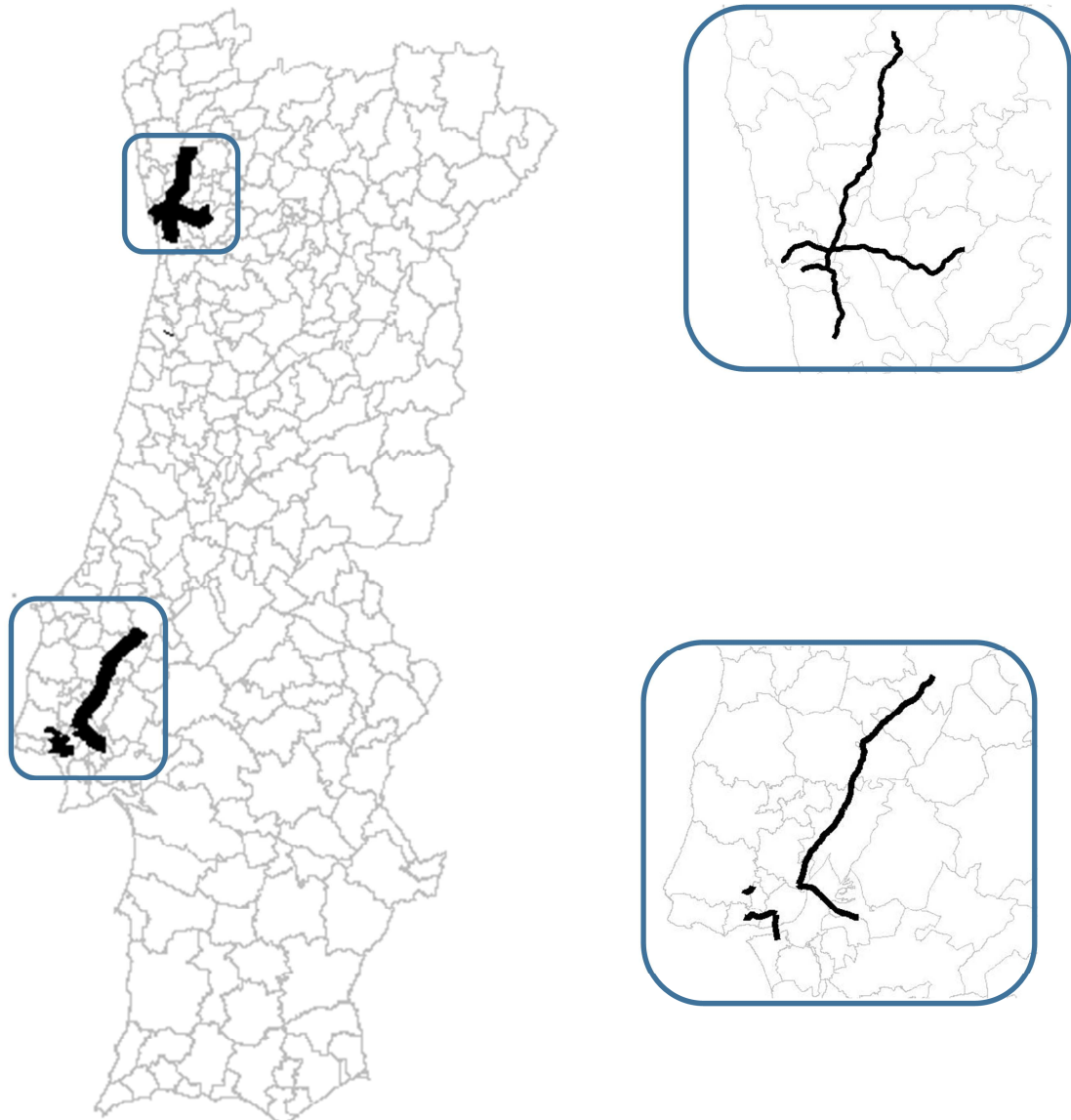


Figura 49: Nível de serviço previsto para o ano horizonte do cenário muito otimista (+2%)

Os mapas permitem identificar geograficamente quais são os sublanços e as regiões onde ocorrem as várias degradações do nível de serviço. Devido às limitações inerentes ao próprio relatório não é possível apresentar detalhadamente a lista de alterações expectáveis para todos os troços da rede. Desta forma, optou-se por apresentar, a título ilustrativo, o mapa dos troços de rede cuja degradação do nível de serviço é muito relevante por passar para o nível F.

Assim, por comparação dos mapas da Figura 48 e Figura 49, conclui-se que os sublanços de rede nos quais se prevê que seja atingido o nível de serviço F se localizam nas áreas metropolitanas de Lisboa e do Porto, e correspondem à Ponte 25 de Abril, à Ponte Vasco da Gama, à autoestrada A5 e ao início da A1 e A20, à A4 e à A3, respetivamente, como se ilustra no mapa da Figura 50.



**Figura 50: Identificação dos troços da rede que passam para o nível F**

O mesmo raciocínio poderia ser aplicado para a identificação de todos os sublanços que fossem ‘despromovidos’ para os restantes níveis de serviço.

#### 4.4 Síntese das dificuldades de implementação do modelo

A primeira grande dificuldade para a execução deste trabalho consistiu na criação do modelo de rede no VISUM a partir da exportação de um modelo de rede do ArcGIS para o VISUM.

