



Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia

FEUP



José Pedro Maia Pimentel Tavares

Aplicabilidade e Robustez de Modelos de Afectação de Tráfego em Redes Urbanas



FEUP

Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia

Departamento de Engenharia Civil

Aplicabilidade e Robustez de Modelos de Afecção de Tráfego em Redes Urbanas

José Pedro Maia Pimentel Tavares
(Mestre em Transportes)

Orientador: Prof. Álvaro Jorge da Maia Seco
(Professor Associado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra)

Co-Orientador: Prof. Américo Henrique Pires da Costa
(Professor Associado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto)

Dissertação para Doutoramento em Engenharia Civil
na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Setembro 2003

UNIVERSIDADE DO PORTO	
Faculdade de Engenharia	
BIBLIOTECA M	
N.º	78270
CDU	656(043)
Data	24, 9, 2004

À RAQUEL E AO JOÃO

...

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Álvaro Maia Seco e ao Professor Américo Pires da Costa que orientaram cientificamente o presente trabalho, nunca deixando de me apoiar e incentivar ao longo de todo este processo, e cuja ajuda foi determinante na sua realização, venho aqui deixar o meu profundo reconhecimento.

Ao Professor Arnaldo Sousa Melo, Director da Secção de Vias de Comunicação, pelas condições propiciadas e pelo empenho demonstrado, também aqui exprimo a minha sincera gratidão.

Ao Professor Carlos Rodrigues e ao Engenheiro António Couto a quem agradeço a permanente disponibilidade, incentivo e contagiante empenho e dedicação.

A todos os colegas que de algum modo contribuíram na prossecução deste trabalho, e em especial a todos os colegas docentes e não docentes da Secção de Vias de Comunicação, pretendo de igual forma mostrar a minha homenagem.

Finalmente, o meu agradecimento muito especial à minha família e amigos que sempre me apoiaram, estimularam e contribuíram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Actualmente, a utilização de modelos de afectação de tráfego na ajuda à tomada de decisões no planeamento e projecto de redes rodoviárias urbanas é cada vez mais recomendada, principalmente por duas razões. A primeira deve-se à dificuldade na realização de experiências à escala real; a segunda é a possibilidade que oferece a utilização destes modelos de poder testar várias alternativas.

A criação de um modelo de afectação de tráfego requer um esforço considerável nas fases de calibração e validação, não podendo ser aligeirada, como por vezes poderá acontecer, comprometendo a credibilidade dos resultados obtidos.

À medida que os modelos de tráfego se têm tornado mais “complexos”, também os procedimentos da calibração devem ser mais adequados, e é por isso indispensável considerar simultaneamente o aumento de fiabilidade dos modelos e os recursos necessários para o esforço de calibração. Deste modo, o conhecimento da importância de cada variável, no processo de afectação, assim como os testes e as verificações utilizadas na avaliação assumem particular destaque.

O presente trabalho tem como objectivo principal facilitar a fase de calibração dos modelos de afectação de tráfego a partir do conhecimento do impacto de erros, existentes na constituição da matriz O/D e na quantificação das variáveis que descrevem as condições de operação de uma rede, na qualidade dos resultados finais.

Para o efeito foram efectuadas análises de sensibilidade para diversos tipos de erros comuns, isoladamente ou em simultâneo, estudando-se o respectivo efeito através da comparação entre os resultados obtidos por um modelo de referência desenvolvido por aplicação do Programa SATURN à rede viária da cidade do Porto e os que resultariam após a introdução “forçada” do erro em análise.

Para estabelecer a comparação entre os resultados foram utilizados os parâmetros de calibração/validação normalmente referidos na bibliografia consultada aos quais se juntaram outros dois indicadores cuja utilidade foi demonstrada no desenvolvimento do trabalho.

Foi, assim, possível identificar quais as variáveis que exigem um maior rigor na sua estimação e respectiva amplitude para o erro tolerável, bem como as variáveis cujo impacto é pequeno não se justificando um esforço elevado na sua estimação. Finalmente, com base nos resultados obtidos é efectuada uma análise crítica das “virtudes” de cada um dos parâmetros de calibração/validação.

ABSTRACT

The use of the results of traffic assignment forecasts in many urban network planning and design decisions is becoming increasingly widespread mainly for two reasons. The first one is the difficulty in making experiences in real world environment and secondly is the possibility that models offer in testing several alternatives.

Traffic model development requires a significant effort during calibration and validation stages and shouldn't be shortened, as sometimes may happen risking the credibility of results.

As traffic models become more complex, the procedures need to calibrate them must be more adequate. Often there is a trade-off between increasing confidence in level of accuracy of models and the cost of data collection and effort required for calibrating. In this way the knowledge of the importance of each variable in the traffic assignment process as well as the tests and checks used to evaluate the reliability of models are of extreme importance.

The aim of the present framework is to reduce the complexity of calibration stage in traffic models, knowing the impact of errors in the accuracy of final results, when developing the trip matrix and quantifying the specification errors in the variables necessary to characterize the network operation.

Therefore, analysis to detect the sensibility to several types of frequent errors were performed, isolate or simultaneously, studying to each case the consequences by means of the comparison between the results obtained with a reference model, namely the SATURN model applied to Porto network, and the resulting ones after "forcing" the introduction of the analyzed error.

The evaluation was made by comparing the impacts, measured with the values of the calibration/validation parameters, frequently mentioned in research bibliography, jointly with two new other indicators, which benefit is confirmed during the progress of this work.

This procedure made it possible to identify which variables require greater precision when estimated and the range of the admissible error, spotting simultaneously the variables which contribute is minor, not having the need to expend a great effort in its estimate. Finally, based on the obtained results, a critical analysis is made, emphasizing the value of each calibration/validation parameter.

RÉSUMÉ

Actuellement l'utilisation de modèles d'affectation du trafic en tant que support décisionnel au niveau de la planification et du projet de réseaux routiers urbains est de plus en plus souhaitable, pour deux raisons principalement. Tout d'abord, la difficulté à réaliser des expériences à l'échelle réelle et ensuite la possibilité offerte par l'utilisation de ces modèles de pouvoir tester plusieurs alternatives.

La création d'un modèle d'affectation du trafic demande un effort considérable pendant les phases de calibrage et de validation qui ne peuvent pas être négligées, ce qui arrive parfois, sous risque de compromettre la crédibilité des résultats obtenus.

À mesure que les modèles de trafic deviennent plus complexes, les procédures de calibrage doivent aussi être plus adéquates et il faut donc trouver l'équilibre entre l'augmentation de fiabilité des modèles et les ressources nécessaires à l'effort du calibrage. De cette façon, la connaissance de l'importance de chacune des variables dans le processus de calibrage, ainsi que les tests et les vérifications utilisées dans l'évaluation gagnent une importance particulière.

Ce travail établit comme objectif principal celui de faciliter la phase du calibrage des modèles d'affectation du trafic, à partir de la connaissance de l'impact des erreurs - qui peuvent avoir lieu dans la définition de la matrice P/D et dans la quantification des variables qui décrivent les conditions de fonctionnement d'un réseau - sur la qualité des résultats finaux.

À cet effet, nous avons réalisé des analyses de sensibilité pour plusieurs types d'erreurs ordinaires, isolément ou en simultané, en évaluant l'effet correspondant, à partir de la comparaison entre les résultats obtenus par un modèle de référence développé par l'application du Programme SATURN sur le réseau routier de la ville de Porto et ceux qui résulteraient après l'introduction forcée de l'erreur analysée.

Pour établir la comparaison entre les résultats, nous avons utilisé les paramètres de calibrage/validation normalement référés dans la bibliographie consultée, auxquels nous avons ajouté deux autres dont l'utilité a été démontrée dans ce travail.

Nous avons ainsi pu identifier les variables qui exigent une plus grande rigueur dans leur estimation et l'amplitude correspondante pour l'erreur tolérable, ainsi que les variables dont l'impact est méprisable et ne justifient pas un grand effort dans leur estimation. Finalement, à partir des résultats obtenus nous réalisons une analyse critique des vertus de chacun des paramètres de calibrage/validation.

ÍNDICE

I. INTRODUÇÃO.....	1
1. Preâmbulo	1
2. Objectivos e Metodologia Base.....	4
3. Estrutura da Dissertação	5
II. OS MODELOS NO ÂMBITO DOS TRANSPORTES.....	7
1. Enquadramento	7
2. Modelos de Transportes	9
2.1 Preâmbulo	9
2.2 Geração/Atracção de viagens.....	13
2.3 Distribuição de viagens.....	15
2.4 Repartição modal	17
2.5 Afectação de tráfego	18
3. Gestão Integrada de Transportes.....	19
4. O Processo de Calibração/Validação	22
III. MODELOS DE AFECTAÇÃO DE TRÁFEGO	30
1. Caracterização dos Modelos de Afectação	30
1.1 Princípios da afectação	30
1.2 Classificação dos modelos	33
2. Métodos de Afectação de Tráfego	37
2.1 Preâmbulo	37
2.2 Principais técnicas de selecção de caminhos	38
2.2.1 “Tudo ou Nada”	38
2.2.2 Métodos Estocásticos	39
2.2.3 Equilíbrio do Utilizador	41

2.2.4 Equilíbrio Estocástico	44
3. Desenvolvimento de um Modelo.....	45
3.1 Enquadramento	45
3.2. Definição do zonamento	47
3.3 Definição da rede	52
4. Codificação dos Elementos Fundamentais da Rede Modelada	54
4.1 Identificação dos elementos	54
4.2 Atributos dos elementos.....	61
4.2.1 Intervalo crítico	64
4.2.2. Débitos de saturação/Capacidades dos movimentos.....	65
4.2.3 Capacidade	69
4.2.4 Velocidade.....	72
4.2.5 Relações velocidade-volume.....	76
4.2.6 Síntese	82
5. Calibração e Validação de Modelos de Afecção	87
5.1 Preâmbulo	87
5.2 Parâmetros e critérios de aferição do desempenho	89
5.2.1. Enquadramento	89
5.2.2 Níveis de agregação	91
5.2.3 Metodologias de avaliação do desempenho de modelos.....	92
5.2.3.1 Preâmbulo	92
5.2.3.2 A metodologia “Inglesa”	95
5.2.3.3 A metodologia da Federal Highway Agency-FHWA (Estados Unidos).....	99
5.2.3.4 Outras “metodologias”	104
5.2.4 Amostragem	109
5.2.5 Síntese	110
5.3 Procedimentos de calibração.....	112
5.3.1. Enquadramento	112
5.3.2 Selecção da técnica de afectação.....	115
5.3.3 Correção da oferta	117

5.3.4 Variáveis de funcionamento.....	119
5.3.5 Correção da procura	123
6. Fontes e Impactos Potenciais dos Erros no Processo de Modelação	127
6.1. Enquadramento	127
6.2. Impactos típicos das diferentes tipologias de erros de modelação	129
6.3. Avaliação da importância relativa dos erros função do seu impacto	131
 IV. METODOLOGIA DE ANÁLISE DO IMPACTO DE ERROS ...	133
1. Preâmbulo	133
1.1 Enquadramento	133
1.2 Objectivos da análise	134
2. A Metodologia Básica de Análise	136
2.1. A Filosofia básica de análise.....	136
2.2 Tipos de análises de sensibilidade	138
2.3 Geração de erros	141
2.4 Análises Tipo	145
2.5 O processo de selecção e condicionantes associadas a um modelo de referência	147
2.6 Selecção dos parâmetros de aferição	148
2.7 Avaliação dos impactos de erros.....	150
3. O Modelo de Referência SATURN	151
3.1 Estrutura do modelo	151
3.2 Princípios básicos de modelação	153
3.3 Convergência do modelo	156
3.4 O processo de codificação do modelo	159
4. Estrutura das Análises de Sensibilidade para o Modelo de Referência	165
4.1. Erros ao nível da matriz	166
4.2. Erros ao nível da oferta	166

4.3. Procedimentos semi-automáticos de análise.....	168
V. AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE ERROS NO DESEMPENHO POTENCIAL DOS MODELOS	170
1. Preâmbulo	170
2. Modelo SATURN da cidade do Porto	171
2.1 Preâmbulo	171
2.2 Definição e codificação da rede	174
2.3 Matriz Origem-Destino	180
2.4 Verificação da rede	183
2.5 Calibração	185
2.6 Validação	188
3. Calibração Base da Metodologia de Análise	189
3.1 Seleccção dos parâmetros de aferição	189
3.2 Avaliação dos impactos das flutuações temporais do tráfego nos parâmetros	192
3.3 Análise dos resultados obtidos.....	194
4. Avaliação dos impactos de erros de quantificação	200
4.1. Introdução	200
4.2 Análise de sensibilidade face a diferentes erros na “variável” procura	203
4.2.1 Erros ao nível global da matriz	203
4.2.2 Erros ao nível das células admitindo a lei normal.....	205
4.2.3 Erros ao nível de uma célula da matriz	207
4.2.4 Erros ao nível das células de uma Origem ou de um Destino.....	212
4.3. Análise de sensibilidade face a diferentes erros na “variável” oferta	216
4.3.1 Erros ao nível do intervalo crítico	217
4.3.2 Erros ao nível das “capacidades”	219
4.3.3 Erros ao nível das velocidades	223
4.3.4 Erros ao nível do valor da potência da função volume-velocidade	230
4.4. Análise de sensibilidade para diferentes graus de congestionamento da rede.....	232

4.5. Análise de sensibilidade face à ocorrência de erros simultâneos	235
5. Principais conclusões da análise de sensibilidade	239
VI. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	245
1. Síntese Geral e Principais Conclusões	245
2. Desenvolvimentos do Estudo	252
REFERÊNCIAS	254

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II.1 – Representação esquemática de uma rede de transportes	11
Figura II.2 – Inserção dos Modelos de Transporte no Planeamento de Transportes.....	12
Figura II.3 - Distribuição de viagens por motivo	15
Figura II.4 - Objectivo dos modelos de afectação	19
Figura II.5 - Interacção entre afectação e optimização.....	20
Figura II.6 - Gestão Integrada de Transportes	20
Figura II.7 - Evolução histórica dos Sistemas Inteligentes de Transporte	22
Figura II.8 - Desenvolvimento de um modelo.....	23
Figura II.9 - Processos de validação	24
Figura II.10 - Propagação dos erros de modelação	25
Figura II.11 - Modelação e simplificação.....	27
Figura III.1 - Distribuição dos custos percebidos no arco	40
Figura III.2 - Exemplo de alteração de ligação a centróide.....	50
Figura III.7 - Exemplo de codificação de uma intersecção giratória.....	58
Figura III.8 - Exemplo de codificação de um nó em trevo.....	58
Figura III.9 - Exemplo de codificação de um entrecruzamento	59
Figura III.10 - Exemplo de introdução de nós fictícios para a representação de arcos ...	59
Figura III.11 - Diagrama fundamental da relação Velocidade- Volume.....	77
Figura III.12 - Relação Tempo de Percurso-Volume	77
Figura III.13 - Cálculo dos coeficientes de sinuosidade.....	81
Figura III.14 - Conversão de funções velocidade-volume	82
Figura III.15 - Representação esquemática de uma pequena rede	83
Figura III.16 - Exemplo de formulário para a recolha de dados no campo.....	84
Figura III.17 - - Exemplo de formulário para a codificação dos nós e arcos	85
Figura III.18 - Exemplo para tabelas de atributos	86

Figura III.19- Calibração e validação de um modelo	88
Figura III.20 - Comparação das variáveis	90
Figura III.21 - Exemplo de cordão, screenline e cutline	92
Figura III.22- Representação gráfica das variáveis	93
Figura III.23 - Desvio total máximo aceitável dos volumes em screenlines	102
Figura III.24 – Exemplo da utilização do parâmetro RMSE	106
Figura III.25 – Exemplo de selecção de arcos com observações independentes	109
Figura III.26 – Integração do processo de calibração no desenvolvimento de um modelo	115
Figura III.27 – Selecção da técnica de afectação	116
Figura III.28 – Exemplo da árvore mínima referente à zona A	118
Figura III.29 - Métodos sistemáticos de calibração	121
Figura IV.2 - Estrutura do modelo SATURN	152
Figura IV.3 - Processo afectação/simulação	154
Figura IV.4 - Exemplo de histogramas de volumes	155
Figura IV.5 - Processamento dos dados para a análise de sensibilidade	169
Figura V.1– Rede rodoviária da cidade do Porto	172
Figura V.2 - Área definida para o modelo SATURN-Porto e respectivo zonamento ...	174
Figura V.3 - Rede rodoviária modelada (SATURN-Porto)	175
Figura V.4 – Ficha tipo para caracterização das intersecções	177
Figura V.5 – Ficha tipo para codificação das intersecções	179
Figura V.6 – Ficha tipo para a caracterização e codificação dos arcos	180
Figura V.7 - Identificação do cordão exterior, das screenlines e respectivos postos	181
Figura V.8 – Identificação dos diferentes cordões adoptados	183
Figura V.9 – Gráfico tipo para interpretação dos resultados	202

Figura V.10 – Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro percentual na matriz.....	204
Figura V.11 – Impactos nos valores médios dos parâmetros em função do erro nas células.....	206
Figura V.12 – Impactos nos valores médios, percentis 15 e 85 dos parâmetros em função do erro nas células	206
Figura V.13 – Impactos nos valores médios, máximos e mínimos dos parâmetros em função do erro numa célula	208
Figura V.14 - Erro máximo admissível nas células para GEHM = 2 em função da distância entre centróides	210
Figura V.15 - Erro máximo admissível nas células para GEHM = 2 em função do número de zonas transpostas.....	210
Figura V.16 - Erro máximo admissível em função da distância entre centróides.....	211
Figura V.17 - Erro máximo admissível em função do número de zonas transpostas....	212
Figura V.18 – Impactos nos valores médios, máximos e mínimos dos parâmetros em função dos erros concentrados numa origem	213
Figura V.19 - Impactos nos valores médios, máximos e mínimos dos parâmetros em função dos erros concentrados num destino.....	213
Figura V.20 - Distribuição espacial do erro “admissível” por Origens.....	214
Figura V.21 - Distribuição espacial do erro “admissível” por Destinos	215
Figura V.23 – Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro no intervalo crítico	218
Figura V.24 – Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro nas “capacidades” em toda a rede	219
Figura V.25 - Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro nas “capacidades” dos nós de simulação	220
Figura V.26 - Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro nas capacidades dos movimentos em cruzamentos prioritários.....	220
Figura V.27 - Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro nos débitos de saturação, em cruzamentos co sinais luminosos	221