Existem várias diferenças entre os dois programas:

- No ArcGIS existe uma maior simplificação da rede do que no VISUM: o ArcGIS aceita políticas de conectividade de nós do tipo “vertex”, mas o VISUM só aceita políticas de conectividade do tipo “end point” e por isso houve necessidade de executar algumas tarefas morosas de edição, como “partir” arcos longos em arcos simples;
- No VISUM os arcos têm sentido de tráfego únicos (Figura 51) enquanto no ArcGIS não (Figura 52). Isto implica que a simulação de uma ligação com dois sentidos de tráfego no VISUM é modelada através de dois arcos complementares;



Figura 51: Modelo de Rede no VISUM

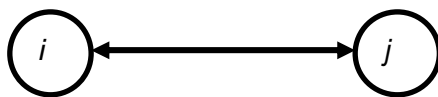
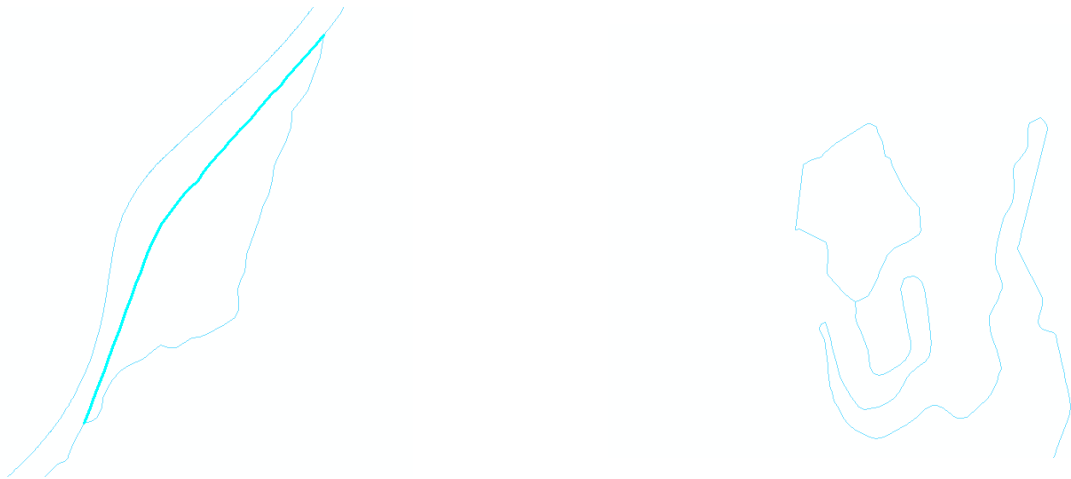


Figura 52: Modelo de Rede no ArcGIS

- No VISUM existe normalização na criação de nós nos arcos, o que pode ocorrer aquando da exportação da rede do ArcGIS para o VISUM é a existência de nós quase sobrepostos;
- No VISUM não é possível existir um arco cujo nó inicial e final seja o mesmo e também não é possível que dois arcos diferentes tenham o mesmo nó inicial e final (Figura 53).



**Figura 53: Erros no VISUM**

Depois de efetuar uma correção inicial de todos os erros detetados na importação da rede do ArcGIS para o VISUM, procedeu-se à adição de uma matriz O/D ao modelo, tendo então surgido outro tipo de problemas que impossibilitavam a execução, de afetações de tráfego à rede.

No modelo transposto para o VISUM existia uma duplicação de nós sobrepostos. Esta falha foi identificada e justificada pelo facto de a rede original, fornecida pelo INIR no formato ArcGIS ser constituída em algumas zonas por troços de muita pequena dimensão, os quais o VISUM interpretava (usando um mecanismo de *snapping*) como nós justapostos, devido à muita reduzida dimensão, na ordem dos milímetros de comprimento, dos seus arcos de ligação.

Nessa situação, as rotinas de afetação de tráfego do programa não encontrava caminhos ou, se encontravam, eram muito longos, não podendo ser considerados, porque eram desajustados da realidade. Consequentemente, todos os nós que estavam duplicados foram verificados e corrigidos individualmente, um a um, no modelo VISUM, de forma que cada nó rodoviário ficasse representado por um e um só nó do modelo, permitindo desse modo que as rotinas de afetação de tráfego funcionassem na plenitude.