Figura V.28 - Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro nas capacidades nos arcos da zona de atribuição	221
Figura V.29 - Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro nas velocidades em regime livre na rede	224
Figura V.30 - Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro nas velocidades em regime livre na zona de simulação.....	224
Figura V.32 - Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro nas velocidades em regime livre nos arcos com cruzamentos de sinais luminosos a jusante	225
Figura V.33 - Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro nas velocidades em regime livre na zona de atribuição	226
Figura V.34 - Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro nas velocidades em regime livre e em capacidade em toda a rede	227
Figura V.36 - Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro nas velocidades em regime de capacidade na zona de atribuição.....	228
Figura V.37 - Resultados da variação da potência na rede de atribuição	230
Figura V.38 – Tempos de percurso em função da potência da curva volume-velocidade para diferentes graus de saturação.....	231
Figura V.39 – Impactos nos parâmetros para os dois níveis de procura e em função do erro no intervalo crítico	233
Figura V.41 – Impactos nos parâmetros para os dois níveis de procura e em função do erro nas velocidades	234
Figura V.42 – Impactos nos parâmetros para os dois níveis de procura e em função do erro no valor da potência da curva volume-velocidade	234
Figura V.43 – Impactos nos valores dos parâmetros em função da ocorrência de erros simultâneos na matriz e nas capacidades	237
Figura V.44 - Impactos nos valores dos parâmetros em função da ocorrência de erros simultâneos na matriz e nas velocidades.....	238
Figura VI.1 - Análise de sensibilidade no processo de calibração	247

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro II.1 – Fiabilidade estimada de alguns parâmetros da modelação	26
Quadro III.1 - Classificação dos modelos quanto ao detalhe	36
Quadro III.2 - Valores para o intervalo crítico (segundos).....	64
Quadro III.3 - Valores recomendados para a capacidade	71
Quadro III.4 - Valores recomendados para a velocidade	73
Quadro III.5 – Valores recomendados para os parâmetros α e β da curva BPR	79
Quadro III.6 - Critérios para os parâmetros associados à regressão e correlação	96
Quadro III.7 - Parâmetros e critérios para as diferenças	99
Quadro III.8 - Critérios para os parâmetros preconizados pelo FHWA e MDOT	102
Quadro III.9 - Desvio total máximo aceitável dos volumes diários	103
Quadro III.10 - Desvio total máximo aceitável dos volumes horários	103
Quadro III.11 – Métodos de “actualização” de matrizes a partir de volumes de tráfego reais.....	126
Quadro IV.1 – Critérios de convergência.....	158
Quadro V.1 – Identificação das zonas utilizadas para o modelo SATURN-Porto.....	176
Quadro V.2 – Expressões utilizadas para o cálculo dos débitos de saturação.....	178
Quadro V.3 - Parâmetros e critérios adoptados para o modelo SATURN-Porto	185
Quadro V.4 – Resultados da calibração para o modelo SATURN-Porto.....	187
Quadro V.5 – Resultados da avaliação da convergência para o modelo SATURN-Porto.....	188
Quadro V.6 – Resultados da calibração para o modelo SATURN-Porto.....	188
Quadro V.7 – Resultados obtidos para os parâmetros calculados com amostras geradas tendo por base o Teorema do Limite Central	195
Quadro V.8 - Resultados obtidos para os parâmetros calculados com amostras geradas através do Método de Box-Muller.....	196

Quadro V.9 – Indicadores estatísticos dos percursos seleccionados	201
Quadro V.10 – Caracterização do funcionamento das diferentes “redes”	232

I. INTRODUÇÃO

1. Preâmbulo

A tomada de decisões no âmbito da circulação urbana, tanto em termos de estratégias como de políticas de transporte a implementar, tem actualmente, como principal suporte, critérios baseados em experiências profissionais.

Devido às suas características, o tráfego constitui um domínio em que a aplicação de modelos pode desempenhar um importante papel para o seu estudo, constituindo uma importante ferramenta de apoio, o que se deve basicamente a duas razões principais:

- i) o custo e a dificuldade em realizar experiências à escala real, bem como possíveis implicações ao nível da segurança;
- ii) a possibilidade que os modelos oferecem de poder testar, avaliar e comparar diversas alternativas, antes de as mesmas serem (ou não) implementadas.

Assim, face à cada vez maior complexidade do planeamento urbano em que tanto as medidas estáticas (uso do solo, novas infra-estruturas, etc.) como as medidas dinâmicas (controlo de tráfego, direccionamento de condutores, portagens urbanas, etc.) devem ser devidamente ponderadas, pode dizer-se que o recurso a modelos se torna indispensável, uma vez que permite uma avaliação *a priori*.

De um modo geral, os Modelos de Transporte tentam representar a localização e a distribuição geográfica das viagens, a selecção pelos diferentes modos alternativos de transporte e respectivos itinerários, de forma a caracterizar os volumes de tráfego em cada elemento de “infra-estrutura” de transporte.

Este último resultado, no que se refere aos volumes de veículos nas vias rodoviárias, representa a afectação de tráfego que consiste basicamente na atribuição

das viagens aos arcos que constituem uma rede viária, podendo de uma forma sucinta ser descrita por:

- i) determinação dos caminhos lógicos entre cada origem e cada destino;
- ii) atribuição e acumulação das viagens em cada arco;
- iii) cálculo de indicadores do nível de desempenho da rede.

Deste modo, os modelos de afectação de tráfego, uma vez que fornecem bastante informação de uma forma sistemática e com critérios reproduzíveis para a avaliação, tem um grande campo de aplicação, a saber:

- análise do funcionamento de um sistema existente;
- determinação das deficiências de um sistema existente;
- desenvolvimento e teste de sistemas alternativos;
- estabelecimento de prioridades no desenvolvimento de sistemas alternativos;
- estudo do efeito de novos pólos geradores de tráfego;
- informação para projecto, análises ambientais, energéticas e económicas;

Certamente que os resultados mais básicos da afectação de tráfego são os volumes juntamente com as velocidades ou tempos de percurso na rede. Estes resultados obtidos deverão, no entanto, ter um significado claro e apresentar uma adequada correspondência à realidade, pelo que as fases de calibração e validação do modelo são extremamente importantes.

Neste ponto, convém realçar que os modelos, por definição, são uma aproximação da realidade, pelo que as simplificações são inevitáveis, dado que é irrealista incorporar todos os factores que influenciam o comportamento de um sistema, não só porque a tradução dessa influência é impraticável, mas também porque o modelo terá de ser suficientemente simples para que possa ser útil.

Existe, assim, um equilíbrio difícil que terá de ser conseguido entre a simplificação da realidade e a aplicabilidade do modelo, isto é, os modelos não podem ser demasiado simples para que não façam duvidar dos seus resultados/conclusões, nem

poderá haver a utopia de confundir o modelo com a realidade, tornando o modelo de tal forma complexo que a sua utilização se torne praticamente impossível.

A aplicação de modelos, nos quais já se encontram definidas as interacções entre as diversas variáveis do sistema, obriga a um grande esforço no que diz respeito à descrição destas variáveis que representam as características do sistema viário. Face ao volume de dados necessários para esta caracterização, a quantificação dos valores das diversas variáveis indispensáveis para o correcto funcionamento do modelo passa pela sua estimação, a partir de medições com base em amostras da população, ou pelo recurso ao seu cálculo utilizando expressões já desenvolvidas neste domínio.

Neste campo de definição das variáveis, convém ainda realçar que o comportamento de um sistema viário não é homogéneo em termos temporais, nomeadamente no que se refere à sua utilização, ou seja, é reconhecido que a procura de um sistema viário não é constante, nem ao longo do dia nem de dia para dia.

Deste modo, pode afirmar-se que a existência de “erros” é inerente ao próprio modelo, à caracterização das variáveis e à variabilidade temporal do tráfego. Embora sobre o primeiro tipo de erros apenas se possa ter algum controlo sobre a decisão do modelo a adoptar, os erros associados aos dois últimos tipos devem ser analisados de forma a que se conheça qual o impacto dos mesmos no desempenho final de um modelo.

Assim, o conhecimento mais exacto possível da importância de cada uma das variáveis para a qualidade dos resultados produzidos pelo modelo é fundamental, com vista a definições, para cada uma delas, do grau de precisão desejável na sua quantificação.

Estes aspectos de representação da realidade/simplificação do modelo e calibração/validação serão fundamentais na definição do seu grau de aplicabilidade e robustez, sendo no entanto importante assegurar que no processo de decisão os seguintes aspectos são tidos em consideração (HMSO, 1991):

- i) o grau de precisão do modelo é o adequado para a(s) análise(s) em estudo;
- ii) a qualidade da informação fornecida pelo modelo é compreendida;
- iii) a incerteza inerente ao modelo é considerada.

Embora o longo passado da aplicação de modelos de afectação e o processo de calibração e posterior validação de modelos já tenha algum desenvolvimento, designadamente nos objectivos a atingir, a investigação da relação entre a qualidade dos dados de entrada necessários ao funcionamento de um modelo e os seus resultados ainda se encontra só muito levemente abordado.

2. Objectivos e Metodologia Base

O objectivo principal do trabalho de investigação proposto consiste em contribuir para a consistência no desenvolvimento e aplicação de modelos de afectação de tráfego em meio urbano, designadamente no que diz respeito à relação entre as variáveis necessárias à caracterização de um sistema viário e o desempenho global do modelo.

Especificamente, a presente linha de investigação, identificada como a mais relevante para esta problemática, concentrou-se na definição de uma metodologia que permite, de uma forma sistemática e controlada, simular os diversos tipos de erro e aferir os respectivos impactos no desempenho final de um modelo, com o objectivo de otimizar o processo de calibração, nomeadamente no que diz respeito não só à identificação dos parâmetros de aferição do desempenho, como também à qualidade dos valores das variáveis necessárias para a aplicação do modelo.

Para o efeito foram realizadas análises de sensibilidade a partir de uma série de corridas de um modelo de afectação de tráfego desenvolvido para a cidade do Porto, onde foram testadas a influência dos erros associados quer à definição da procura quer à caracterização operacional da oferta. A avaliação do desempenho global do modelo foi concretizada com recurso aos indicadores normalmente utilizados nas fases de calibração e validação deste tipo de modelos.

3. Estrutura da Dissertação

O presente trabalho de investigação incidiu sobre a análise de Modelos de Afecção de Tráfego aplicados a redes urbanas e apenas 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 (número e distribuição geográfica de viagens) e da oferta (rede rodoviária). Esta análise foi estruturada em cinco capítulos, não se incluindo o presente capítulo de introdução.

No segundo capítulo, procede-se ao posicionamento do caso particular dos Modelos de Afecção de Tráfego no âmbito dos Modelos de Transportes, actualmente indispensáveis não só no Planeamento de Transportes, como também na Gestão Integrada de Transportes. Neste capítulo de enquadramento são também focados os problemas ligados aos processos de calibração e posterior validação dos modelos, designadamente ao nível da identificação das diversas fontes de erros inerentes a qualquer Modelo de Transporte.

O terceiro capítulo debruça-se sobre o caso específico dos modelos de afectação de tráfego, procurando descrever os diferentes tipos de modelos existentes e actualmente utilizados, bem como as suas particularidades. Adicionalmente, também é abordado o desenvolvimento de modelos no que se refere às suas condições de aplicação, desde o seu início, com a definição da rede e sistema de zonas, em função dos objectivos fixados, e respectiva codificação, de forma a ser passível de processamento com recurso aos programas de cálculo automático existentes neste campo. Neste ponto, é dado especial realce à avaliação do desempenho de modelos, nomeadamente no que diz respeito às fases de calibração e validação dos mesmos, dando-se particular destaque aos parâmetros de aferição de desempenho dos Modelos de Afecção de Tráfego actualmente utilizados, identificando-se as fontes de erros e respectivos impactos resultantes no processo de modelação.

No Capítulo IV, apresenta-se uma metodologia de análise em que se propõe uma análise sistemática para a identificação das variáveis que caracterizam as condições operacionais de uma rede viária, inserida na fase de calibração de modelos. Neste capítulo é também descrito o modelo de referência utilizado na análise, o programa SATURN (*Simulation and Assignment of Traffic to Urban Road Networks*).

A aplicação da metodologia preconizada é descrita no Capítulo V, apresentando-se o caso prático de estudo aplicado à rede rodoviária da cidade do Porto, com a utilização do modelo de referência, bem como os resultados obtidos face aos inúmeros testes realizados.

Finalmente, no Capítulo VI, enunciam-se as principais conclusões do presente trabalho, apontando-se para linhas futuras de investigação neste campo de aplicação de modelos de afectação de tráfego.

II. OS MODELOS NO ÂMBITO DOS TRANSPORTES

1. Enquadramento

Um planeamento de transportes eficaz resulta na criação de serviços de transporte com qualidade, a um custo razoável e com um impacto mínimo. Uma deficiência nos planos pode conduzir a situações de congestionamento da rede, a usos de solo indesejáveis, a impactos ambientais elevados e ao desperdício de recursos e dos (escassos) fundos públicos.

O planeamento de transportes é um processo complexo que envolve um grande número de etapas, nomeadamente:

- definição do problema;
- delimitação da área de estudo;
- definição de objectivos e critérios;
- caracterização da procura e oferta de transporte;
- recolha de dados;
- desenvolvimento de alternativas e cenários;
- previsão do futuro comportamento do transporte;
- avaliação das alternativas;
- selecção do plano;
- implementação do plano;
- avaliação;
- monitorização;
- actualização.

Os modelos de transporte desempenham um papel fundamental neste complexo processo, nomeadamente nas etapas de previsão e avaliação, pois permitem a estimação do número de viagens que são (irão ser) realizadas e como as mesmas se distribuem

tanto no tempo como no espaço, em função de uma dada utilização do solo e de alternativas de transporte. Estas estimativas são a base de sustentação de planos de transporte, de estudos de impacto e de estudos de investimentos.

Assim, os modelos são utilizados com uma dada sequência e integrados no planeamento de transportes, de forma a responder a questões relacionadas com os padrões de deslocação:

A) Ocupação do Território

- População: quantas habitações?
- Economia: que actividades?
- Uso do solo: onde é que as pessoas habitam e onde é que desempenham as suas actividades?

B) Previsões de Transporte

- Geração de Viagens: quantas se realizam?
- Distribuição de Viagens: donde vêm e para onde vão? (em que período são realizadas?)
- Repartição Modal: que modos de transporte são utilizados?
- Afectação das Viagens: que percursos são utilizados?

C) Avaliação de Cenários: quais são os efeitos destas viagens?

De uma forma genérica, 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 os riscos inerentes às experiências realizadas num ambiente real. Segundo a definição do *Standard Computer Dictionary* (IEEE, 1991):

“Modelo - aproximação, representação ou idealização dos elementos seleccionados da estrutura, do comportamento e da operação, ou outras características, de um processo, conceito ou sistema real.”

No caso específico dos transportes, um modelo consiste na representação das diversas componentes da infra-estrutura de transporte (rede viária, linhas de transporte público, gestão e controlo de tráfego) e dos fluxos de tráfego (utilizadores e veículos) de

forma a reproduzir as condições operacionais do sistema viário. Deste modo, estes modelos tornam principalmente possível a previsão dos fluxos de tráfego numa rede de transportes como uma função do sistema que a contém e das suas características.

Com o avanço recente no campo informático, têm sido desenvolvidos modelos de tráfego cada vez mais potentes. No entanto, o aumento da sua complexidade, numa tentativa de uma maior aproximação à realidade, exige 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, função da informação fornecida, para a tomada de decisões (HMSO, 1991).

Importa ainda realçar que nenhum modelo de tráfego pode ter em conta todos os factores 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. Modelos de Transportes

2.1 Preâmbulo

A modelação da procura/oferta de transportes foi inicialmente desenvolvida, no início da década de 50, como um meio de apoio ao planeamento de infra-estruturas rodoviárias em meio rural, isto é, vias de ligação entre meios urbanos distintos (auto-estradas, vias rápidas, estradas, ...).

Contudo, face à necessidade de outro tipo de resultados, designadamente no que concerne à sua aplicação em redes urbanas, permitindo a incorporação de outros modos de transporte (transportes públicos, peões, bicicletas, ...) e a análise de estratégias e políticas alternativas de transporte, o processo de modelação tem vindo a ser modificado de forma a incluir técnicas que permitam analisar estes tipos de abordagem.

A modelação de transportes envolve uma série de modelos matemáticos que tentam simular o comportamento dos utilizadores do sistema. Os modelos são geralmente sequenciais, envolvendo uma série de 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 factores considerados e como se reage em situações alternativas.

Por outro lado, os modelos necessitam que a área em análise seja desagregada numa série de áreas mais pequenas onde as viagens são geradas e para onde são atraídas, uma vez que seria impensável tratar viagem a viagem, dada a multiplicidade de Origens/Destinos existente. Assim, os modelos de transporte utilizam áreas geográficas com características homogéneas, denominadas zonas, e para as quais se assume que as viagens se iniciam e terminam no seu centro de actividade – centróide.

A dimensão das zonas, além do objectivo do estudo a realizar, depende fundamentalmente do tipo e do tamanho da área em análise, tendendo a ser mais pequena em meios urbanos e maior em meios rurais.

Saliente-se que com a utilização deste conceito de zona, os modelos não têm em consideração as viagens intrazonas (viagens que começam e acabam na mesma zona), apenas representando as viagens interzonas (viagens com início e fim em zonas distintas).

Deste modo, a dimensão das zonas é um factor crítico na determinação da representação da realidade e da fiabilidade do modelo: se as zonas são de grande dimensão, o modelo não poderá estimar os fluxos de tráfego com grande precisão embora a matriz de viagens seja mais fiável e, por outro lado, se as zonas forem muito pequenas, a amostra para as células da matriz também o é, afectando a fiabilidade das estimativas das viagens e dos fluxos (HMSO, 1991) para além de exigir recursos eventualmente incompatíveis.

Ainda no que diz respeito às zonas, geralmente distinguem-se dois tipos, as zonas internas que se encontram dentro da área em análise e as zonas externas que se encontram fora da área em estudo.

Por último, para a aplicação dos modelos, é necessário proceder-se à representação da infra-estrutura de transportes, a qual é realizada pela introdução do conceito de rede. A rede é constituída por arcos, representando os segmentos de vias rodoviárias ou linhas de transporte públicos, por nós, caracterizando as intersecções ou outros pontos da rede em que existam discontinuidades, e pelos centróides que se encontram ligados à rede pelos respectivos conectores (Figura II.1).

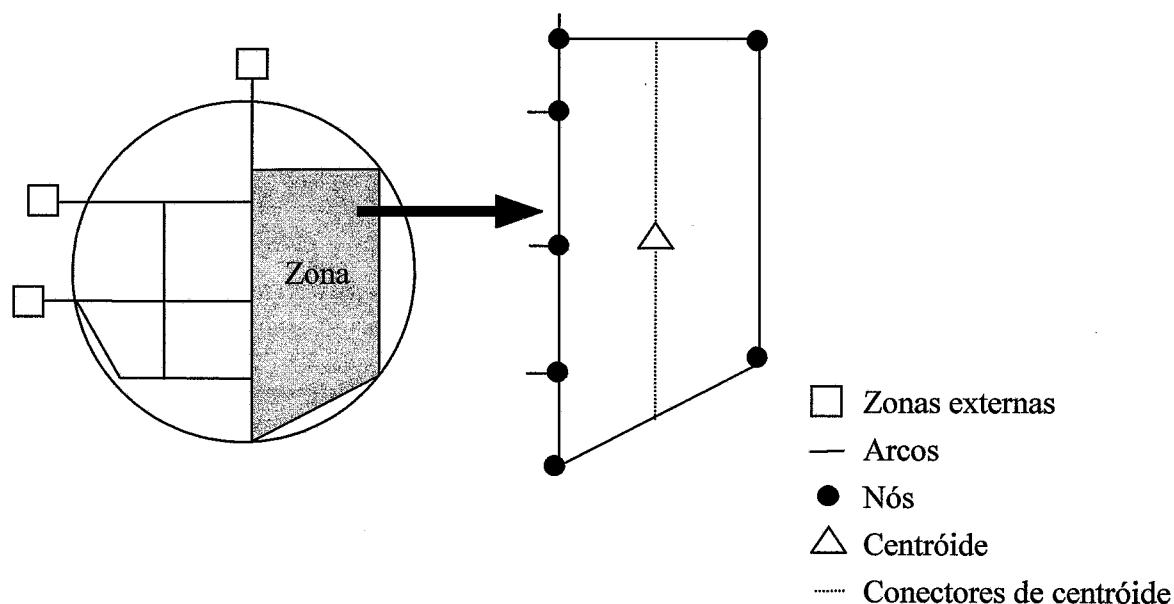


Figura II.1 – Representação esquemática de uma rede de transportes

De uma forma sucinta, a caracterização dos arcos inclui a identificação dos nós inicial e final, os tempos de percurso ou velocidades para determinadas condições típicas de tráfego, as capacidades e os sentidos de circulação. Em relação aos nós, é necessário identificar a sua localização geográfica e as características operacionais das intersecções (tipologia, níveis de prioridade, capacidades, etc).