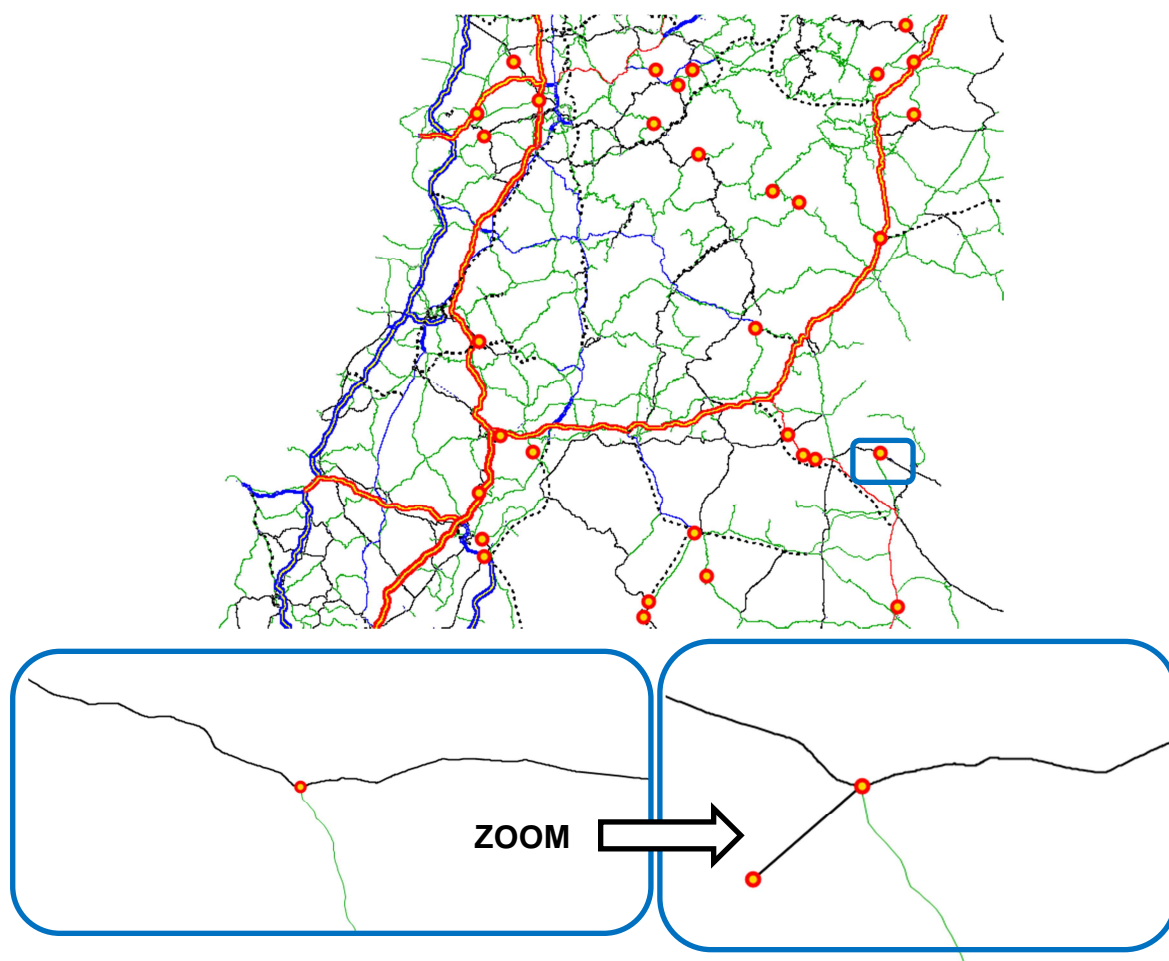


Figura 54: Exemplo das correções efetuadas

O procedimento utilizado correspondeu a: primeiro, encontrar todos os nós com coordenadas iguais, depois fazer um filtro onde só sejam listados os nós em questão e finalmente, procedeu-se à sua correção caso a caso. Foram corrigidos cerca de 100 nós.

Outra grande dificuldade foi a não existência de uma matriz O/D institucional, devidamente adequada e normalizada. Este facto implicou a necessidade de construção de uma matriz ajustada às contagens de tráfego reais que o INIR possuía. Para tal, fez-se a avaliação da disponibilidade de eventuais matrizes O/D, tendo-se chegado à conclusão da existência de uma matriz de viagens incompleta fornecida pelo INE, obtida no âmbito do Inquérito Nacional à Mobilidade. Esta matriz só tem dados relativos às viagens casa-trabalho-casa, desagregados ao nível do concelho. Como a matriz estava incompleta e explicava muito mal os níveis de tráfego registados na rede, foi necessário fazer a sua adaptação e ajustamento através do módulo "TFlowFuzzy" do VISUM, que adapta, através de um processo iterativo, a matriz inicial, de forma que os fluxos em arcos específicos estejam o mais próximo possível das contagens de tráfego reais.



Com o decorrer da afetação foram aparecendo vários obstáculos e dificuldades, tendo a ‘criação’ da própria matriz O/D sido o principal obstáculo e desafio a ultrapassar. Após a obtenção de uma versão “estável” da matriz O/D, as dificuldades de validação através do desenvolvimento das análises e na obtenção de resultados (através dos cenários) foram superadas com sucesso. Com a rede calibrada e a matriz O/D “afinada”, o processo de análise e a geração de resultados, incluindo a criação dos cenários futuros, não implicaram grandes dificuldades.

No entanto, o processo de calibração foi um processo muito moroso, sendo que depois do zonamento efetuado e de a rede estar devidamente caracterizada, foi necessário ‘colocar’ a matriz O/D inicial no VISUM e “correr” as primeiras afetações de tráfego.

Depois de o tráfego estimado através da matriz O/D estar afetado à rede, foi necessário validar os resultados, os quais raramente estavam muito próximos dos valores reais.

Para executar o processo de validação foi necessário conferir todos os valores resultantes das afetações.

O processo é difícil, pois o modelo pode gerar situações em que existam vias com grau de saturação excessivo, o que se sabe que na realidade não pode acontecer, visto que a rede ficaria hipersaturada e os veículos não conseguiriam sequer circular. Nestes casos, as velocidades modeladas são também muito baixas, podendo até chegarem mesmo à velocidade nula. Uma consequência disto é que, no modelo, os veículos optariam por vias de hierarquia mais baixa, mesmo circulando a uma velocidade mais baixa, “afastando” os valores dos fluxos estimados dos valores reais das contagens de tráfego.