Através desta representação da rede, é possível simular as viagens ao longo da rede formada por arcos e nós, que começam na sua zona de geração e terminam na sua zona de atracção.

Com base nas redes de transporte assim caracterizadas, é possível aplicar o denominado Modelo de Transportes que pode, de uma forma clássica, ser considerado como um “Modelo a 4 Passos” (*Four-Stage-Model*), actualmente fundamental no

Planeamento de Transportes (Figura II.2) e que, embora existam outras combinações e/ou permutações, tem normalmente a seguinte sequência:

- i) Geração de viagens: utilização de modelos de geração e de atracção para a determinação do número total de viagens em cada origem e em cada destino, respectivamente, para cada uma das zonas modeladas;
- ii) Distribuição de viagens: utilização de modelos para a estimação do número de viagens entre cada par de zonas;
- iii) Escolha modal: utilização de modelos para a repartição das viagens entre cada par de zonas pelos modos alternativos de transporte;
- iv) Afectação de tráfego: utilização de modelos para a atribuição das viagens entre cada par de zonas a um ou mais percursos, utilizando o modo de transporte respectivo da rede.

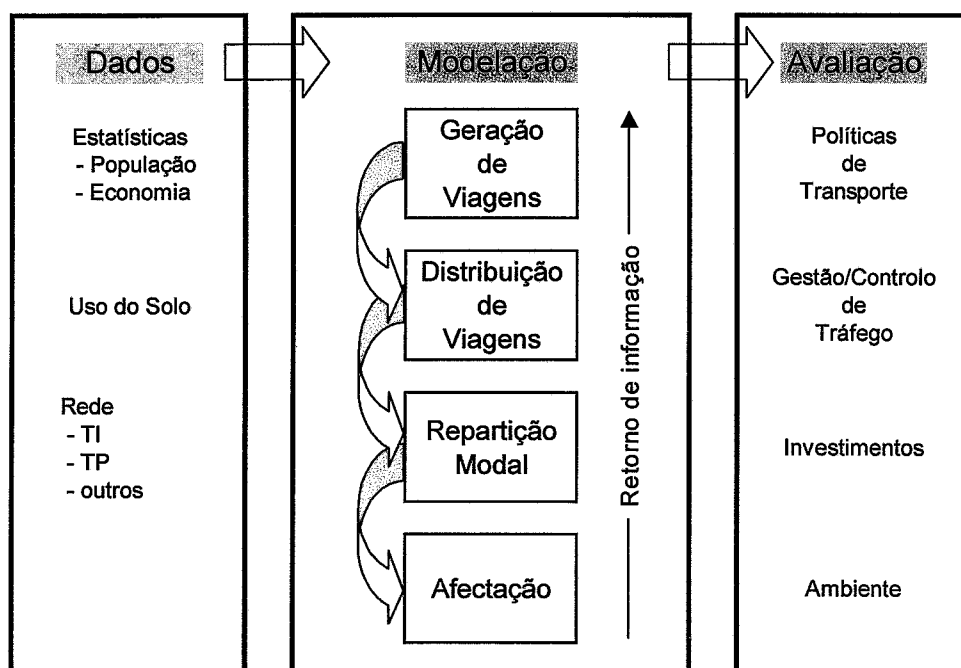


Figura II.2 – Inserção dos Modelos de Transporte no Planeamento de Transportes

2.2 Geração/Atracção de viagens

O primeiro passo de um modelo de transportes consiste na geração de viagens ao nível das zonas, o qual necessita de informação sobre o uso do solo e de dados sócio-económicos, de forma a estimar o número de pessoas que irão realizar deslocações de e para cada zona, ao longo de um dado período de tempo.

Nestes modelos parte-se do princípio que a geração de viagens está associada, por um lado, à capacidade de atracção das zonas, dependente da ocupação do solo, e, por outro lado, da maior ou menor disponibilidade das pessoas para realizarem viagens a fim de poderem ter acesso a bens e/ou serviços.

A produção de viagens divide-se em dois tipos, as geradas na habitação (HB - *Home-based*), ou seja, aquelas em que a origem ou o destino é a habitação e as não geradas na habitação (NHB - *Non home-based*) que representam as viagens em que nenhum extremo é habitação. Para a determinação das primeiras (O_{HB}) é usualmente estabelecida uma função com base em critérios que têm em conta as características médias da habitação, tais como o tamanho da família, nível de rendimento e a taxa de motorização. As do segundo tipo (O_{NHB}) representam apenas uma pequena percentagem das anteriores (15 a 20% - Ortuzar e Willumsen, 1990) e são geralmente obtidas em função das actividades existentes em cada zona.

De uma forma geral, pode então definir-se que o número total de viagens produzidas numa dada zona (O_i) será dada por:

$$O_i = O_{HB_i} + O_{NHB_i} \dots\dots\dots (II.1)$$

com:

$$O_{HB_i} = (\alpha + \beta_1 \cdot \bar{X}_{1_i} + \beta_2 \cdot \bar{X}_{2_i} + \dots + \beta_n \cdot \bar{X}_{n_i}) \cdot F_i \dots\dots\dots (II.2)$$

$$O_{NHB_i} = \left(\frac{p}{1-p} \cdot \frac{S_i}{S} \right) \cdot O_{HB} \dots\dots\dots (II.3)$$

onde:

O_{HB_i} - viagens HB da zona i ;

O_{NHB_i} - viagens NHB da zona i ;

$\bar{X}_{k_i}$ - valor médio da variável k (dimensão, nº de activos, nº de automóveis, ...) das famílias residentes na zona i ;

α, β_k – parâmetros de calibração geralmente obtidos a partir da aplicação de técnicas de regressão múltipla;

F_i – número de famílias residentes na zona i ;

p – proporção de viagens NHB;

S_i - volume de actividades na zona i ;

S – volume de actividades.

A atracção de viagens é tipicamente uma função das actividades sócio-económicas e do tipo das ocupações de solo presentes em cada zona (habitacional, industrial, comercial, de serviços, de lazer, ...), sendo usualmente calculadas com base nos "volumes" de actividades presentes e tendo por base o número total de viagens produzidas. Uma possível expressão geral para o cálculo do número de viagens atraídas para cada zona (D_j) pode ser dada por:

$$D_j = O \cdot \left(\gamma_1 \cdot \frac{S_{1j}}{\sum_j S_{1j}} + \gamma_2 \cdot \frac{S_{2j}}{\sum_j S_{2j}} + \dots + \gamma_k \cdot \frac{S_{kj}}{\sum_j S_{kj}} \right) \dots\dots\dots (II.4)$$

com

O – número total de viagens produzidas;

S_{kj} - volume da actividade k na zona j ;

γ_k - parâmetros de calibração ($\sum_k \gamma_k = 1$).

O modelo de geração de viagens é assim utilizado ao nível das zonas, com base em técnicas de regressão, para a determinação do número de viagens produzidas em cada Origem (O_i) e atraídas para cada Destino (D_j), valores que deverão ser calibrados e validados com base em valores observados, geralmente obtidos a partir de inquéritos. Alternativamente, o cálculo do número de viagens pode ser efectuado recorrendo à aplicação de taxas de geração de tráfego, tendo por base a ocupação do solo em cada zona.

Após o cálculo do número total de viagens produzidas e atraídas em cada zona, poderá ser necessário equilibrar estes dois valores, uma vez que os modelos não garantem, por defeito, esta igualdade ($\sum O_i = \sum D_j$) necessária ao passo seguinte do modelo de transportes. Geralmente, este equilíbrio é realizado em função do número

total de viagens geradas, uma vez que os modelos respectivos são considerados mais fidedignos utilizando melhores variáveis explicativas (Ortuzar e Willumsen, 1990).

2.3 Distribuição de viagens

Finalizada a modelação da geração de viagens que se iniciam ou terminam numa dada zona é necessário proceder-se à sua ligação para formar pares de viagens Origem-Destino (M_{ij}). Deste modo, é necessário aplicar os modelos de distribuição de viagens que consistem na caracterização do processo de escolha de Destino para cada zona de Origem (Figura II.3).

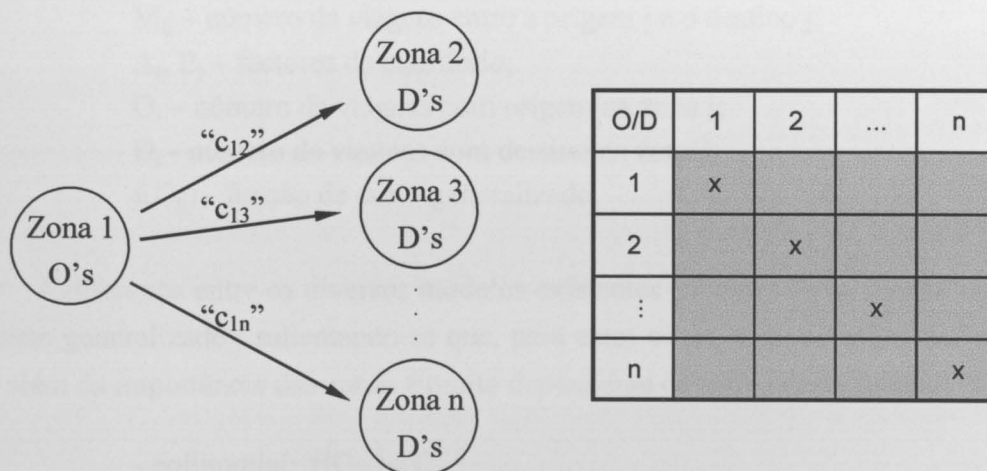


Figura II.3 - Distribuição de viagens por motivo

Será de referir que este passo do modelo de transportes conduz a um grande aumento dos dados a analisar. Por exemplo, uma área de estudo com 100 zonas irá ter 9 900 combinações possíveis (não se tendo em conta as viagens intra-zonas), geralmente separadas por motivo de viagem.

A metodologia mais usual na distribuição de viagens é a utilização do Modelo de Gravidade (*Gravity Model*), por analogia com a Física Newtoniana (APAS, 1996):

“A força gravitacional de atracção entre duas massas é directamente proporcional às massas e inversamente proporcional ao seu afastamento”.

O modelo de distribuição utiliza as viagens produzidas numa zona e distribui-as para as outras proporcionalmente às respectivas “atractividades” ou importâncias e inversamente proporcional ao “custo” da deslocação (C_{ij}). Este efeito do “custo” é geralmente encontrado através de um processo de calibração que procura a aproximação da distribuição entre viagens modeladas e observadas, geralmente obtidas a partir de inquéritos realizados.

Assim, a equação básica de um Modelo de Gravidade pode ser representada pela seguinte expressão:

$$M_{ij} = A_i \cdot O_i \cdot B_j \cdot D_j \cdot f(C_{ij}) \dots\dots\dots (II.5)$$

com

M_{ij} – número de viagens entre a origem i e o destino j ;
 A_i, B_j – factores de equilíbrio;
 O_i – número de viagens com origem na zona i ;
 D_j - número de viagens com destino na zona j ;
 $f(C_{ij})$ - função de custo generalizado.

A diferença entre os diversos modelos existentes encontra-se na função utilizada do custo generalizado, salientando-se que, para estes casos, a distribuição das viagens para além da importância das zonas é muito dependente da forma desta função:

$$\text{- polinomial: } f(C_{ij}) = C_{ij}^{-n} \dots\dots\dots (II.6)$$

$$\text{- exponencial: } f(C_{ij}) = e^{-\beta \cdot C_{ij}} \dots\dots\dots (II.7)$$

$$\text{- combinação das anteriores } f(C_{ij}) = C_{ij}^{-n} \cdot e^{-\beta \cdot C_{ij}} \dots\dots\dots (II.8)$$

com

n, β - parâmetros de calibração.

Existem ainda modelos onde a distribuição de viagens não depende apenas do “custo”, introduzindo o conceito de “Oportunidade” (*Opportunities*), que utiliza a noção de acessibilidade relativa, ou seja, assume que a probabilidade de uma dada viagem ter como destino a zona j é reduzida pelo número de destinos mais “perto” que j . Nestes modelos define-se então que a probabilidade de um utilizador escolher o destino j é

proporcional à diferença entre a probabilidade de não escolher um destino mais próximo e a probabilidade de escolher todos destinos até j , inclusive (Wills, 1986).

2.4 Repartição modal

Após a determinação dos pares de viagens O-D segue-se o passo da repartição modal que consiste em repartir as mesmas pelos diferentes modos de transporte considerados (automóvel, transportes públicos, a pé, ...), através da comparação da atractividade das viagens pelos diferentes modos, para determinar o seu uso.

A metodologia mais comum na repartição modal é a utilização do Modelo *Logit* (APAS, 1996). Resumidamente, este modelo tenta prever qual o modo escolhido com base no “custo” de cada um na deslocação entre uma dada origem e um dado destino. Este custo representa uma combinação dos tempos de viagem, do custo de operação e da conveniência da utilização para o modo em causa, podendo conter outros factores, tais como a privacidade e a comodidade. A combinação destes factores é utilizada como uma constante na análise, determinada através de um processo de calibração que aproxima o modelo aos padrões observados.

Uma vez encontrados os “custos” para os vários modos de transporte entre cada par Origem-Destino, define-se que a “utilidade” (*utility*) de cada um varia inversamente ao “custo”, sendo as viagens com base nas probabilidades de um dado modo ser seleccionado, calculadas por:

$$P_a = \frac{e^{U_a}}{\sum_{a=1}^T e^{U_a}} \dots\dots\dots (II.9)$$

com

P_a – probabilidade do modo de transporte a ser escolhido;

U_a – utilidade associada ao modo de transporte a ;

$$U_a = -\beta \cdot C_a \dots\dots\dots (III.10)$$

β – parâmetro de calibração;

C_a – custo associado ao modo de transporte a ;

T – número de modos de transporte.

A limitação do método *Logit* encontra-se no pressuposto dos custos serem constantes, pelo que foram desenvolvidos modelos denominados por *Probit*, nos quais os coeficientes nas funções de custo são aleatórios, sendo geralmente utilizada a distribuição normal (Ortuzar e Willumsen, 1990). Realce-se, no entanto, que quando se têm casos com mais do que três alternativas de transporte a especificação matemática destes modelos apresenta-se bastante difícil, pelo que não têm sido muito utilizados (APAS, 1996).

2.5 Afectação de tráfego

Após a definição da Matriz O-D por modos de transportes e da codificação das infra-estruturas de transportes, pode ser realizado o último passo da modelação de transportes, ou seja, a afectação de tráfego aos arcos que, de uma forma sucinta, se pode descrever como sendo o processo através do qual as decisões dos utilizadores de um sistema de transportes na escolha de percurso são modeladas.

O objectivo principal de um modelo de afectação de tráfego é o de prever o efeitos das decisões dos utilizadores, face a uma dada procura, tentando reproduzir o nível de desempenho da rede com base em modelos de simulação (Figura II.4), designadamente:

- obter estimativas de volumes de tráfego, de velocidades e de atrasos;
- obter estimativas de variáveis agregadas da rede (velocidade média de operação, atraso total, emissões de gases, consumos de combustível,...);
- estimar tempos de viagens entre zonas;
- identificar arcos congestionados;
- identificar percursos entre pares de zonas;
- analisar pares de zonas que utilizam um dado arco ou percurso.

Será de referir que a estrutura é um importante elemento do modelo de afectação, principalmente no que concerne ao nível de detalhe da modelação, ao tamanho das zonas, à densidade da rede e aos conectores de centróides, que têm uma influência directa não só na fiabilidade do modelo como também nos recursos necessários ao seu desenvolvimento.



Figura II.4 - Objectivo dos modelos de afectação

No Capítulo III do presente trabalho apresenta-se uma descrição mais pormenorizada deste tipo de modelos.

3. Gestão Integrada de Transportes

Geralmente os modelos de transporte são utilizados de uma forma estática, tanto no que se refere à procura como à oferta. As estratégias de optimização de redes de transportes são assim realizadas com base nos fluxos de tráfego resultantes dos padrões de deslocações actuais afectados à rede existente.

Estes dois processos, nomeadamente a modelação e a optimização, são realizados separadamente, e os resultados de um servem de dados de base ao outro (Figura II.5). No entanto, Allsop (Allsop, 1974) tinha já evidenciado a instabilidade desta abordagem, uma vez que os utilizadores de uma rede reagirão a uma qualquer modificação da mesma, o que implica um novo padrão de deslocações, podendo concluir-se que existe uma interacção entre a modelação e as estratégias de optimização de redes.

Assim, esta interacção assume uma grande importância, principalmente nos sistemas de controlo e gestão de tráfego (Van Vuren e Van Vliet, 1992), tendo sido já desenvolvidos vários trabalhos de investigação neste domínio, referindo-se entre eles o Projecto MUSIC (MUSIC, 1995, 1998 e 1999).

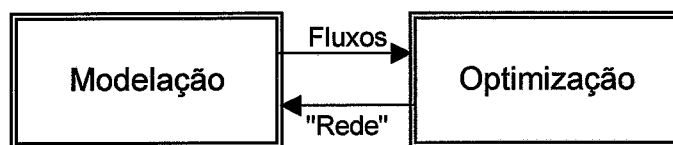


Figura II.5 - Interação entre afectação e optimização

Por outro lado e também face a esta interacção, no início dos anos 90, a possibilidade de integrar o Planeamento de Transportes com a Gestão do Tráfego colocou em posição de destaque a “Gestão Integrada de Transportes”, no sentido de operarem em conjunto com benefícios mútuos, servindo-se dos mesmos dados e impulsionando estratégias para uma melhor qualidade de todo o sistema de transportes.

Embora estes dois processos operem a prazos diferentes (médio/longo prazo *versus* tempo real), ambos têm como objectivo influenciar a geração de viagens, a escolha modal e a escolha de percursos entre as diferentes zonas de origem e de destino. Um esquema funcional entre planeamento de transportes e gestão de tráfego é apresentado na Figura II.6.