A figura seguinte ilustra um troço da rede que foi afetado com uma matriz O/D cujos valores dos pares O/D são todos iguais a 10.

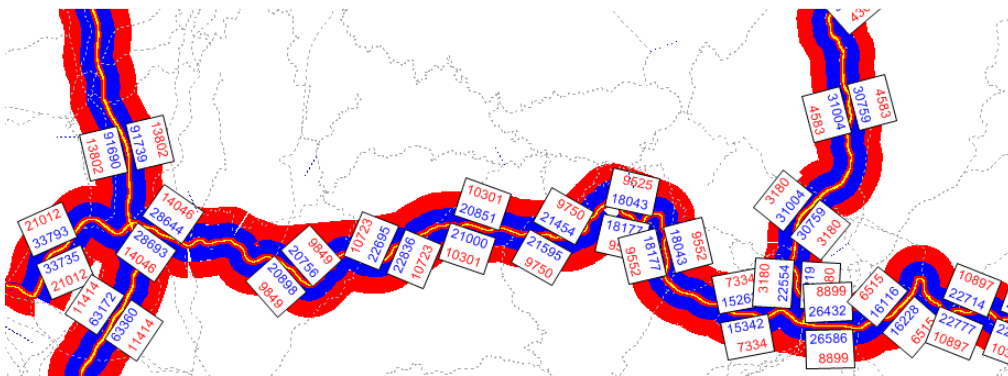


Figura 55: Rede afetada por uma “matriz de 10”

Na imagem os valores a azul representam o volume de veículos que circulam naquele troço, por sentido e os valores a vermelho são as contagens de tráfego.

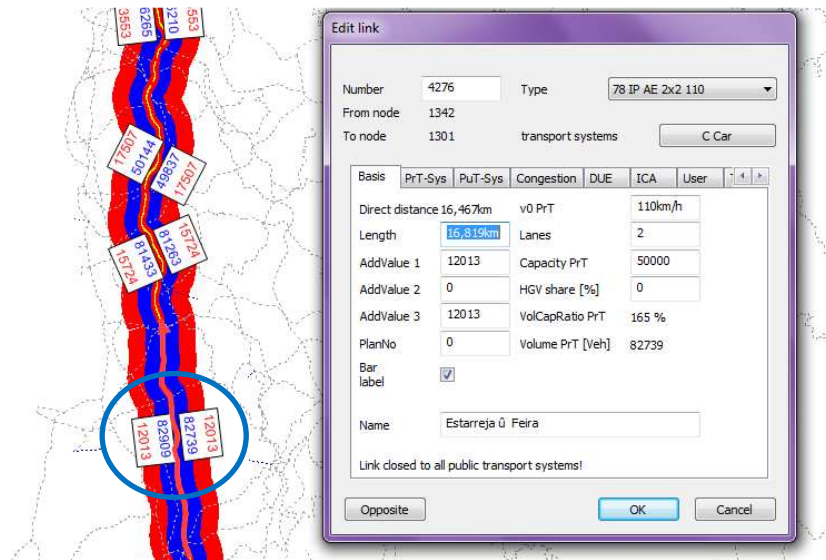


Figura 56: Exemplo de um sublanço

Neste exemplo da Autoestrada do Norte (A1), no sublanço entre Estarreja e Feira, consegue-se observar que a via tem uma capacidade de 50.000veic/dia, mas que o modelo estima um tráfego de 82.739uve/dia, implicando numa saturação da via de 165%. Ou seja, a via encontra-se totalmente saturada, o que faz com que muitos dos veículos a circularem vão escolher outros caminhos alternativos (isto no modelo). Uma possível solução é aumentar a velocidade, a capacidade, o número de vias de um conjunto alargado de arcos em torno do corredor, incluindo se for caso disso, os próprios arcos da autoestrada.

Este é um dos muitos exemplos de correções e acertos que apareceram ao longo da execução da presente dissertação, obrigando a sucessivas intervenções na rede toda. Se estes problemas não forem resolvidos o “TFlowFuzzy” não consegue “correr” adequadamente, com a rede em estado saturado.

Por fim refere-se que um dos fatores mais críticos deste trabalho foi a adaptação a um novo *software* de modelação, o VISUM, que não foi utilizado durante a parte escolar do mestrado e cujas funcionalidades e potencialidades são bastante diferentes das do ArcGIS.

## 4.5 Súmula do capítulo

No âmbito do estágio final de mestrado e com o objetivo de fazer um estudo exploratório de implementação de um modelo de afetação de tráfego em ligação direta com a infraestrutura de dados geográficos do InIR, através das funcionalidades do ArcGIS, elaborou-se o presente estudo de caso que visa efetuar uma análise preliminar e o desenvolvimento de um modelo experimental para suporte ao planeamento rodoviário, com o auxílio de *software* de modelação e análise de transportes como, por exemplo, o VISUM.

Neste capítulo descreveu-se a implementação do modelo e apresentaram-se os principais resultados obtidos.