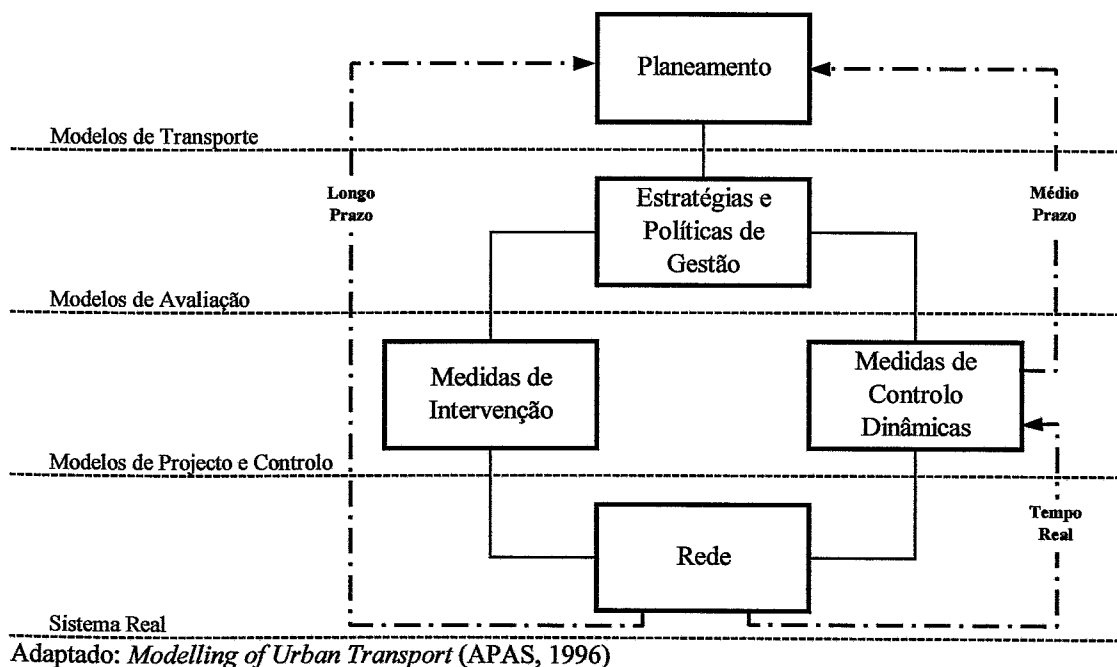


Figura II.6 - Gestão Integrada de Transportes

Na Gestão Integrada de Transportes, o planeamento de transportes está acima de todo o processo, definindo as políticas e as estratégias a testar e a implementar, em função do tipo de medida (estáticas, tais como as intervenções na infra-estrutura rodoviária, ou dinâmicas actuando ao nível da gestão e controlo de tráfego), que irão determinar o estado da rede de transportes. A cada um destes níveis estão associadas famílias de modelos que deverão ser integradas, assegurando-se a sua compatibilidade, quer no que concerne à estrutura (rede de referência e níveis de agregação idênticos) quer no que se refere às bases de dados utilizadas.

Deste processo podem ser gerados três tipos de retorno de informação:

- i) em tempo real com informação ao sistema de controlo de tráfego, designadamente os volumes de tráfego fornecidos pelos sensores que determinam o estado da rede;
- ii) entre o sistema de controlo e o planeamento, fornecendo informação detalhada, tais como os volumes para a actualização de Matrizes e as relações entre volumes e velocidades (funções de custo nos arcos);
- iii) envio da informação do estado da rede para o planeamento, permitindo que se retirem conclusões de quais os efeitos das intervenções preconizadas.

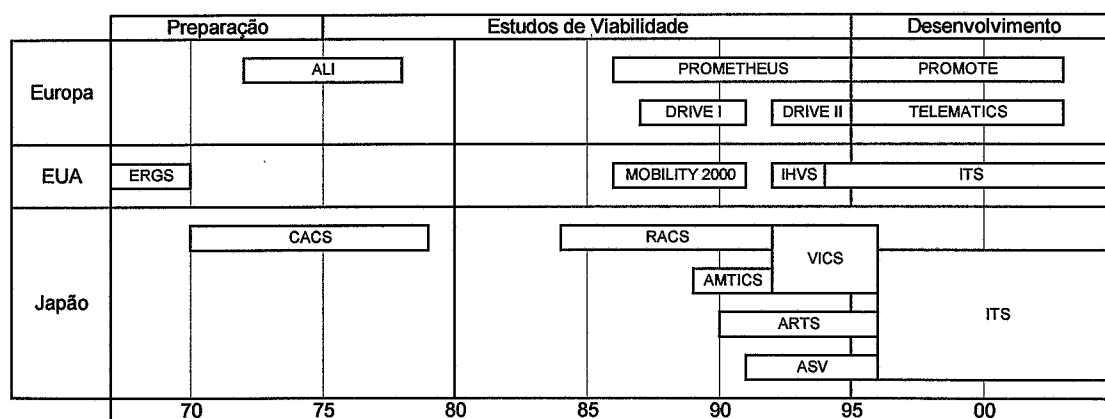
Nos últimos anos, têm sido desenvolvidos muitos casos de estudo e alguma aproximações à Gestão Integrada de Transportes, tal como o projecto 5T em Itália (APAS, 1996), embora ainda nenhum tenha sido implementado, o que se deve principalmente a problemas legais e à não normalização de interfaces técnicos.

Por último e ainda no presente âmbito, destacam-se os Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS – *Intelligent Transportation Systems*) ligados ao nível de retorno de informação em tempo real. Este conceito resultou da aplicação e integração das tecnologias dos sistemas de informação, comunicação, controlo e electrónica que permitiu a criação de vias de comunicação, veículos e utilizadores “mais inteligentes” (Figueiredo et al, 2002).

Nos Sistemas Inteligentes de Transporte, os modelos de afectação de tráfego desempenham um papel fundamental ao permitirem uma representação dinâmica do

sistema viário com vista a simular e, conseqüentemente, prever situações com base em dados concretos obtidos em tempo real.

Neste domínio, têm sido desenvolvidos a nível mundial vários projectos de investigação, estando-se actualmente na fase de desenvolvimento e aplicação dos Sistemas Inteligentes de Transporte, como se pode constatar na figura a seguir apresentada.



Fonte: *Sistemas Inteligentes de Transporte* (Figueiredo et al, 2002)

Figura II.7 - Evolução histórica dos Sistemas Inteligentes de Transporte

4. O Processo de Calibração/Validação

O objectivo primordial de um modelo de transportes é o de simular as condições reais de uma rede de transportes, dentro de limites que fixam o erro admissível, de modo a o mesmo ser passível de aplicação para a realização de previsões/avaliações de uma rede.

A convergência do modelo para a “realidade” constitui o objectivo da fase de calibração sendo então a sua aderência verificada na fase de validação, podendo-se então definir estas duas fases como (HMSO, 1991):

- i) Calibração: processo de correcção dos valores das variáveis do modelo responsáveis pela representação das condições de operação de uma rede

com o objectivo de as estimativas das medidas de desempenho calculadas pelo modelo reflectirem os valores reais;

- ii) Validação: processo de verificação das estimativas do modelo calibrado com o objectivo de aferir as suas capacidades de previsão, em situações distintas das utilizadas na fase de calibração, garantindo deste modo que as conclusões obtidas pelo modelo são aplicáveis ao sistema em estudo.

Deste modo, o desenvolvimento de um modelo, após a formulação do problema e clarificação dos objectivos, deve englobar basicamente quatro passos (Figura II.8):

- i) Construção: conceptualização do modelo, recolha de dados e codificação da rede, englobando-se ainda nesta fase a verificação da codificação;
- ii) Calibração: “ajustamento” dos valores das variáveis para que certos critérios de aderência à realidade sejam atingidos;
- iii) Validação: testes da capacidade de previsão do modelo através da adopção de critérios, com base em informação diferente da utilizada na fase de calibração, sendo a fase mais delicada no processo de desenvolvimento de um modelo e que obriga a frequentes re-análises das fases anteriores;
- iv) Aplicação: uma vez o modelo validado, segue-se o projecto de experiências e análises de resultados.

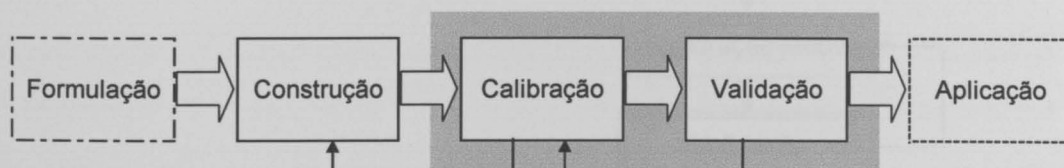


Figura II.8 - Desenvolvimento de um modelo

A fase de calibração envolve uma análise comparativa entre as medidas de desempenho do modelo e as do sistema real e o eventual ajustamento das variáveis responsáveis pelas condições operacionais, de modo a que os resultados reproduzam a realidade, dentro de um dado intervalo de erro fixado. É importante sublinhar que se a única forma de reproduzir a “realidade” for através da utilização de “truques” na definição dos valores das variáveis ou da utilização de procedimentos localizados durante a fase de calibração, então será muito pouco provável que o modelo possa realizar previsões válidas.

Usualmente a fase de validação concentra-se nos resultados finais do modelo de transportes (Barton Aschman Associates & Cambridge Systematics, 1997), tais como volumes de tráfego ou número de passageiros em transportes públicos (Figura II.9-a), sem que se realize uma verificação detalhada dos resultados finais de cada uma das componentes do modelo, tal como se preconiza no esquema apresentado na Figura II.9-b).

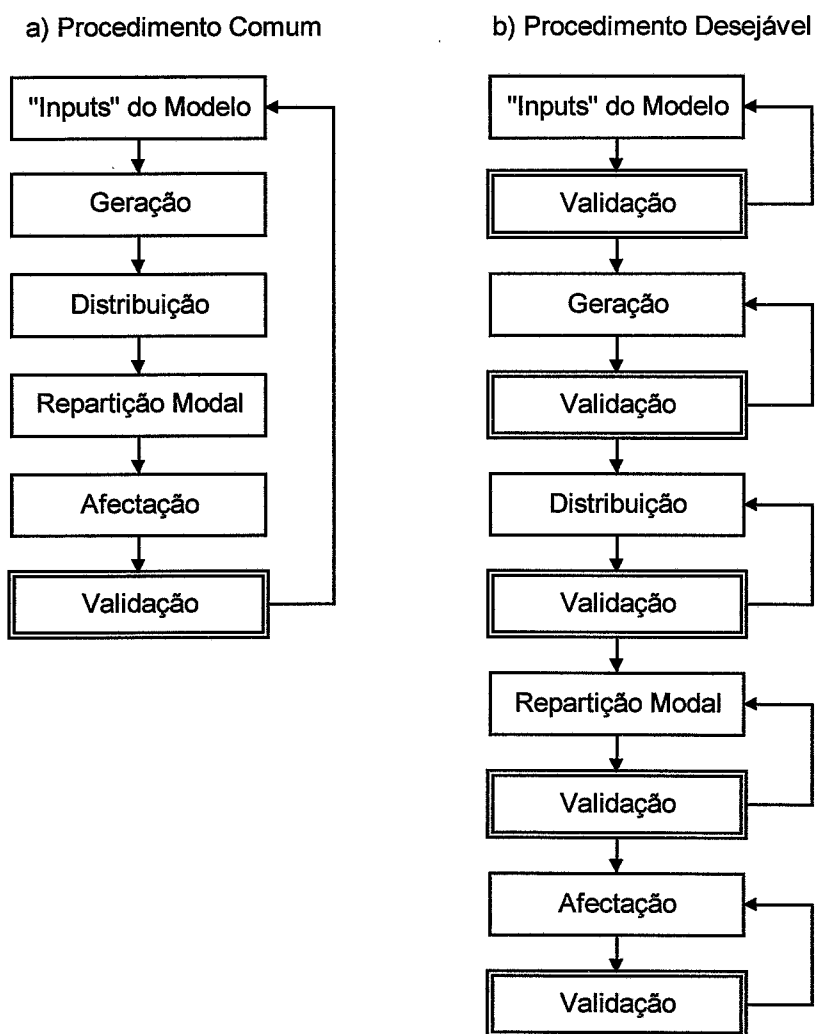


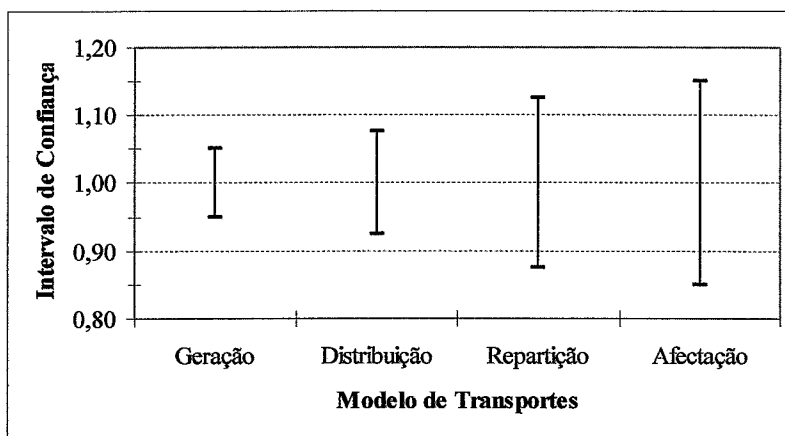
Figura II.9 - Processos de validação

Esta metodologia muito comum utilizada na calibração/validação de um modelo pode ser justificada pela disponibilidade dos dados existentes, uma vez que, na maior parte dos casos, os dados de que se dispõe apenas permitem a comparação dos resultados finais, porque geralmente existem restrições (recursos financeiros ou

humanos e prazos) que impossibilitam uma verificação detalhada de cada um dos passos do modelo. Nestes casos, refira-se que o sub-modelo de afectação, pelo facto de ser a última etapa da modelação de uma rede de transportes, os seus resultados devem ser utilizados para avaliar o desempenho de o Modelo de Transportes como um todo.

No entanto, a metodologia correcta, como anteriormente referido, deveria prever a calibração e respectiva validação de cada um dos sub-modelos (geração, distribuição, repartição e afectação), de forma a assegurar que cada uma das componentes reproduza razoavelmente as características de transporte observadas, sendo então realizada a validação dos resultados finais (Figura II.9-b)).

Esta validação final testa o efeito dos erros de modelação que resulta não só do conjunto dos erros inerentes a cada um dos passos do modelo de transporte como também da sua propagação. Na Figura II.10 pode visualizar-se um exemplo do possível efeito desta propagação, podendo verificar-se que, a cada passo que se avança no modelo de transportes, há um aumento do intervalo de confiança dos resultados esperados dos sub-modelos (Barton Aschman Associates & Cambridge Systematics, 1997).



Fonte: *Model Validation and Reasonableness Checking Manual* (Barton Aschman Associates & Cambridge Systematics, 1997)

Figura II.10 - Propagação dos erros de modelação

Esta propagação de erros também pode ser evidenciada no quadro seguinte, que apresenta a fiabilidade esperada de alguns dos resultados de um modelo de transportes, através dos limites do intervalo de confiança a 95% (Robbins, 1978).

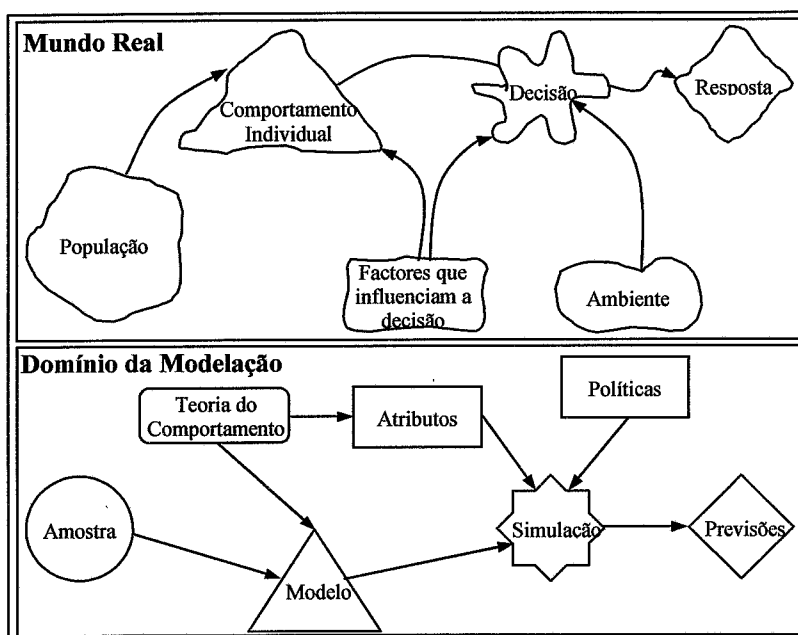
Parâmetros	Valores Típicos Diários	Limite do Intervalo de confiança a 95%
Geração por zona	2000 viagens	$\pm 50\%$
Movimentos intrazona	pequenos	Muito impreciso
Movimentos interzonas principais		
Total	40 000 viagens	$\pm 10\%$
Modo principal	24 000 viagens	$\pm 11\%$
Modo secundário	16 000 viagens	$\pm 12\%$
Movimentos interzonas secundários		
Total	15 000 viagens	$\pm 15\%$
Modo principal	12 000 viagens	$\pm 16\%$
Modo secundário	3 000 viagens	$\pm 26\%$
Volumes nos arcos		
Arco secundário	5 000 veículos	$> \pm 55\%$
Arco típico	10 000 veículos	$> \pm 39\%$
Arco importante	20 000 veículos	$\pm 27\%$
Arco principal	50 000 veículos	$\pm 17\%$
Arco de auto-estrada principal	80 000 veículos	$\pm 14\%$
Volume de passageiros em TP		
Arco rural típico	< 500 passageiros	Muito impreciso
Arco urbano típico	5 000 passageiros	$> \pm 46\%$
Arco urbano importante	10 000 passageiros	$> \pm 33\%$
Arco urbano principal	20 000 passageiros	$> \pm 23\%$

Fonte: *Mathematical modeling – the error of our ways* (Robbins, 1978)

Quadro II.1 – Fiabilidade estimada de alguns parâmetros da modelação

Pode constatar-se, pela análise dos limites do intervalo de confiança a 95%, que os resultados da afectação (volumes) tendem a ter um maior erro que os passos anteriores de um modelo de transportes (movimentos interzonas por modos de transporte, ou seja, as células da Matriz O-D), com excepção da geração. De facto, considerando o Transporte Individual como modo principal, enquanto que o número de viagens entre pares de zonas podem reflectir uma fiabilidade de $\pm 11\%$ a $\pm 16\%$, os fluxos dos arcos reflectem maiores oscilações (de $\pm 14\%$ a $\pm 55\%$, conforme o tipo de via).

É no entanto importante recordar que os erros são inerentes a todos os modelos, uma vez que os mesmos são representações do comportamento real do transporte em que as simplificações são inevitáveis (Figura II.11), para que os modelos sejam práticos e aplicáveis, pelo que, como já referido, mesmo que eles reproduzam adequadamente a “realidade” nunca estão isentos de erros.