Adotou-se um zonamento coincidente com os concelhos. A rede modelada abrange toda a Rede Rodoviária Nacional (RRN), debruçando-se a análise, por questões práticas (devido ao tempo previsto e à escala do trabalho), essencialmente, sobre a rede rodoviária transeuropeia (RTE).

Um dos passos mais importantes do Estudo de Caso foi a criação de uma matriz O/D para alimentação do modelo de afetação do VISUM. O processo de calibração da matriz foi um processo iterativo e muito moroso. Foi utilizada como “semente” uma matriz de inquéritos elaborada pelo INE, através da qual foi produzida uma matriz O/D base uniformizada por concelho e por modo de transporte. Esta matriz O/D foi criada com o auxílio do “TFlowFuzzy”.

As contagens de tráfego foram fornecidas pelo Gabinete de Controlo de Gestão e Sistemas de Informação do InIR. Os elementos de procura de tráfego foram apresentados por sublanço de autoestrada, desagregados por mês e por classes de portagem, tendo sido necessário fazer o cálculo do tráfego por veículos ligeiros e por veículos pesados, para uma melhor análise.

Depois da calibração da matriz O/D do ano base, criaram-se três cenários futuros para teste do modelo e previsão de resultados para planeamento. O primeiro corresponde a um cenário otimista, que admite um crescimento de tráfego anual de 1%, o segundo é um cenário muito otimista, com um crescimento de 2%, e por fim um terceiro cenário pessimista que traduz uma redução anual de tráfego de 1%.

Adicionalmente fez-se a comparação dos resultados entre os vários cenários e entre a situação atual (cenário base) e o cenário muito otimista. Apresenta-se também uma síntese das principais dificuldades encontradas na implementação do modelo.



## 5. Conclusões e Perspetivas Futuras

### 5.1 Conclusões

Tal como foi referido no primeiro capítulo deste trabalho, os principais objetivos do mesmo consistiram na realização de um estudo exploratório para implementação de um modelo de afetação de tráfego em ligação direta com a infraestrutura rodoviária (descrita através de dados SIG da base de dados da infraestrutura rodoviária do InIR), bem como desenvolver uma proposta de modelo de planeamento rodoviário de âmbito nacional, com o auxílio do programa de modelação e análise de tráfego, o VISUM, que permite desenvolver cenários de planeamento rodoviário tendo em conta o equilíbrio entre a procura – matriz O/D – e a oferta – a rede rodoviária nacional.

Um dos fatores que implicou uma elevada disponibilidade de tempo foi a necessária adaptação a um novo *software* de modelação e análise de sistemas de transportes, o VISUM, que ao contrário do ArcGIS, não foi utilizado durante a parte escolar do mestrado e cujas funcionalidades e potencialidades são bastante diferentes das do ArcGIS.

Outro tipo de dificuldade ultrapassada foi a passagem da rede do ArcGIS para o VISUM, visto as estruturas de dados de ambas as aplicações apresentarem algumas diferenças, como por exemplo, as políticas de conectividade nodal das redes serem diferentes: o ArcGIS aceita políticas de conectividade de nós do tipo “vertex” que o VISUM não aceita, permitindo somente modelos com políticas de conectividade de nós do tipo “end point”. Devido a essas diferenças estruturais nos modelos de ambas as aplicações, houve a necessidade de efetuar algumas tarefas morosas de edição da rede, como por exemplo, “partir” arcos longos em arcos simples. Por exemplo, o VISUM não permite que exista um arco cujo nó inicial e final seja o mesmo e também não permite que dois arcos diferentes tenham o mesmo nó inicial e final, por isso foi necessário a criação de mais um nó em cada um destes casos.

Em síntese, o processo de importação da rede rodoviária fornecida pelo InIR em formato ArcGIS para utilização no VISUM implicou alguns procedimentos adicionais que não estavam inicialmente previstos de adaptação da rede inicial. No entanto, podemos afirmar

que em situações futuras, se a rede em ArcGIS for construída de raiz com base num conjunto de pressupostos a definir, os processos de importação para VISUM poderão passar a ser automáticos, ou requerem muito pouca intervenção adicional. Portanto, o “matching” entre os dois modelos de dados deve ser uma preocupação base a ter em conta se quisermos que os dois tipos de ferramentas sejam usados em conjugação.

Após a correção de todos os erros detetados na importação da rede do ArcGIS para o VISUM, iniciaram-se as experiências de análise de matrizes O/D no modelo, tendo então surgido outro problema que impossibilitava a realização da afetação de tráfego à rede. Ou seja, na importação da rede para o VISUM houve uma duplicação de nós sobrepostos, esta falha foi identificada pelo fato de a rede no ArcGIS ser constituída em algumas zonas por troços muito pequenos, os quais os VISUM interpretava como sendo nós justapostos. Houve a necessidade de verificar e corrigir individualmente todos os nós no VISUM.

Outra grande dificuldade foi a não existência de uma caracterização institucional da procura. Ou seja, a não existência de uma matriz O/D validada por nenhuma entidade superveniente e com responsabilidades na área dos transportes, devidamente adequada e normalizada. Este facto implicou a necessidade de construção de uma matriz de procura de raiz, ajustada às contagens de tráfego reais que o InIR possuía. Para tal, utilizou-se como “semente” uma matriz de viagens incompleta fornecida pelo INE, obtida no âmbito do Inquérito Nacional à Mobilidade.

Esta matriz só tinha dados relativos às viagens casa-trabalho-casa, desagregados ao nível do concelho. Como a matriz estava incompleta e explicava muito mal os níveis de tráfego registados na rede, foi necessário fazer a sua adaptação e ajustamento através do módulo “TFlowFuzzy” do VISUM, que adapta, através de um processo iterativo, a matriz inicial, de forma que os fluxos em arcos específicos estejam o mais próximo possível das contagens de tráfego reais. No plano de estudos não estava previsto ter que construir a matriz O/D, porque existia a possibilidade de um dos concessionários rodoviários fornecer uma matriz, mas tal possibilidade foi gorada, tendo sido necessário no âmbito da dissertação resolver esse complexo desafio, não contemplado nos objetivos iniciais da dissertação.

A construção da matriz O/D implicou um processo de calibração muito moroso e composto por várias iterações. Depois de o tráfego estimado através da matriz O/D estar afetado à rede foi necessário validar os resultados. Para tal, foi necessário conferir todos os valores resultantes das afetações.

Após a rede calibrada e a matriz O/D “afinada”, o processo de análise e a criação de resultados, incluindo a criação dos cenários futuros, não implicou grandes esforços adicionais de modelação. No entanto, devido às dificuldades que tiveram que ser ultrapassadas na importação da rede rodoviária para formato VISUM e na construção, não prevista, da matriz O/D, a extensão, profundidade e conclusões obtidas no capítulo da análise, poderia conter cenários bastante mais complexos do que os agora apresentados, para apoio a decisão, por exemplo, na análise de alternativas de planeamento rodoviário, situação que não foi completamente explorada, devido a restrições de tempo e espaço.

Concluindo, os objetivos inicialmente definidos de implementação de um modelo afetação de tráfego rodoviária, com o auxílio do ArcGIS e desenvolvimento de uma proposta de modelo de planeamento rodoviário de âmbito nacional, com o auxílio do *software* de modelação e afetação de tráfego VISUM, foram alcançados e mesmo superado nos pontos já indicados (como por exemplo, no caso da matriz O/D).

O resultado final deste trabalho consiste num protótipo de um modelo que pode ser usado como ponte de partida para a realização de um conjunto alargado de análises, que poderão gerar o desenvolvimento de metodologias de planeamento para apoio ao planeamento e à revisão dos planos rodoviários nacionais.

## 5.2 Perspetivas Futuras

O estudo realizado permitiu identificar algumas sugestões de ações futuras cujo interesse para o planeamento rodoviário é na opinião da autora fundamental:

- Adaptação e melhoria da estrutura do modelo de dados da infraestrutura rodoviária de modo a permitir a sua importação direta, ou por transferência com base em procedimentos automáticos para o VISUM ou outro *software* de análise e modelação de redes de transportes, minimizando as dificuldades;
- Criação e calibração de uma matriz O/D de viagens com dados de tráfego reais e dados das concessionárias, bem como de inquéritos aos utentes feitos por várias entidades e cujo *input* deveria alimentar a atualização da matriz em contínuo;
- Validação adicional do modelo de análise da rede já realizado, podendo depois ser feita qualquer tipo de análise a partir do mesmo;
- Efetuar melhorias e atualizações no modelo de rede atual, identificando arcos e partes do modelo que possam ser melhoradas, nomeadamente ao nível do zonamento fino nas áreas urbanas e metropolitanas;

- Fazer uma melhoria nos arcos (aumento do número de vias e consequente aumento da velocidade) ou a criação de novos arcos na rede;
- Este modelo permite também fazer testes de várias alternativas e variantes na criação de redes, o que pode ser explorado no apoio à revisão do plano rodoviário nacional;
- O modelo pode ser utilizado no estudo da reclassificação dos atuais IP's e IC's, nomeadamente daqueles que ainda estão em projeto e que têm que ser redefinidos, face à atual conjuntura económica.

O *software* VISUM demonstrou ser uma ótima ferramenta para a modelação de redes e afetação de tráfego, bem como a análise e planeamento rodoviário.

As análises efetuadas tiveram especial ênfase nos troços da Rede Transeuropeia (RTE), visto ser onde existia mais contagens de tráfego. No futuro poderão também, ser incluídas parte das redes municipais, permitindo assim fazer análises regionais e intermunicipais.

O INIR, enquanto entidade reguladora, deve possuir um modelo de análise e planeamento do tráfego rodoviário a funcionar permanentemente, sendo que este tipo de modelo poderia ser uma mais-valia importante para as tarefas do instituto de regulação, planeamento e apoio à decisão.