Fonte: *Modelling Transport* (Ortúzar e Willumsen, 1990)

Figura II.11 - Modelação e simplificação

Assim, pode afirmar-se que existem factores intervenientes num sistema real que a teoria subjacente ao modelo ignora e, consequentemente, na aplicação de modelos não se pode ter qualquer controlo. Este facto implica, à partida, um certo erro e incerteza associado à aplicação de um dado modelo, o qual será acrescido com outros erros inerentes ao processo de modelação de uma rede de transportes.

As fontes dos erros resultantes do desenvolvimento dos modelos de transporte incluem (Ortúzar e Willumsen, 1990; HMSO, 1991; Barton-Aschman Associates & Cambridge Systematics Inc., 1997):

- erros de especificação devidos a uma estrutura imprópria do modelo, tais como a omissão de variáveis relevantes (Horowitz, 1981), a inclusão de variáveis irrelevantes (Tardiff, 1979), de relações incorrectas entre variáveis (Williams et al, 1982) e de pressupostos determinísticos *versus* a variabilidade dos processos de decisão;
- erros de transferência em que um modelo ou parâmetros desenvolvidos para um dado contexto ou ambiente são aplicados noutra, tanto no que se refere ao espaço como ao tempo;

- erros computacionais devidos ao facto de aos modelos estarem normalmente associados processos iterativos e para os quais a solução exacta não é encontrada face ao esforço actualmente computacional requerido; observe-se que actualmente este tipo de erro é mínimo, excepto para casos de redes muito congestionadas com graves problemas de equilíbrio entre a procura e a oferta (ESTRAUS, 1989);
- erros de agregação ou simplificação que - consequência da necessidade que os modelos têm em reduzir a complexidade do sistema - derivam da utilização da noção de “grupos”, tanto ao nível espacial como temporal, os quais podem conter (ou mesmo contêm) elementos com características heterogéneas;
- erros de medição inerentes aos processos de recolha de dados e resultantes de alguma falta de controlo de qualidade, sendo de observar que este tipo de erros deve ser distinguido da dificuldade associada de definição das variáveis que têm de ser observadas;
- erros de amostragem associados aos desvios introduzidos no processo de selecção do conjunto de observações da população e devidos principalmente ao facto de se ter de usar um conjunto finito de observações, ao qual se encontra ligada a dualidade recursos-fiabilidade da definição do número óptimo de observações¹;
- erros de previsão associados à estimação dos valores para as variáveis necessárias ao modelo;
- erros de codificação, ou seja os erros “puros”, devidos aos lapsos inerentes a qualquer tarefa de introdução de dados.

Como o objectivo final de um modelo é o de realizar previsões, uma importante decisão associada ao seu desenvolvimento é a de, tendo em atenção os tipos de erros inerentes à modelação de uma rede de transportes, encontrar/definir qual a combinação “óptima” para os objectivos pretendidos entre complexidade do modelo e a fiabilidade dos dados.

¹ Os erros de amostragem são aproximadamente inversamente proporcionais à raiz quadrada do número de observações, ou seja, para reduzir para metade este tipo de erros tem de se quadruplicar o tamanho da amostra (Daganzo, 1980)

Face a esta tomada de decisão é então importante distinguir dois conjuntos de erros:

- i) os que podem implicar, mesmo em modelos considerados “correctos”, a realização de previsões erradas, uma vez que não se tem qualquer controlo sobre as fontes de erro, designadamente as associadas ao modelo teórico;
- ii) os que fazem com que os modelos realizem previsões erradas, como resultado de imprecisões cometidas durante o desenvolvimento do modelo da rede de transportes a analisar.

Neste ponto refira-se que uma das grandes lacunas no desenvolvimento e utilização de modelos de transporte é não só a falta de esforço dedicada ao processo de calibração (Barton-Aschman Associates & Cambridge Systematics Inc., 1997) como de metodologias que envolvam a realização de testes à capacidade de previsão do modelo, designadamente na tentativa de compreender qual a resposta dos modelos às diversas fontes de erro face à dificuldade de os evitar (Easa, 2002).

Deste modo, justifica-se um maior esforço, não só na identificação e caracterização das fontes de erro que podem ser controladas no desenvolvimento de um modelo, ou seja, as associadas ao segundo conjunto atrás referido, como também na compreensão e análise do seu impacto na qualidade dos resultados finais de um modelo, de modo a que seja possível definir qual o grau de rigor na quantificação das variáveis indispensável para o “funcionamento” adequado dos modelos.

Com base nesta análise do impacto dos erros no desempenho dos modelos, será então possível estabelecer prioridades e recomendações como o objectivo de estabelecer prioridades na definição dos dados de entrada necessários a um modelo, com vista a uma optimização de recursos. Por outro lado, face aos erros cujo controlo é “nulo”, e em que apenas se tem alguma influência na decisão de qual o modelo “teórico” a adoptar, será também possível perceber qual a imprecisão de um modelo face a estes erros inerentes e, consequentemente, estabelecer critérios para os parâmetros de calibração/validação, normalmente associados à aplicação de modelos.

III. MODELOS DE AFECTAÇÃO DE TRÁFEGO

1. Caracterização dos Modelos de Afectação

1.1 Princípios da afectação

De forma a atingir o objectivo da afectação de tráfego é necessário conhecer-se o número total de veículos que “desejam” viajar entre cada origem i e cada destino j (elemento M_{ij} da matriz Origem/Destino), a que correspondem genericamente os três primeiros passos do modelo de transportes.

Por outro lado, também será necessário existir uma representação da rede rodoviária na forma de nós (intersecções) e do conjunto de arcos (vias) que os unem, aos quais se encontram associados atributos relativos à sua caracterização física e operacional.

A tarefa da afectação será então determinar os percursos da rede utilizados pelos diferentes veículos entre cada par de origem-destino, caracterizados pelo conjunto de arcos consecutivos utilizados. Esta tarefa permite ainda a estimativa dos fluxos de tráfego em cada um dos arcos que constituem a rede modelada.

Na maior parte dos modelos este princípio da afectação é baseado em dois conceitos que se encontram relacionados entre si e que permitem que o processo relativo à selecção de caminhos seja realizado, nomeadamente:

- percursos de “custo” mínimo;
- equilíbrio.

A escolha de caminhos numa rede rodoviária é um processo complexo, sendo geralmente assumido que o utilizador tenta minimizar o seu “custo” de viagem. No

entanto, verifica-se que condutores com a mesma viagem (mesma origem e destino) seleccionam percursos diferentes (*route-spreading* ou *multi-routeing*) devido ou a diferentes pesos nos factores que influenciam a escolha do percurso ou a diferentes graus de conhecimento ou de percepção acerca do estado da rede.

Vários estudos (APAS, 1996), realizados no sentido de identificar quais os factores que afectam o comportamento individual dos condutores, apontaram no entanto uma grande diversidade de factores como tendo efeito no processo de selecção de percursos, nomeadamente: a sinalização, o conhecimento da rede, o tempo de percurso esperado, a probabilidade esperada de ocorrência de filas de espera, a qualidade das vias, a idade e o sexo do condutor. No entanto, um estudo realizado por Outram e Thompson (1976), em que comparam as preferências declaradas pelos inquiridos com o seu desempenho real na selecção de percursos, concluem que as preferências reveladas eram muito pouco “respeitadas” e que a combinação do tempo e da distância era o que melhor explicava a escolha de caminhos.

Desta situação resulta que, habitualmente, os modelos de afectação utilizam uma função de custo para a selecção de trajectos correspondente a uma combinação linear das variáveis tempo e distância.

Por outro lado, os modelos ao utilizarem funções que reproduzem o efeito do volume sobre os tempos de percurso, ou seja, a velocidade num determinado arco depende do número de veículos que lá circulam, implica que o “custo” seja função do volume. Deste modo, há a necessidade de integrar no processo de selecção de percursos um conceito matemático que permita que uma solução de equilíbrio seja atingida, o qual foi introduzido por Wardrop (1952):

“Em condições de equilíbrio o tráfego em redes congestionadas distribui-se de modo que nenhum utilizador individual consiga reduzir os seus custos de deslocação através da alteração do seu percurso.”

No caso de todos os utilizadores da rede perceberem o seu “custo” da mesma maneira e terem um conhecimento absoluto da rede, então pode-se enunciar o chamado 1º Princípio de Wardrop, mais conhecido por Equilíbrio de Wardrop ou Equilíbrio Determinístico:

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

O pressuposto de comportamento idêntico por parte dos utilizadores da rede pode ser parcialmente contraposto ao se introduzir o conceito de “custo percebido” como uma variável aleatória com média igual ao “custo” e distribuída pela população de utilizadores - Equilíbrio Estocástico. Assim, com a introdução deste conceito obtém-se um meio que de algum modo simula as diferenças nos objectivos e/ou percepções de “custos” entre os diferentes condutores.

Para melhor ilustrar estas duas definições de equilíbrio considere-se o exemplo adaptado (Ortuzar e Willumsen, 1990) a seguir ilustrado:

Considere-se que a ligação entre duas zonas, A e B, pode ser realizada através de dois itinerários, I₁ e I₂, em que o primeiro é caracterizado, por um lado, pela sua uma menor capacidade, velocidade e comprimento ($Q_1 < Q_2$, $V_1 < V_2$, $L_1 < L_2$) e, por outro, pelo seu “custo” ligeiramente menor quando o volume de tráfego que circula é inferior à sua capacidade ($C_1 < C_2$ para $Q < Q_1$).

Assuma-se que num dado período existe uma procura, P, na deslocação da zona A para a B, superior à capacidade de I₁ mas inferior à oferecida pelos dois itinerários. Será natural que todos os condutores irão preferir a utilização do caminho de menor custo (“caminho mais curto”), ou seja, optar por I₁. No entanto tal não será possível uma vez que este itinerário irá ficar saturado à medida que se aproxima da sua capacidade, pelo que muitos condutores irão optar pelo itinerário alternativo I₂. Presumivelmente os condutores vão-se repartir pelos dois itinerários até que se atinja uma solução estável, ou seja, quando nenhum conseguir melhorar o seu “tempo de percurso” alterando a sua escolha (Equilíbrio de Wardrop). Neste caso a distribuição das viagens pelos dois itinerários é devida à selecção de modelos com restrições à capacidade.

Por outro lado, se a procura na deslocação de A para B tiver um valor inferior à capacidade de I_1 , poder-se-ia dizer que todos os condutores optariam por este itinerário. No entanto, nem todos pensam da mesma maneira pelo que alguns preferirão seguir por I_2 que, embora com um custo de utilização um pouco maior, permite no entanto uma maior velocidade. Estas diferenças de objectivos e/ou percepções podem levar à diversificação de escolha de percursos e este efeito pode ser modelado pelo elemento estocástico na escolha de caminhos.

Por último será de referir que, na realidade, o equilíbrio assim definido não é absoluto uma vez que poderá existir um percurso alternativo de menor “custo real”/“custo percebido” pelo qual se pode optar, mas que não é utilizado face ao desconhecimento ou a qualquer outro factor não incluído na determinação destes custos.

Deste modo, poder-se-á dizer que esta noção de equilíbrio, no estado actual do conhecimento, é uma idealização matemática que permite que se atinja uma solução. Assim, pode-se afirmar que o conceito de caminho de “custo” mínimo introduz à partida “erros” uma vez que, por um lado, é necessário quantificar os “custos” e, por outro, na realidade, existe uma diversidade de percepções dos mesmos e/ou objectivos dos utilizadores.

1.2 Classificação dos modelos

Os modelos de afectação de tráfego são muito variados podendo ser classificados segundo um certo número de atributos, tanto no que diz respeito à simulação do tráfego como à escolha de caminhos.

No que se refere à simulação do tráfego os modelos podem ser classificados de acordo com os seguintes atributos:

- sem ou com restrições de capacidade;
- estáticos ou dinâmicos;
- microscópicos ou macroscópicos;
- determinísticos ou estocásticos;

- analíticos ou por simulação.

Será ainda de referir que nesta classificação ainda se pode introduzir uma outra dimensão que tem a ver com a escala de aplicação, podendo esta representar por exemplo o estudo de redes (urbanas ou interurbanas), de segmentos de vias ou de intersecções isoladas.

A primeira classificação, sem ou com restrições de capacidade, reflecte o cálculo dos tempos de viagem, nomeadamente se as velocidades ao longo dos arcos bem como os atrasos nas intersecções são independentes do tráfego ou se, pelo contrário, os efeitos devidos ao carregamento da rede são considerados.

Nos modelos estáticos assume-se que a procura é constante ao longo do período temporal em análise enquanto que os modelos dinâmicos permitem a variação da procura. Estes últimos ainda se podem classificar como contínuos, nos quais o estado do tráfego muda continuamente ao longo do tempo, ou como discretos, em que as mudanças de estado do sistema ocorrem de uma forma descontínua a intervalos de tempo discretos.

Ao nível de detalhe os modelos podem ser caracterizados como microscópicos, nos quais é identificado o movimento de cada veículo individual inserido numa corrente de tráfego através das suas características (por exemplo o tipo de veículo, a velocidade, o destino), para além de uma descrição detalhada do comportamento de condução (*car-following behaviour*, *lane-change behaviour*). Dentro deste tipo de modelos ainda se podem distinguir os sub-microscópicos que permitem ainda descrever o comportamento no controlo do veículo (por exemplo a engrenagem de velocidades ou a travagem). Os modelos macroscópicos simulam as correntes de tráfego como um fluido contínuo, representando as variáveis de tráfego valores médios agregados ao longo de um ciclo (velocidades médias, densidades, filas de espera médias, etc.). Existem ainda modelos macroscópicos com capacidade de considerar variações dentro do ciclo os quais são denominados por mesoscópicos.

No que se refere à descrição das variáveis de funcionamento que caracterizam as condições operacionais de uma rede (velocidades, intervalos críticos, etc.) os modelos determinísticos consideram-nas constantes enquanto que os estocásticos podem reflectir a natureza aleatória e probabilística das mesmas.

Por último, no que concerne ao modo de operação dos modelos, podem-se distinguir os matemáticos em que as relações entre as diversas variáveis do sistema são definidas analiticamente por um conjunto de equações e os que são caracterizadas pelo recurso à simulação. De uma forma geral os métodos analíticos estão associados com os modelos macroscópicos e os baseados em simulação ligados aos microscópicos.

Relativamente à escolha de caminhos os modelos podem ser distinguidos de acordo com os seguintes atributos:

- determinísticos ou estocásticos;
- equilíbrio do utilizador ou do sistema.

Os métodos determinísticos assumem que todos os utilizadores têm a mesma percepção dos custos de viagem enquanto que os métodos estocásticos permitem diferentes percepções, geralmente através da associação de uma distribuição de custos aos arcos.

As duas diferentes definições de equilíbrio reflectem a optimização do processo de afectação, em que no equilíbrio do utilizador o objectivo é minimizar o custo de cada utilizador (aplicação do Equilíbrio Determinístico ou Estocástico) e no equilíbrio de sistema o objectivo é o de prever a distribuição das viagens de modo a que o custo total na rede seja minimizado. Esta segunda definição de equilíbrio é denominada por 2º Princípio de Wardrop (Wardrop, 1952):

“Em condições de equilíbrio o tráfego em redes congestionadas distribui-se de modo a que o custo médio (ou total) seja minimizado.”

Será de referir que esta última abordagem não é em geral aceite visto que num sistema real tal não acontece, isto é, para ser admissível seria necessário a existência de uma cooperação entre os diferentes utilizadores. No entanto, a mesma é referida uma vez que numa estratégia de optimização da rede, através da utilização de, por exemplo, “Guiamento de Condutores” (*Route Guidance*) dispõe-se de um sistema capaz de controlar, em certo grau, a selecção de percursos de forma a introduzir alguma “cooperação” entre os utilizadores e, conseqüentemente, esta optimização poderia ser aplicada.

Da combinação de todos estes atributos, quando compatíveis, os modelos de afectação podem ser separados por famílias. Uma classificação muito comum consiste na divisão em 3 famílias principais (Papageorgiou, 1997), resultante da combinação dos modelos de simulação e de afectação no que concerne ao detalhe, e que se apresenta no quadro seguinte, onde se citam também alguns dos principais modelos de tráfego desenvolvidos nos últimos anos.

Classificação	Modelo de Simulação			Modelo de Afectação	Exemplos
		→	←		
Micro	Micro	+		Micro	INTEGRATION NETSIM CORSIM
Meso	Macro	+		Micro	CONTRAM DYNASMART NETSTREAM
Macro	Macro	+		Macro	METANET STRADA "SATURN"

Fonte: *Short course on Dynamic Traffic flow modeling and control* (Papageorgiu, 1997)

Quadro III.1 - Classificação dos modelos quanto ao detalhe

Poder-se-ia dizer que o modelo "ideal" seria um modelo com restrições à capacidade, representando o tempo de uma forma contínua, caracterizando o tráfego microscopicamente com variáveis estocásticas, passível de resolução analítica e aplicando o equilíbrio estocástico do utilizador, na medida que combinava as melhores técnicas e poderia ser utilizado em todas as circunstâncias, tanto no que se refere à oferta como à procura, mas, presentemente, tal modelo ainda não se encontra disponível (Hoogendoorn et al, 2001; EC, 2000). Por outro lado, um modelo deste tipo também obrigaria a um enorme esforço na sua aplicação, nomeadamente na sua construção e calibração/validação, face ao número de variáveis envolvidas, bem como a um elevado esforço computacional.

Deste modo resulta que a decisão de selecção do modelo, para além da disponibilidade do modelo bem como de recursos, também depende do tipo de rede, da procura e dos objectivos.

2. Métodos de Afectação de Tráfego

2.1 Preâmbulo

Para cumprir o objectivo da afectação, ou seja, para proceder à afectação de uma matriz de viagens à rede rodoviária, o modelo necessita de estabelecer quais os percursos a utilizar entre cada zona para todas as outras. Assim, haverá a necessidade de definir *a priori* uma medida, inversamente proporcional ao objectivo da viagem, de comparação entre as várias alternativas de ligações entre cada par de zonas de forma a determinar o(s) “caminho(s) mais curto(s)”.

De um modo geral existem três opções para a estimação desta medida, nomeadamente:

- distância percorrida
- tempo despendido
- custo generalizado

As duas primeiras opções foram inicialmente utilizadas face à sua simplicidade de medição e previsão, tendo a primeira ainda a vantagem de não ser necessário qualquer conhecimento das condições de circulação.

Actualmente, a hipótese considerada é a de que a selecção dos caminhos é realizada de forma a minimizar uma combinação do tempo e da distância, sendo ainda possível incorporar os efeitos de custos adicionais, tais como portagens. Deste modo, pode-se definir uma expressão simplificada de custo generalizado como uma combinação linear pesada do tempo e da distância, sendo então o custo em percorrer um arco k dado por:

$$C_k = a \cdot T_k + b \cdot D_k + P \dots\dots\dots (III.1)$$

com

- a - coeficiente de custo associado ao valor do tempo;
- T_k - tempo de percurso correspondente ao arco k ;
- b - coeficiente de custo associado a à distância percorrida;
- D_k - comprimento do arco k ;
- P - custo adicional.

Os coeficientes definidos não devem ser interpretados como um custo “real”, isto é, representando os valores médios reais do tempo de um utilizador e das despesas do veículo em percorrer uma distância, mas sim o custo percebido ou “comportamental”, ou seja, como os condutores ponderam o tempo e distância para a sua selecção de caminhos. Assim, e por exemplo, se o coeficiente associado ao tempo for superior ao da distância, está-se a admitir/fixar que os utilizadores estarão dispostos a percorrer uma maior distância se tal se traduzir num menor tempo de percurso.

Com base nestes custos associados aos arcos é então possível passar-se ao processo de determinação dos “caminhos mais curtos”, essencial para a afectação, no qual são construídas as árvores de arcos consecutivos sendo o custo de percurso igual ao somatório dos custos dos arcos que constituem o caminho.

2.2 Principais técnicas de selecção de caminhos

2.2.1 “Tudo ou Nada”

O método mais simples de aplicar na escolha de caminhos é o da afectação “Tudo ou Nada” que, como a própria denominação o reflecte, consiste na afectação de todas as viagens entre pares Origem-Destino aos respectivos “caminhos mais curtos”.

A aplicação deste método pressupõe que:

- i) a rede não se encontra congestionada (modelo sem restrições de capacidade);
- ii) todos os utilizadores da rede percebem e pesam os factores na escolha de caminhos de igual forma.

Deste modo, pode-se afirmar que os custos dos arcos são fixos e que qualquer condutor que pretende deslocar-se da origem A para o destino B escolhe o mesmo percurso pelo que todas as viagens são atribuídas ao “caminho mais curto”.

Embora actualmente a aplicação e a atractividade deste método seja praticamente nula, o mesmo pode-se considerar útil, face à sua simplicidade e eficiência, para a modelação de uma rede dispersa e não congestionada em que existem poucas alternativas de trajecto e com custos muito diferentes entre pares de zonas. A sua aplicação é também interessante em processos de identificação das “linhas de desejo” correspondentes aos trajectos escolhidos pelos utilizadores de uma rede quando não existe nenhum condicionamento resultante do carregamento das redes.

Por último, ainda se poderá dizer que a utilização desta técnica é bastante eficaz no teste das condições de modelação de uma qualquer rede. De facto, ao aplicar uma afectação “Tudo ou Nada” facilmente se pode verificar a conectividade da rede uma vez que é possível confrontar o caminho mais curto entre pares de zonas determinado pelo modelo com o percurso “lógico” tendo por base o conhecimento da rede.

2.2.2 Métodos Estocásticos

Nos modelos de afectação os métodos estocásticos introduzem o conceito de custo percebido caracterizado por uma distribuição contínua, tentando representar esta distribuição as variações existentes entre utilizadores de uma rede rodoviária na escolha de caminhos devidas:

- i) às diferentes percepções e/ou objectivos;
- ii) ao desigual conhecimento de funcionamento da rede.

Assim, ao se admitirem oscilações de custos nos arcos é possível a selecção de percursos alternativos ao “caminho mais curto”, tentando de alguma forma representar a selecção de outros percursos que, para alguns utilizadores, são mais “atractivos”.

Para a aplicação dos métodos estocásticos puros é necessário que não existam restrições à capacidade uma vez que estes têm como pressuposto que o custo percebido em cada arco é independente do fluxo nesse mesmo arco.

Vários métodos têm sido propostos para introduzir esta variabilidade de custos podendo ser divididos nos baseados em simulação, sendo os mais conhecidos devidos a Burrell (1968) e Sheffi and Powell (1981), e nos matemáticos, dos quais se destaca o método de Dial (1971).

As técnicas de afectação baseadas em simulação utilizam o Método de Monte Carlo para gerar para cada veículo ou grupo de veículos um conjunto de custos aleatórios. Para esta distribuição de custos associada a cada arco associa-se uma média igual ao “custo generalizado real” (Figura III.1). Com base nestes custos é determinado o respectivo caminho mínimo para o(s) veículo(s) e o(s) mesmo(s) são carregado(s) nos arcos que constituem o caminho.

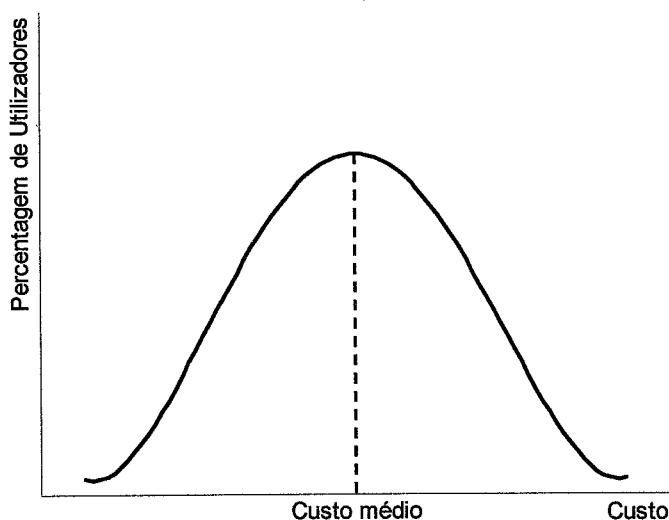


Figura III.1 - Distribuição dos custos percebidos no arco

Os vários métodos estocásticos baseados em processos de simulação diferem entre si nas leis fixadas para a distribuição de custos e, conseqüentemente, na sua forma, sendo que, por exemplo, o método desenvolvido por Burrell utiliza a distribuição uniforme, enquanto que o de Sheffi and Powell utiliza uma distribuição normal.

Será de realçar que qualquer que seja a distribuição assumida haverá que fixar e calibrar o parâmetro da dispersão dos custos percebidos e que quanto maior for este valor maior será o leque de percursos seleccionados.

Os métodos estocásticos matemáticos ou numéricos, também denominados por proporcionais, utilizam funções que relacionam a repartição do tráfego entre os percursos alternativos com os respectivos custos.

O método STOCH desenvolvido por Dial (1971) utiliza uma formulação do tipo *Logit*, em que a repartição de tráfego é estabelecida em função dos custos de todos os percursos alternativos, sendo definida por:

$$p_k = \frac{e^{-\theta \cdot c_k}}{\sum_i e^{-\theta \cdot c_i}} \dots\dots\dots (III.2)$$

com

p_k – percentagem do tráfego afectado ao percurso $\underline{k}$;

c_k – custo do percurso $\underline{k}$

θ - parâmetro de controlo da dispersão.

Dentro destes métodos também existem formulações do tipo de *Probit*, podendo-se referir o método SAM proposto por Maher (1992) em que a repartição do tráfego é baseada numa função de distribuição normal padronizada (Φ), sendo a repartição, entre 2 percursos alternativos definida por:

$$p_1 = \Phi \left(\frac{c_2 - c_1}{\sqrt{\beta \cdot (c_1 + c_2)}} \right) \dots\dots\dots (III.3)$$

com

p_1 - percentagem do tráfego afectado ao percurso $\underline{1}$;

c_1, c_2 – custo dos percursos $\underline{1}$ e $\underline{2}$;

β - parâmetro de controlo da dispersão.

Os métodos estocásticos puros têm uma aplicabilidade limitada a redes não congestionadas e em que existem várias alternativas de ligação entre zonas, uma vez que são métodos que partem do pressuposto de que ao longo da rede não existem restrições à capacidade. O ponto forte destes métodos reside no facto de ser possível modelar o aspecto comportamental na selecção de caminhos, sendo no entanto introduzido um parâmetro de dispersão que será necessário estimar e calibrar.

2.2.3 Equilíbrio do Utilizador

Os modelos de afectação em que a selecção de caminhos é realizada aplicando o método do Equilíbrio do Utilizador (UE – *User Equilibrium*) são os mais utilizados e desenvolvidos. Tal é facilmente justificável pelo facto de ser um modelo matemático

compreensível, com uma função objectivo bem definida e com algoritmos eficientes que garantem uma solução final de equilíbrio.

Nestes modelos consegue-se uma dispersão de caminhos seleccionados entre pares de zonas, tal como nos métodos estocásticos, mas a diferença reside no facto de esta ser conseguida pelos efeitos da restrição à capacidade.

Este método consiste então em encontrar as condições de equilíbrio formalmente enunciada por Wardrop, que pode ser formulada por (Ortuzar e Willumsen, 1990):

$$\begin{cases} C_{pij} = C_{ij}^{min} & \forall M_{pij} > 0 \\ C_{pij} \geq C_{ij}^{min} & \forall M_{pij} = 0 \end{cases} \quad \forall p_{ij} \in R_{ij} \dots\dots\dots(III.4)$$

com

- C_{pij} – custo de qualquer percurso entre a origem i e o destino j ;

C_{ij}^{min} – custo mínimo entre a origem i e o destino j ;

M_{pij} – número de viagens no percurso p_{ij} entre a origem i e o destino j ;

p_{ij} – percurso entre a origem i e o destino j ;

R_{ij} – conjunto de todos percursos entre a origem i e o destino j .

Para a aplicação deste princípio é condição necessária que o efeito da restrição à capacidade seja incorporado, pelo que é necessário impor, para cada arco, que o tempo aí despendido (T_k) seja função do volume no arco (V_k) e, consequentemente, o custo generalizado em percorrer o arco será função do volume de tráfego que lá circula ($C_k(V_k)$).

Beckman e *al* (1956) demonstraram que o equilíbrio de Wardrop é atingido para os volumes nos arcos que minimizem o somatório das áreas sob as curvas definidas pela relação custo-volume ($C_k(V_k)$) em todos os arcos que constituem a rede, assegurando a conservação de volumes, ou seja, que o total de viagens entre cada par de zonas (M_{ij}) é repartida pelos caminhos que as ligam e que só se trabalha no espaço das soluções de interesse (caminhos utilizados) e a não negatividade. Assim, a chave do Equilíbrio do Utilizador pode ser expressa por:

minimizar $Z\{M_{pij}\} = \sum_k \int_0^{V_k} C_k(V_k) dV \dots\dots\dots(III.5)$

sujeito a

$\sum_p M_{pij} = M_{ij} \dots\dots\dots(III.6)$

e

$M_{pij} \geq 0 \dots\dots\dots(III.7)$

com

- Z – função objectivo;
- M_{pij} – viagens entre a origem i e o destino j que utilizam o percurso p;
- $C_k(V_k)$ – função custo-volume.

Existem vários métodos para encontrar esta solução de UE (Carvalho, 1996), designadamente o Algoritmo de Frank-Wolf (Frank and Wolfe, 1956), o Método das Médias Sucessivas (Sheffi e Powell, 1982) e o Algoritmo de Pressão Social (Wang, 1993). Sucintamente estes métodos utilizam algoritmos iterativos, em que os tempos de percurso são recalculados de acordo com os volumes de tráfego afectados, que aproximam o resultado final à solução de equilíbrio.

Os modelos de afectação aplicando o princípio de UE são computacionalmente eficientes, garantindo sempre a convergência do método a uma solução única e são passíveis de aplicação a qualquer tipo de rede no que se refere à sua dimensão. A sua forma matemática “simples” torna possível a incorporação de algumas extensões de forma a ir de encontro a algumas das principais críticas ao modelo, tais como a procura variável, múltiplas classes de utilizadores e a modelação de intersecções (APAS, 1996).

No entanto, a principal crítica a este modelo reside no pressuposto de que todos os utilizadores de uma rede rodoviária têm um perfeito e global conhecimento das condições de circulação e que se comportam de uma forma racional e idêntica.

Por último, será ainda de salientar que, embora a aplicação do modelo assegure que os custos e os volumes nos arcos sejam únicos e, consequentemente, também o são os custos entre pares de zonas na solução final, os percursos entre pares de zonas não o são, isto é, podem existir várias combinações das viagens entre pares Origem-Destino e

dos respectivos percursos que conduzem a uma mesma solução de custos e volumes (Ortuzar e Willumsen, 1990; APAS, 1996).

2.2.4 Equilíbrio Estocástico

A afectação utilizando o Equilíbrio Estocástico (SUE – *Stochastic User Equilibrium*) combina as técnicas dos modelos estocásticos puros com as do equilíbrio do utilizador ao integrar os efeitos da variabilidade dos custos com as restrições à capacidade na selecção de caminhos. Deste modo, o equilíbrio passa a ser definido por (Ortuzar e Willumsen, 1990):

“Cada utilizador selecciona o percurso com base no seu custo percebido mínimo, ou seja, sobre as condições de equilíbrio estocástico nenhum utilizador tem um percurso com um custo percebido menor e, conseqüentemente, todos se mantêm nos seus percursos actuais”

A diferença deste método para o anterior reside na possibilidade de os custos poderem ser fixados individualmente em vez de se usar a mesma definição de custos para todos os utilizadores. Assim, a aplicação deste método pressupõe que os custos percebidos nos arcos para além de serem considerados como variáveis aleatórias dependem ainda dos volumes nos arcos.

Os algoritmos utilizados para atingir uma solução SUE são geralmente uma extensão dos métodos iterativos utilizados para os métodos de UE, em que se introduz o procedimento estocástico na determinação dos custos. O algoritmo mais utilizado é o baseado no Método das Médias Sucessivas tendo Sheffi (1985) demonstrado que a convergência para uma solução SUE é atingida para um grande número de iterações (≥ 50) e que esta convergência é dependente não só do nível de congestionamento da rede como também do valor fixado para o parâmetro de dispersão.

Sheffi (1985) também demonstrou que para redes bastante congestionadas a solução UE é muito semelhante à solução SUE, com a vantagem de ao se aplicar o Equilíbrio do Utilizador a convergência ser mais rapidamente atingida, pelo que a aplicação do Equilíbrio Estocástico é apenas recomendado para redes em que o nível de congestionamento é baixo ou médio.

As grandes críticas a este método residem assim na “morosidade”² em se atingir a convergência e na dependência do resultado final tanto do número máximo de iterações fixado como do parâmetro de dispersão definido (Ortuzar e Willumsen, 1990; APAS, 1996).

3. Desenvolvimento de um Modelo

3.1 Enquadramento

O desenvolvimento de um modelo inicia-se pela tomada de decisões no que se refere à definição do nível de detalhe e consequente recolha e reunião de informação necessária para um bom desempenho do modelo. Após a formulação do problema e obtenção de todos os dados necessários é então possível proceder-se à codificação da rede, ou seja, o tratamento dos dados de forma a serem passíveis de interpretação de uma forma automática.

Esta tomada de decisão tendo em vista a rede a modelar poderá ser auxiliada tendo em atenção uma análise crítica às respostas ao conjunto das três questões a seguir enunciadas (HMSO, 1996 e 1991; FHWA, 1983):

A. Qual o objectivo do modelo?

Neste ponto e com base na(s) estratégia(s) a avaliar ou estudo(s) a realizar (novas infra-estruturas, sistemas de gestão e controle de tráfego, políticas de transporte, impactos ambientais, novos pólos geradores de tráfego, etc.) deverá ser definida a escala da rede (regional, corredor, urbana, etc.) bem como as infra-estruturas e os modos de transporte a analisar.

B. Qual o tipo de informação que está disponível ou é disponibilizável?

A disponibilidade de dados quer no que respeita ao funcionamento da rede (geométricos, gestão, controlo, serviços) quer os dados geográficos

² No estado actual do campo da informática pode-se afirmar que esta crítica perde alguma importância

e sócio-económicos para a caracterização da procura influenciam a construção do modelo.

C. Qual o tempo e recursos disponíveis?

A construção de um modelo a partir do “nada” de, por exemplo, uma área urbana de média dimensão pode demorar desde uma “pessoa × mês” até uma “pessoa × ano”, sendo muito dependente do tamanho e tipo de rede, dos dados existentes e dos recursos disponíveis.

Nesta análise também se deve ter sempre presente qual(is) o(s) programa(s) de cálculo automático disponíveis e possíveis de serem utilizados face aos objectivos fixados, bem como quais as especificações dos mesmos no que se refere aos dados necessários.

Após estas questões estarem perfeitamente clarificadas e decididas poder-se-á partir para o desenvolvimento do modelo que se inicia com a definição do zonamento e a selecção dos arcos e nós que constituirão a rede.

Será de salientar que a selecção da rede a modelar e o zonamento encontram-se intimamente ligados, uma vez que existe uma relação directa entre estes dois aspectos, sem esquecer os objectivos da afectação. Assim, os mesmos devem ser estabelecidos de forma a permitirem um dimensionamento eficiente para o objectivo final previamente fixado.

De facto, a dimensão das zonas afecta de uma forma clara e directa o número de viagens inter e intra-zonas, isto é, quanto maior for a zona maior é o número de viagens dentro da mesma que não serão consideradas pelo modelo e, consequentemente, não serão afectadas aos arcos. Assim, os volumes modelados são dependentes da dimensão das zonas, podendo-se afirmar que o número de arcos a incluir na rede modelada deve ser compatível com a dimensão considerada para as zonas.

Por outro lado, pode-se afirmar que a introdução do conceito de zonas associado ao de centróides introduz à partida uma distorção da realidade e, consequentemente, um erro de agregação/simplificação.

Uma vez definido o nível de detalhe do modelo dever-se-á proceder à codificação da rede de modo a ser possível o seu processamento e a sua análise com

recurso ao cálculo automático. A codificação embora muito dependente do programa de afectação a utilizar, consiste de uma forma geral na identificação dos nós e, conseqüentemente, dos arcos que constituem a rede seleccionada, bem como na definição dos seus atributos, tarefa esta indispensável para a simulação das condições operacionais de funcionamento da rede viária.

Observe-se que nesta tarefa embora os eventuais erros de especificação não possam ser evitados (por exemplo, o modelo apenas permitir a codificação de tempos fixos para os sinais luminosos quando na realidade existe micro-regulação) devem ser realizados todos os esforços no sentido de minimizar os erros de previsão (valores para as variáveis de funcionamento responsáveis pela caracterização das condições operacionais da rede).

Por último, e de modo a se atingir uma boa representação das condições de funcionamento de uma rede, é necessário e fundamental proceder-se a um detalhado processo de calibração, tentando corrigir os erros de codificação e minimizar os de previsão. Após a calibração de um modelo pode-se então proceder à validação do mesmo para se poder afirmar que se está perante um modelo com capacidade para a realização dos estudos previamente definidos.

3.2. Definição do zonamento

O primeiro passo para a construção de um modelo consiste no zonamento, ou seja, a definição do sistema de zonas, tarefa esta de grande importância uma vez que é a base para a representação das origens e destinos das viagens.

Como já referido (cf Capítulo II), as zonas são áreas geográficas que dividem a área de estudo em áreas mais pequenas e relativamente homogêneas quanto ao uso de solo e às actividades económicas existentes, tentando representar uma procura agregada semelhante de transporte.

A introdução do conceito de zona resulta da impossibilidade de representar cada habitação, cada lugar de emprego, lugar de comércio ou qualquer outra actividade geradora de viagens como um par isolado Origem-Destino. Assim, estas entidades são

agregadas em zonas após o qual são “comprimidas” num só nó denominado por centróide que concentra todas as origens e destinos de uma zona.

Usualmente e para simplificação, a área modelada é dividida em duas áreas, uma “interna” e outra “externa” diferenciadas pelo maior detalhe na caracterização da primeira. Estas áreas encontram-se geralmente separadas por uma fronteira (cordão) que terá que ser definido de modo a isolá-las de uma forma perfeitamente clara (HMSO, 1996). Esta fronteira deve ser localizada de modo a limitar completamente a área dos problemas a analisar bem como as zonas passíveis de serem afectadas pelas eventuais medidas a implementar, ou seja, a área “interna” deve conter todos os arcos da rede em que os impactos poderão ser significativos face ao(s) objectivo(s) previamente fixados.