## Referências Bibliográficas

AIPCR/PIARC (Associação Mundial da Estrada) (2005). "A conceptual performance indicator framework for the road sector". Comité Técnico da Gestão de Estrada (C6). La Defense, ISBN 2-84060-165-6;

Disponível em:

<http://www.inir.pt/portal/LinkClick.aspx?fileticket=brnLbzC1kxw%3D&tabid=114&mid=485&language=pt-PT>

AKINYEMI, E. O. & ZUIDGEEST, M., (1998). The use of the sustainability concept in transportation engineering: past experiences and future challenges;

BATES, J., (2000) "History of demand modeling", in Handbook of Transport Modeling (Ed. Hensher, D. e Button, K.). Pergamon;

Bosinowski. (1994). "Keeping Passenger Surveys up-to-date a Fuzzy approach". Obtido em 2011;

Disponível em:

[http://www.isv.uni-stuttgart.de/vuv/publication/downloads/200001\\_Fr\\_TFlowFuzzy\\_TRB.pdf](http://www.isv.uni-stuttgart.de/vuv/publication/downloads/200001_Fr_TFlowFuzzy_TRB.pdf)

CAMPOS, V. B. G., (2007). "Planejamento de transportes: conceitos e modelos de análise". Brasil;

Disponível em: <http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/vania/apostilas/Plan2007.pdf>

CARDOSO, C. E. P., (2010). "Modelos tradicionais transporte e tráfego". Brasil;

Disponível em: [http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/modelos\\_tradicionais.pdf](http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/modelos_tradicionais.pdf)

CARRUTHERS, D., & LAWSON, G., (1995). "The contribution of transport to the quality of life". (H. K. BLESSINGTON, Ed.) Urban Transport, p. 11-20;

CIANFANO, M., (2008). "Transport and Mobility indicators based on traffic measures", European Regional Development Fund, Regional Initiative Project;

CMSP, COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO, (1990). Pesquisa origem-destino 1987: região metropolitana de São Paulo. São Paulo;

DALVI, M. Q., (1979). "Behavioural modelling, accessibility, mobility and need: concepts and measurement". HENSHER, A. & STOPHER, P. R., eds. Behavioural travel modeling. Croom Helm. Becknham, Kent p.639-653;

FARIAS, T., (2011). "A Educação como Elemento Chave numa Estratégia de Mobilidade Urbana". Lisboa;

FERRANDIZ, J. V. C., (1990). "Movilidad y ambiente en ciudades de tipo medio: un nuevo enfoque del problema". Revista del Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones, n.46, p.9-18;

FHWA, Federal Highway Administration (1983); "UTPS Highway Network Development Guide". COMSIS Corporation, US Department of Transportation;

FORNECK, M. L. & ZUCCOLOTTO, S., (1996). "Mobilidade das mulheres na região metropolitana de São Paulo". Revista dos Transportes Públicos, n.73, p.95-103;

GASPARINI, A., CAMPOS, V. B. G. & D'AGOSTO, M. A., (2010). "Análise da demanda de transporte de carga relacionada às características físicas de shopping-centers e supermercados". Brasil;

GIANNOPOULOS, G. A. & BOULOUGARIS, G. A., (1989) "Definition of accessibility for railway stations and its impact on railway passenger demand". *Transportation Planning and Technology*, v.13, nº2, p.111-120;

HAMBURG, D., BLAIR, L., ALBRIGHT, D., (1995). "Mobility as a right". *Transportation Research Record*, n.1499, p.52-55. Washington;

HMSO, Her Majesty's Stationery Office (1991). "Traffic appraisal manual". *Design Manual for Roads and Bridges. Traffic appraisal of road schemes, Vol.12, Section 1, Part 1*;

HMSO, Her Majesty's Stationery Office (1996). "Traffic appraisal in urban areas". *Design Manual for Roads and Bridges. Traffic appraisal of road schemes, Vol.12, Section 2, Part 1*;

JUNIOR, A. A. R., (2000). "Acessibilidade e mobilidade na estimativa de um índice de potencial de viagens utilizando redes neurais artificiais e sistemas de informações geográficas". São Carlos;

KAMAN Science Corporation (1996). "A compendium of traffic model validation documentation and recommendations". FHWA – US Department of Transportation;  
Disponível em: [http://ntl.bts.gov/lib/jpodocs/repts\\_te/3892.pdf](http://ntl.bts.gov/lib/jpodocs/repts_te/3892.pdf)

KEEFER, L. E., (1960). "Pittsburgh Área Transportation Study", vol1. Study Findings. Universidade de Michigan;

KOLLARITS, S., (1994). "Exploring mobility data in a GIS context: problems of representation and framework for analysis". Technical University of Vienna;  
Disponível em: <http://libraries.maine.edu/Spatial/gisweb/spatdb/egis/eg94020.html>

LITMAN (2005). *Measuring Transportation, Traffic, Mobility and Accessibility*;  
Disponível em: <http://www.vtpi.org/measure.pdf>

MACEDO, E. L., (2004). Noções de Topografia para Projetos Rodoviários. Brasil;

MARTINS, P. M., (2001). “Metodologias para quantificação e internalização dos custos externos no sector dos transportes”. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Transportes, IST. Lisboa;

MARTINS, P. M., (2008). Folhas de apoio da disciplina de Transportes, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa;

MARTINS, P. M., (2009). Folhas de apoio da disciplina de Dimensionamento de Sistemas de Transportes, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa;

MARTINS, A. P. et al., (2006) “Manual de Estudos de Tráfego”. Departamento Nacional de Infraestruturas de Transportes. Brasil;

MORENO, J. A. C., (1998). “Análisis de la movilidad en grandes áreas urbanas: el caso de Madrid”. Congresso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte. Santander, Espanha;

MORRIS, J. M., (1979). Accessibility indicators for transport planning. Transportation Research Part A, v.13, n.2, p.91-109;

National Research Council (U.S.) (2000). “Highway Capacity Manual”, Transportation Research Board. Washington D.C.;