A subdivisão da área a analisar é muito utilizada em redes urbanas em que os “centros urbanos” são isolados, constituindo a área “interna”, sendo a rede nesta zona modelada com grande detalhe, tanto na definição de um sistema de zonas mais fino (de menor dimensão) como na consideração de todas as vias. Deste modo, ao se caracterizarem todos os movimentos dota-se o modelo da capacidade de fornecer as melhores estimativas das viagens nesta área e, consequentemente, as condições de funcionamento mais próximas da realidade.

Na área “externa” a modelação é geralmente realizada tendo apenas em consideração as viagens associadas à área “interna”, ou seja, não só as viagens com origem ou destino em zonas da área “interna” como também as viagens entre zonas da área “externa” que utilizam a rede da área “interna”. Na modelação da área “externa” podem ser seguidos dois tipos de abordagem:

- i) as viagens externas são “carregadas” na rede nos locais de atravessamento do cordão;
- ii) definição de uma rede externa com menor detalhe, devendo esta rede ser seleccionada tendo fundamentalmente em atenção as principais vias que atravessam o cordão e a conectividade entre as mesmas (observe-se que com esta definição haverá que definir um segundo cordão exterior para as viagens “mais” exteriores serem carregadas).

A opção pela definição de uma rede externa, embora exija um maior esforço na modelação, é preferível à primeira visto que permite eventuais re-afecções das viagens nestas áreas. Observe-se que ao se utilizar a primeira técnica a informação relativa aos

extremos das viagens é “perdida”, devendo-se ter cuidados especiais no que se refere a percursos entre pares Origem-Destino que poderiam evitar a zona central.

A definição das zonas bem como a sua dimensão deve ser muito bem ponderada tendo em conta não só os objectivos do modelo bem como a rede em análise, visto o zonamento ser um factor crítico na determinação do realismo do modelo, como já referido, designadamente no que se refere às viagens inter e intra-zonas.

Genericamente as suas fronteiras devem ser fixadas tendo em atenção (HMSO, 1996; FHWA, 1983):

- fronteiras já definidas (actualização de modelos);
- fronteiras administrativas;
- fronteiras relativas a dados estatísticos já existentes (censos);
- barreiras naturais/artificiais (rios, ferrovias, auto-estradas, ...);
- áreas com usos de solo similares;
- áreas homogêneas quanto à sua caracterização sócio-económica;
- áreas com pontos claramente identificáveis de acesso à rede;
- áreas de influência das vias principais;
- localização das principais áreas de estacionamento;
- necessidade de cordões e de *screenlines*.

Relativamente ao tamanho das zonas, recomenda-se que o mesmo seja fixado de modo a gerar no mínimo 200 viagens inter-zonas por hora (conjunto das viagens de entrada e de saída de cada zona) detectadas nos cordões ou nas *screenlines* (HMSO, 1996). Como referência o número total de zonas para um modelo de tráfego urbano encontra-se geralmente compreendido entre 50 e 200 (HMSO, 1996).

No que se refere aos centróides, estes localizam-se geralmente no centro geográfico de cada zona, não sendo no entanto esta definição o elemento crítico na afectação. A sua ligação com a rede é que é de extrema importância uma vez que as mesmas têm influência na selecção dos percursos e nos volumes nos arcos, visto que é nestes pontos de ligação que as viagens com origem em cada zona “aparecem” e com destino em cada zona “desaparecem” (Easa, 1992).

Sempre que possível as ligações dos centróides à rede devem ser realizadas nos arcos com o nível de hierarquia mais baixo e/ou para os quais os resultados da afectação não são importantes, evitando-se efectuar ligações:

- a arcos em que existem observações;
- a intersecções importantes;
- que possam constituir um caminho alternativo.

Por vezes, quando o atrás referido não é possível de garantir, torna-se necessário a introdução de nós fictícios de forma a criar arcos “intermédios”, tal como se exemplifica na figura seguinte.

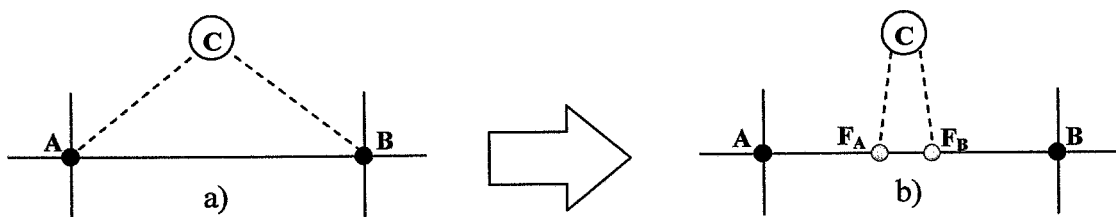


Figura III.2 - Exemplo de alteração de ligação a centróide

Note-se que caso se estivesse perante uma situação de ligações a centróides tal como esquematicamente representada na Figura III.2-a), originar-se-iam as seguintes situações:

- o volume de tráfego afectado ao arco $\overline{AB}$ não teria em conta as viagens com origem e com destino para a zona C;
- as intersecções localizadas nos nós $\underline{A}$ e $\underline{B}$ não teriam em conta a montante e a jusante os movimentos correspondentes às viagens com destino em C e às viagens com origem em C, respectivamente;
- os percursos realizados através do centróide, $\underline{A-C-B}$ ou $\underline{B-C-A}$, poderiam constituir caminhos alternativos às viagens que utilizam os arcos $\overline{AB}$ ou $\overline{BA}$, respectivamente.

Para resolver este problema dever-se-ia então adoptar uma solução tal como a exemplificada na Figura III.2-b), introduzindo-se dois nós fictícios (F_A e F_B) e atribuindo-se um “custo” às ligações ao centróide de forma a que não pudessem

constituir um percurso alternativo. Observe-se que se teria de ter sempre em atenção que não se deveriam realizar comparações entre volumes de tráfego observado e modelado no arco situado entre os dois nós fictícios ($\overline{F_A F_B}$).

Na Figura III.3 dá-se mais um exemplo de como a ligação aos centróides pode ter impacto na selecção de percursos e nos volumes modelados. Numa situação “típica” urbana as zonas devem ser ligadas às vias locais e preferencialmente a todos os lados de um quarteirão, uma vez que se ligado a apenas um lado, os volumes modelados podem ser sobre ou subestimados nas vias imediatamente adjacentes.

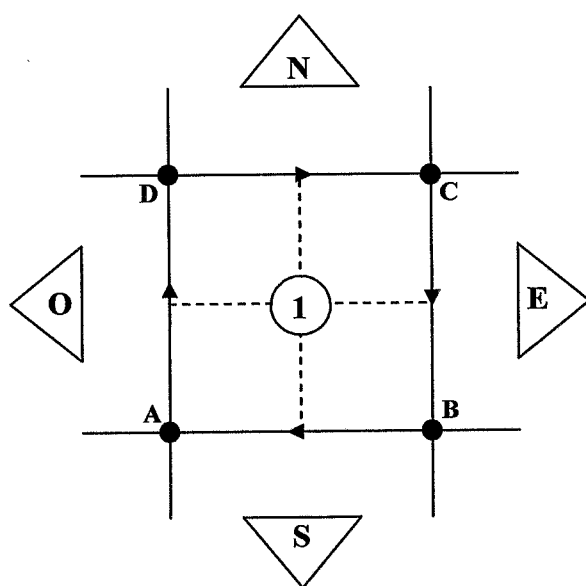


Figura III.3 - Exemplo do número de ligações a centróides

Suponha-se que no esquema apresentado a ligação à Zona 1 apenas se fazia pelo arco $\overline{AB}$. Neste caso, e por exemplo, as viagens provenientes de “Sudoeste”, que entrassem pelo nó A, para chegar a esta zona seriam obrigadas a percorrer os arcos $\overline{AD}$, $\overline{DC}$ e $\overline{CB}$, ou as viagens com origem nesta zona e com destino a “Sudeste”, se saíssem pelo nó B, teriam que percorrer os mesmos arcos, dando origem a uma sobrestimação dos volumes nestes arcos. Por outro lado, este acréscimo de distância poderia influenciar a selecção de caminhos na malha adjacente ou mesmo em toda a rede.

Deste modo, a definição das zonas e das suas ligações à rede, ou seja, dos centróides aos arcos ou nós, é de extrema importância uma vez que pode ter uma grande influência nos resultados do modelo, pelo que não só deve ser realizada e testada

cuidadosamente tendo em conta o referido bem como o conhecimento local do funcionamento da rede, de modo a minimizar os erros de agregação/simplificação associados a estes conceitos.

3.3 Definição da rede

Na sua forma mais simples uma rede não é mais que uma representação do sistema viário convertido em arcos e nós de modo a ser analisada com recurso a cálculo automático, para a previsão dos padrões de deslocações e, com base nestas, para o estudo e análise de certas variáveis de tráfego.

As redes devem ser codificadas com um nível de detalhe próprio para se atingir a melhor análise possível de acordo com os objectivos fixados, ou seja, e por exemplo, uma análise de uma rede regional não precisa de ser tão pormenorizada como um estudo de uma área urbana que requer a modelação de que quase todas as infra-estruturas viárias.

Exemplificando, e recorrendo-se a um exemplo real correspondente à rede da cidade do Porto, caso o objectivo de análise seja, por exemplo, o de analisar as viagens na rede principal (Figura III.4-a)) ou o de gestão e controle da rede urbana (Figura III.4-b)), a rede a modelar será completamente distinta, como se pode visualizar, uma vez que para cada caso dever-se-á otimizar os recursos na fase de processamento e codificação da informação de acordo com os objectivos fixados.

No entanto, será de observar que no exemplo apresentado na Figura III.4-a) o elevado nível de comportamento existente na selecção de percursos por parte dos utilizadores de uma rede viária (viagens que teoricamente deveriam utilizar a rede principal mas “fogem” para as vias secundárias em alternativa - *rat-running*) não será representável, devendo esta situação ser equacionada face aos objectivos da(s) análise(s).

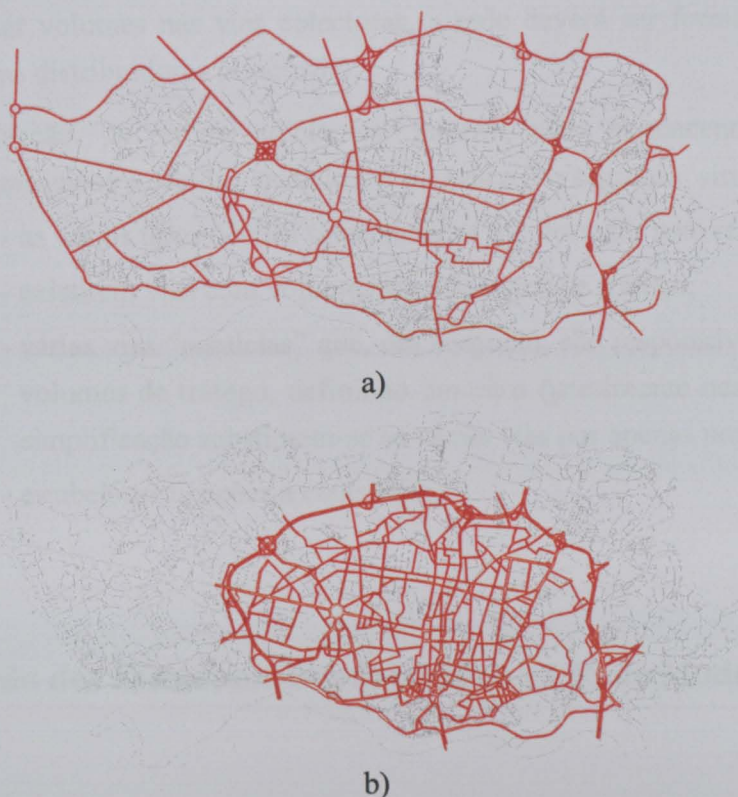


Figura III.4 - Rede da cidade do Porto seleccionada de acordo com os objectivos

Assim, a selecção das vias rodoviárias a incluir na rede também é uma tarefa de extrema importância no desenvolvimento de um modelo uma vez que representam a infra-estrutura de transporte do sistema viário a analisar. Para assegurar uma boa escolha da rede a modelar devem ser considerados os seguintes critérios (HMSO, 1996 e 1991; FHWA, 1983):

- i) Delimitação da área de estudo e eventual subdivisão em zona interior e exterior tendo presentes os objectivos;
- ii) Classificação e hierarquização da rede viária de acordo com as suas funções de acessibilidade/mobilidade (vias colectoras, distribuidoras principais, distribuidoras secundária e vias locais);
- iii) Selecção dos arcos assegurando que se incluem as vias com o nível de hierarquia imediatamente inferior àquele para o qual se pretendem bons

resultados de afectação³ (por exemplo, se o objectivo do estudo for o de obter volumes nas vias colectoras, a rede deverá ser formada por estas e pelas distribuidoras principais);

iv) Selecção de arcos adicionais mesmo não pertencendo aos níveis hierárquicos a estudar, quando em presença das seguintes situações:

- os vários tipos de vias seleccionadas não formam uma rede contínua;
- existirem vias com volumes significativos de tráfego;
- várias vias “paralelas” que, em conjunto, são responsáveis por grandes volumes de tráfego, definindo um eixo (geralmente nestes casos e por simplificação substituem-se as várias vias por apenas um eixo);
- estabelecer ligações a centróides.

4. Codificação dos Elementos Fundamentais da Rede Modelada

4.1 Identificação dos elementos

Após a selecção da rede a modelar será necessário identificar os nós que limitam a extremidade dos arcos. Estes podem ser definidos como os locais em que os veículos podem alterar a sua direcção, isto é, as intersecções ou os nós viários, ou onde o nível de serviço de uma infra-estrutura viária se altera significativamente, designadamente em secções onde existam discontinuidades da geometria das vias tal como o aumento/redução do número de vias e, consequentemente, do nível de serviço proporcionado pelo arco (HMSO, 1996).

Observe-se que os centróides também são tratados como nós, bem como as suas uniões com a rede nos locais que de uma forma lógica representam os pontos de acesso do tráfego gerado/atraído pela zona. Estes nós de ligação podem eventualmente ser fictícios, como anteriormente referido, de forma a evitar a ligação dos centróides a

³ Observe-se que a necessidade de incluir este nível hierárquico deve-se à necessidade de, preferencialmente, efectuar as ligações dos centróides a arcos pertencentes a um nível mais baixo da hierarquia de forma a ultrapassar alguns dos problemas já mencionados que estes conectores de centróides podem originar.

intersecções e/ou a arcos em que existam contagens para posterior calibração/validação do modelo.

Neste ponto e relativamente à codificação das intersecções, convém ainda referir os dois tipos de definição dos atributos presentes em quase todos os modelos, nomeadamente as denominadas caracterizações micro e macro. A grande diferença entre estas duas codificações reside fundamentalmente no nível de detalhe de descrição das intersecções viárias já que na codificação micro realiza-se uma descrição pormenorizada do modo de funcionamento da intersecção, enquanto que no segundo caso apenas é identificado o nó, resultando numa menor “complexidade” e dispêndio de recursos.

A decisão de selecção entre estas codificações depende do tipo de rede em análise, nomeadamente urbana, em que a capacidade da rede se encontra em geral condicionada pelas intersecções, e interurbana, para as quais a capacidade é função do tipo de via. Por outro lado, estas duas codificações também se encontram intimamente ligadas aos dois tipos de zonas definidas anteriormente, ou seja, às áreas internas e externas para as quais se associam codificações micro e macro, respectivamente.

Será ainda de observar que na representação micro os eventuais atrasos devidos às intersecções são directamente modelados nos nós, enquanto que na representação macro terão que ser integrados no processo de representação dos arcos localizados a montante.

Estas considerações têm um efeito directo na definição dos nós a incluir no modelo da rede pelo que, caso existam estes dois tipos de modelação, deve-se sempre dividir as duas zonas, micro e macro, antes de se realizar esta tarefa de inserção de nós, salientando a necessidade da existência de nós na fronteira destas zonas, de forma a delimitá-las de uma forma clara.

Por outro lado, face à “simplicidade” da codificação macro das intersecções, há que ter em atenção a configuração das mesmas de maneira a impedir não só que movimentos ilógicos se realizem, designadamente os movimentos de inversão de marcha, bem como movimentos proibidos.

Exemplificando, considere-se o entroncamento prioritário esquematicamente apresentado na Figura III.5 para o qual se deve ter em atenção o seguinte:

- uma codificação micro apenas necessitaria de um nó (Figura III.5-a)) visto que ao mesmo estaria associado de uma forma detalhada todo o funcionamento da intersecção, designadamente o tipo de controlo, os movimentos permitidos e respectivas capacidades entre outros atributos;
- uma codificação macro poderia também ser representada apenas com um nó (codificação simples), tal como na micro, devendo no entanto ter-se em atenção que, nesse caso, não são tidos em conta a capacidade dos movimentos de viragem e os consequentes atrasos da perda de prioridade, pelo que ao se codificar os respectivos arcos estes atrasos deverão ser afectados ao arco;
- de modo a contornar o problema atrás descrito, embora implique um esforço superior face à existência de um maior número de nós e arcos (11 nós e 10 arcos *versus* 4 nós e 3 arcos), a codificação do entroncamento poderia ser realizada tal como preconizado na Figura III.5-b), usualmente denominada por codificação expandida;
- observe-se que a separação em arcos de sentido único se deve ao facto de se tentar impedir que, por exemplo, caso a viragem à esquerda realizada através do percurso 11-9-4 implicasse um grande atraso, a mesma se realizasse através do percurso 11-9-5-7/8-6-4, caso os nós 7 e 8 fossem um único e não estivessem suficientemente “afastados” do nó 5.

Convém ainda referir que, por exemplo, caso no entroncamento fosse proibido o movimento de viragem à esquerda na via principal, tal implicaria sempre a codificação da intersecção com mais do que um nó (Figura III.6), realçando que no caso apresentado na Figura III.6-a) poderiam ocorrer problemas tal como anteriormente referidos, ou seja, a viragem à esquerda ser realizada através de um movimento de inversão no nó 1⁴.

⁴ Observe-se que em certos modelos pode-se atribuir penalidades aos movimentos não permitidos para que os mesmos tenham um “custo” proibitivo e, nestes casos, a codificação poderia ser realizada tal como preconizado na Figura III.5-a)).