National Research Council (U.S.) (2006). “Traffic flow theory”, Transportation Research Board. Washington D.C.;

NIJKAMP, P., BLAAS, E., (1994). “Impact assessment and evaluation in transportation planning”. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers;

ORTÚZAR, J. de D. e WILLUMSEN, L. G., (2002). "Modeling Transport", Ed. John Wiley & Sons. Chichester;

PASCHETTO, A, BIANCO, P.A.D., GENTILE, P.L., (1983). "Criteria for the choice of modes of transport in the context of urban planning and operating conditions". International Congress UITP, 45. Rio de Janeiro;

PERRAKIS, K., KARLIS, D., COOLS, M., JANSSENS, D., VANHOOF, K. & WETS, G., (2012). "Transportation Research", Part A: Policy and Practice, Volume 46, 200-212;

PETS D7, (1998). "Deliverable 7. Internalisation of Externalities, Appendix". Relatório do Projeto Europeu PETS – Pricing European Transport Systems, Christensen P., Beaumont H., Dunkerley C., Lindberg G., Otterstrom T., Gynther L., Rotengatter W., Doll C.. Estudo para a Comissão Europeia. Bruxelas;

PINHEIRO, M. B., (1994). "Mobilidade urbana e qualidade de vida: conceptualizações". Congresso de ensino e pesquisa em transportes. Anais, Recife, ANPET, V.II, p.405-414;

RAMOS, A. F. F., (2008). "Proposta de medidas para melhoria da mobilidade em transporte rodoviário urbano – o caso do Barreiro". Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Estruturas e Geotecnia, FCT. Lisboa;

Disponível em: <http://run.unl.pt/handle/10362/1845>

RODRIGUES, M. J., (2007). "Avaliação económica de projetos rodoviários em Portugal: Estimação de Custos e Benefícios para os utentes.". Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Território, IST. Lisboa;

ROSS, W., (1999). "Personal mobility or community accessibility: a planning choice with social, economic and environmental consequences". Perth, Western Australia. Thesis (Doctor), Murdoch University;

SERRATOSA, A., (1996). “El sistema viário y la política territorial”. Revista *Accesibilidad y Territorio*, v.1, n.35, p.12-17;

SILVA, J. A., (2007). “Os Modelos de Transportes e Usos do Solo. O Modelo de Lowry”. Folhas de apoio da disciplina de Transportes Ambiente e Usos do Solo, Instituto Superior Técnico. Lisboa;

STEMERDING, M. P., (1996). “Modelling constraints-based choices for leisure mobility planning”, Technische Universiteit Eindhoven, Bouwstenen, Proefschrift, Eindhoven, nº43;

TAGORE, & SIKDAR., (1995). “A new accessibility measure accounting mobility parameters”. The University of New South Wales, Sydney, Australia: Paper present at 7th WORLD CONFERENCE ON TRANSPORT RESEARCH;

TAG Unite 3.5.6., (2009). “Values of Time and Operating Costs”. Transport Analysis Guidance. Department for Transport. London;

TAVARES, J. P. M. P., (2003). “Aplicabilidade e robustez de modelos de afetação de tráfego em redes urbanas”. Dissertação para Doutoramento em Engenharia Civil, FEUP. Porto;

Disponível em: [http://sigarra.up.pt/feup/publs\\_pesquisa.formview?p\\_id=20173](http://sigarra.up.pt/feup/publs_pesquisa.formview?p_id=20173)

THOMAS, R., (1991). “Traffic assignment techniques”, Ed. Avebury Technical;

UNITE (2003). “Unification of Accounts and Marginal Costs for Transport Efficiency”. ITS, University of Leeds. European Commission, 5th Framework Programme;

Disponível em:

<http://www.its.leeds.ac.uk/projects/unite/downloads/Unite%20Final%20Report.pdf>

UNITE D12-A7 (2003), Macário R., Carmona G., Caiado G., Martins P., Rodrigues A., Link H., Stewart L., Bickel P., Doll C. (2003). "The Pilot Accounts for Portugal" UNITE (Unification of accounts and marginal costs for Transport Efficiency) Deliverable 12, Anexo 7. Financiado pelo 5º Programa-Quadro de Investigação da Comissão Europeia. ITS, Universidade de Leeds. Leeds.

Disponível em: [http://www.its.leeds.ac.uk/projects/unite/downloads/D12\\_Annex7.doc](http://www.its.leeds.ac.uk/projects/unite/downloads/D12_Annex7.doc).

UK DOT (1996). "The COBA Manual", UK Department of Transport, HMSO;

VASCONCELOS, A. L. P., (2004). "Modelos de atribuição e simulação de tráfego. O impacto na qualidade dos resultados de erros no processo de modelação.". Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Urbana, FCT. Coimbra;

VIEGAS, J. M., (2010). Folhas de apoio da disciplina de Transportes, Instituto Superior Técnico. Lisboa;

VIEGAS, J. M., (2000). "A utilização de modelos matemáticos para a estimação da procura de transportes". Lisboa;

VISUM 11.5 Basics (2010). PTV AG. Germany, Karlsruhe;

WARDROP, J.G., (1952). "Some theoretical aspects of road traffic research", Proceedings of the Institute of Civil Engineers, PART II, Vol.1.