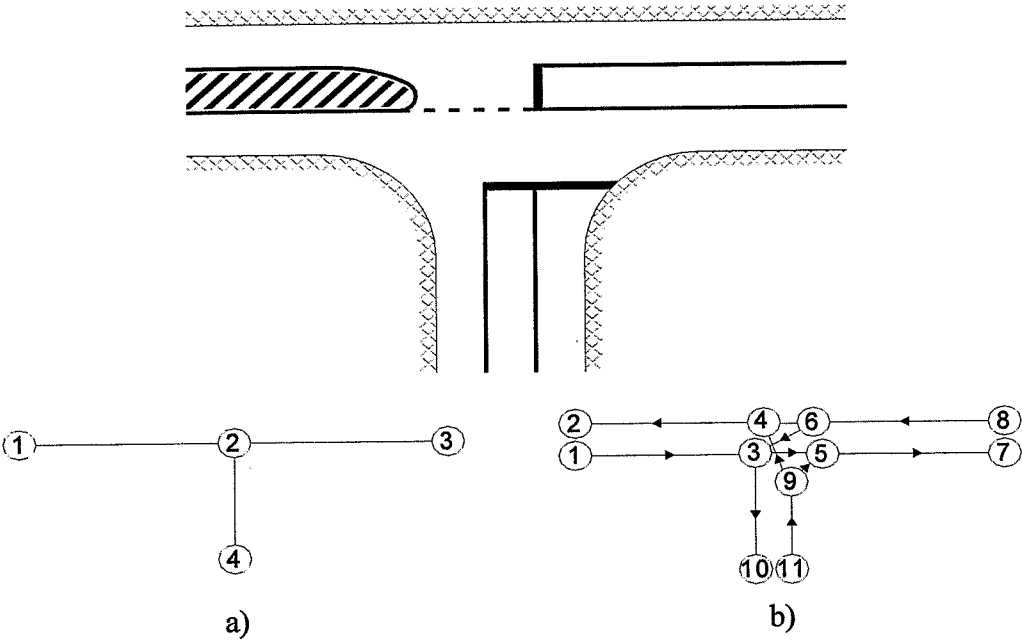


Figura III.5 – Exemplos de codificação de um entroncamento prioritário

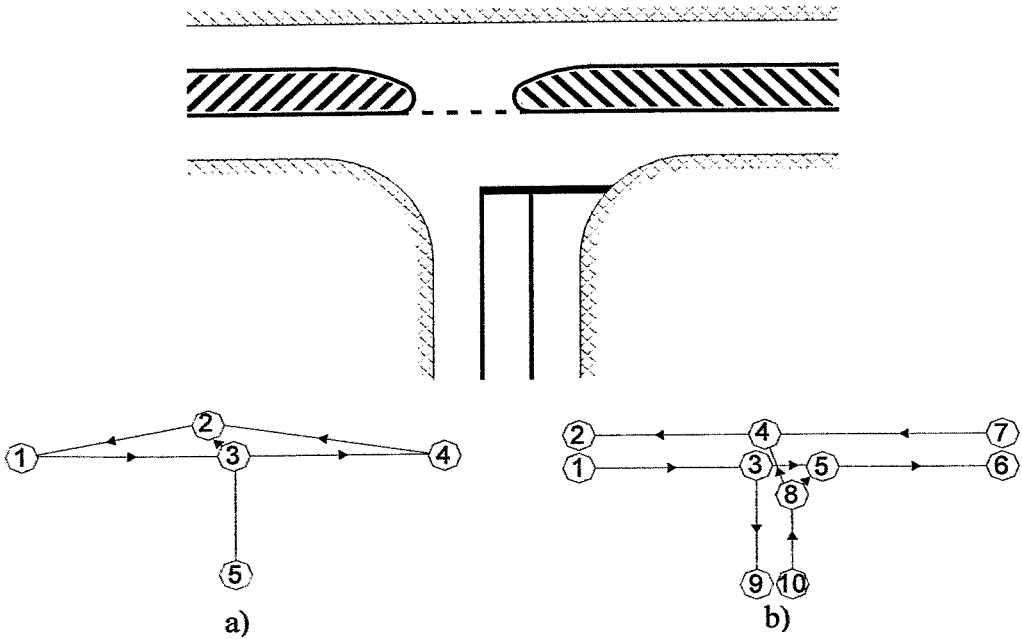


Figura III.6 - Exemplos de codificação de um entroncamento prioritário, com o movimento de viragem à esquerda na via principal proibido

Nas intersecções de nível ainda será de referir o caso específico das intersecções giratórias controladas por sinais luminosos em que, numa representação micro, é

necessário codificá-las como entroncamentos coordenados entre si e, por vezes, na representação macro também como uma série de entroncamentos (Figura III.7). Observe-se que neste tipo intersecções as inversões de sentido são permitidas.

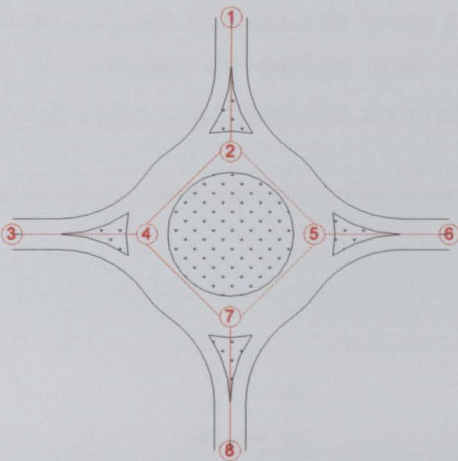


Figura III.7 - Exemplo de codificação de uma intersecção giratória

No caso de nós viários desnivelados (nós em trevo, em diamante, em trompette, etc), face à normal presença de volumes de tráfego elevados que os utilizam, uma representação mais detalhada é sempre recomendável, tal como se apresenta na Figura III.8, para o caso de um nó em trevo completo. Realce-se mais uma vez que, principalmente neste tipo de nós viários, a separação de sentidos deve ser sempre realizada para impedir movimentos ilógicos.

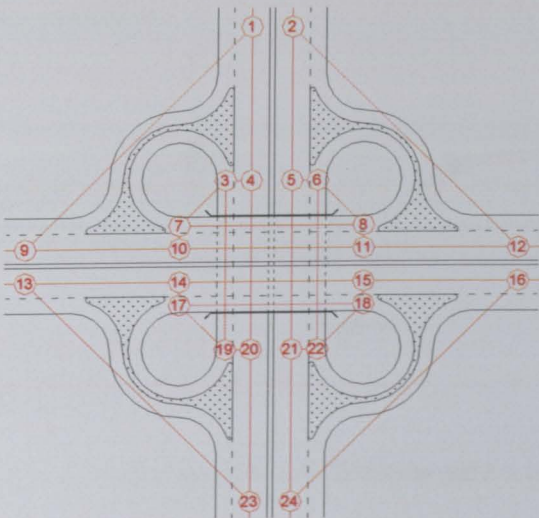


Figura III.8 - Exemplo de codificação de um nó em trevo

Por outro lado, convém ter em atenção os tipos de movimentos em presença tais como rampas de acesso/saída e entrecruzamentos (Easa, 1991). Deste modo, para codificar o nó em trevo, designadamente as secções de entrecruzamento, é recomendável a introdução de dois nós (fictícios) de forma a modelar correctamente os volumes, nomeadamente, os volumes de tráfego que se entrecruzam (q_1) e os movimentos em frente (q_2), tal como se pormenoriza no exemplo apresentado na figura seguinte.

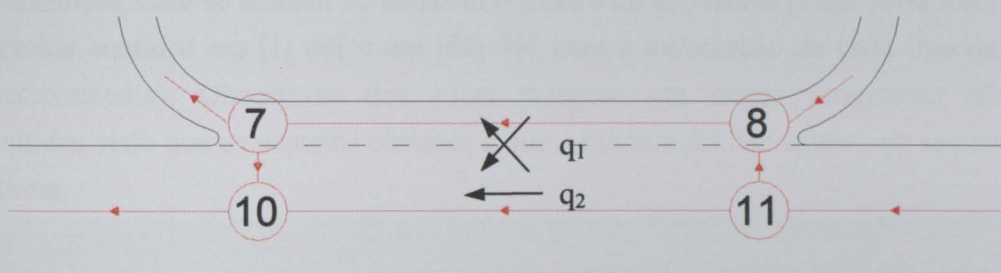


Figura III.9 - Exemplo de codificação de um entrecruzamento

Por último, e ainda no que se refere à inserção de nós na rede, também se aconselha a introdução de nós (fictícios) quando existe alguma sinuosidade das vias (Figura III.10), não só para que a representação gráfica da rede se assemelhe mais à realidade, facilitando uma verificação visual, como também permite a comparação de uma forma automática do comprimento dos arcos real com a distância calculada através das coordenadas dos nós extremos.

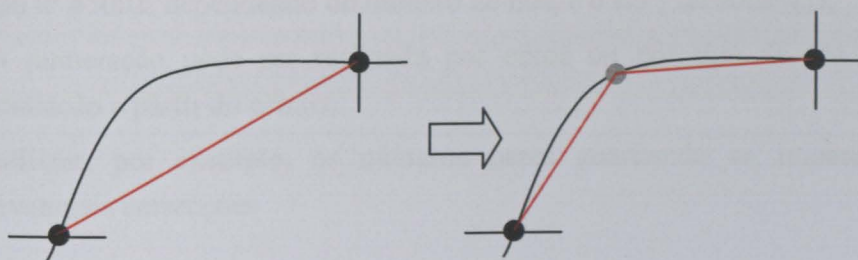


Figura III.10 - Exemplo de introdução de nós fictícios para a representação de arcos

Uma vez definidos todos os nós estes têm de ser numerados e embora não seja uma tarefa crítica, a mesma deve ser realizada com algum método para facilitar, *a posteriori*, a detecção e localização de eventuais erros de codificação e, consequentemente, as respectivas rectificações.

Deste modo, a primeira acção deve consistir na numeração dos centróides e, caso seja possível, as zonas devem ser agrupadas por tipo (interiores, exteriores, outras) pelo que para tal se deve ter presente o número de zonas de cada tipo e reservar um grupo de números para cada tipo, deixando-se sempre alguma margem para eventuais omissões (por exemplo, caso se tenham 30 zonas interiores e 20 exteriores poder-se-ia reservar os intervalos contidos em [1; 60[e em [60; 99[para a numeração de cada tipo de zona, respectivamente). Observe-se que estas margens em certos programas não são permitidas visto que os mesmos obrigam a que a numeração das zonas seja sequencial e contínua.

A atribuição da numeração às zonas também deve seguir alguns critérios tais como da esquerda para a direita e de cima para baixo ou por radiação a partir do centro e agrupadas por limites administrativos.

Relativamente aos nós da rede e à sua numeração recomenda-se que sejam seguidas as seguintes regras (FHWA, 1983):

- o número de identificação dos nós deve ser sempre superior ao maior número de zona;
- utilizar sempre o número da zona como o(s) primeiro(s) dígito(s) para o número do nó, para uma mais fácil localização (por exemplo o nó nº 4501 ou nº 45001, dependendo do número de nós, é o nó 1 da zona 45);
- a numeração pode ser realizada por eixos ou por tipo de via ou por radiação a partir do centro;
- utilizar, por exemplo, os números pares guardando os impares para eventuais correcções

Terminada a tarefa de identificação e numeração de todos os nós deve ser sempre realizada uma listagem ordenada dos mesmos o que permite prevenir eventuais duplicações.

4.2 Atributos dos elementos

Após a selecção da rede a modelar, identificando-se todos os nós e arcos, seguir-se-á a definição dos atributos dos mesmos, ou seja, a caracterização e respectiva codificação das variáveis que descrevem a geometria e as que irão definir os níveis de serviço de uma rede viária, as quais se vão designar por variáveis de funcionamento. Convém referir que esta informação relativa aos atributos tanto dos nós como dos arcos é função do modelo de afectação utilizado.

De um modo geral, os atributos associados aos nós numa modelação “micro” podem ser divididos em duas categorias, nomeadamente as associadas à sua descrição física/modo de funcionamento e as associadas ao nível de serviço que irão proporcionar, ou seja, as variáveis de funcionamento que irão fixar as condições de operação:

i) características físicas

- localização geográfica: coordenadas cartesianas (x, y);
- tipo de nó: fictício, de fronteira ou intersecção e, dentro deste último, qual o tipo de controlo (prioritária, com sinais luminosos, giratória ou rampa de acesso);
- número de ramos;
- número de vias de entrada e de saída;
- movimentos permitidos;
- afectação de vias aos movimentos;
- regras de prioridade;
- ciclo, esquema de fases, tempos de verde e de limpeza, no caso das intersecções controladas por sinais luminosos, bem como desfasamentos no caso de as mesmas serem coordenadas;
- tempo para circundar a placa central, para o caso de intersecções giratórias;
- raios de viragem

ii) variáveis de funcionamento:

- capacidades ou débitos de saturação dos movimentos;
- intervalos críticos.

Certos modelos (FHWA, 1983) ainda permitem a associação de alguns atributos de carácter descritivo associados aos nós que não só têm a vantagem de proporcionar uma mais fácil identificação/localização como também permite o seu agrupamento, para a realização de posteriores análises agregadas, designadamente pelo tipo de localização geográfica (central, periférica, rural...) ou pelo tipo de área (serviços, lazer, comercial, residencial, ...).

No que se refere aos atributos dos nós numa representação macro apenas é necessário definir as suas coordenadas e, caso necessário e possível, atribuir-lhes as já mencionadas penalidades de viragem, ou seja, afectar aos movimentos não permitidos um “custo” adicional que torne proibitiva a realização destes movimentos.

Relativamente ao conjunto dos atributos dos arcos de uma rede os mesmos também podem ser agrupados em duas categorias e de um modo geral são os a seguir descritos:

i) características físicas

- pontos extremos (nós inicial e final);
- comprimento;
- sentidos;
- número de vias;
- eventuais restrições à circulação de veículos tal como vias de uso exclusivo;

ii) variáveis de funcionamento:

- capacidades;
- velocidades ou tempos de percurso;
- relações velocidades-volumes ou tempos de percurso-volumes.

Do mesmo modo que para os nós, certos modelos (FHWA, 1983) ainda permitem a associação de algumas características descritivas associadas aos arcos, salientando-se, além dos já mencionados para os nós, a associação do código relativo à categoria da via (colectora, distribuidora principal, distribuidora secundária, local, ...) e de um código de grupo bastante útil para a selecção do conjunto de arcos que pertençam a um mesmo cordão ou a uma mesma *screenline*, o que permite posteriormente uma mais fácil agregação dos volumes que os atravessam.

Saliente-se mais uma vez que, em termos de definição dos atributos para os arcos, a grande diferença na representação “micro” ou “macro” reside na afectação dos atrasos aos nós ou aos arcos, respectivamente. Assim, numa representação do segundo tipo a codificação das variáveis de funcionamento deve ter sempre presente este facto e, consequentemente, os eventuais atrasos causados pelos nós devem ser reflectidos nas condições operacionais dos arcos.

A caracterização física, quer dos nós quer dos arcos, apenas necessita de um trabalho de levantamento no terreno dos dados necessários. No entanto, face ao volume de informação envolvido recomenda-se que a mesma seja cuidadosamente planeada não só com vista à recolha de dados como ao posterior tratamento da informação.

No que se refere aos atributos operacionais, ou seja, à caracterização das variáveis de funcionamento, a sua estimação é mais uma tarefa de extrema importância, uma vez que as mesmas irão ser as grandes responsáveis pela simulação do comportamento do tráfego ao longo da rede.

Os valores para estas variáveis de funcionamento deveriam ser preferencialmente obtidos a partir de uma campanha de medições realizadas nos locais da rede em análise. No entanto, esta tarefa não só exigiria um enorme esforço como também se pode considerar inoportuno face à dimensão de uma rede urbana.

Deste modo, a fixação de valores para as variáveis de funcionamento é realizada ou a partir de valores tabelados já desenvolvidos ou a partir de expressões já comprovadas na Teoria da Engenharia de Tráfego. Saliente-se que esta opção pode significar a introdução de erros de transferência, caso os valores não sejam validados para o contexto de aplicação do modelo.

Nos sub-capítulos seguintes descrevem-se métodos para o cálculo ou para a fixação dos valores para as variáveis de funcionamento mais comuns dos modelos de afectação. Neste ponto será de referir que a aplicação das diferentes metodologias conduzem a diferentes valores das variáveis de funcionamento de um modelo, como seria de esperar, salientando-se também a sua menor ou maior complexidade que obrigatoriamente terá interferência na opção de escolha. No entanto, esta opção deve ter

sempre como objectivo a limitação dos erros de previsão em níveis compatíveis com os objectivos do estudo em causa.

4.2.1 Intervalo crítico

O intervalo crítico aplica-se aos movimentos não prioritários de uma intersecção e pode ser definido como o tempo mínimo necessário entre veículos consecutivos na corrente principal para um veículo da corrente secundária avançar. Face a esta definição, poder-se-á dizer que um condutor rejeita qualquer intervalo de tempo menor que o crítico e aceita intervalos maiores ou iguais ao crítico.

No quadro seguinte encontram-se valores para o intervalo crítico, em segundos, baseados em estudos nos Estados Unidos e preconizados no *Highway Capacity Manual* (HCM - TRB, 2000), que poderão ser utilizados como valores base a introduzir no modelo.

Movimento	Nº de vias na via principal	
	2	4
Viragem à esquerda na via principal	4,1 s	4,1 s
Viragem à direita na via secundária	6,2 s	6,9 s
Viragem à esquerda na via secundária	6,5 s	6,5 s
Atravessamento da via principal	7,1 s	7,5 s

Fonte: *Highway Capacity Manual* (TRB,2000)

Quadro III.2 - Valores para o intervalo crítico (segundos)

Usualmente nos modelos de afectação esta variável é utilizada para a calibração das capacidades calculadas dos movimentos não prioritários.

4.2.2. Débitos de saturação/Capacidades dos movimentos

O débito de saturação é o volume máximo de veículos que, previamente em fila de espera, podem avançar numa intersecção sinalizada assumindo que o sinal de verde se encontra permanentemente aberto e não existem tempos perdidos.

Esta variável é fundamental para a determinação da capacidade de um cruzamento controlado por sinais luminosos podendo ser obtida através de medições específicas no local ou por estimação a partir de valores base e corrigidos para as condições locais (FHWA, 1983; TRB, 2000).

Relativamente à capacidade de um movimento numa intersecção não controlada por sinais luminosos, a mesma pode ser definida como o volume máximo de uma corrente de tráfego que pode “atravessar” a intersecção em função dos volumes de tráfego dos movimentos com prioridade e conflituantes.

Para a estimação desta variável para um movimento não prioritário é determinante conhecer-se o denominado volume de conflito, ou seja, o número total de veículos com prioridade sobre o referido movimento. Observe-se que esta consideração também se aplica para o cálculo dos denominados débitos de saturação com oposição.

Por outro lado, tanto para a determinação da capacidade como do débito de saturação, quando as vias são partilhadas (vias em que se realizam mais do que um movimento) é necessário conhecer-se a repartição dos volumes de tráfego pelos diferentes movimentos.

Face ao referido nos dois parágrafos anteriores a estimação dos valores para estas variáveis teria de ser realizada através de observações em cada uma das intersecções uma vez que se necessita do conhecimento tanto do tráfego conflituante como da repartição dos movimentos. No entanto, actualmente a maior parte dos modelos de afectação, através do recurso à simulação, estão aptos a recalcular a capacidade a partir das características físicas das intersecções, nomeadamente em função da afectação das vias a cada movimento, das capacidades estimadas individualmente para cada tipo de movimento considerando-se vias exclusivas, e dos volumes de tráfego conflituantes resultantes da simulação.

O débito de saturação em veículos por hora e por via pode ser calculado para cada movimento (isoladamente) e para qualquer tipo de intersecção, através do modelo resultante do desenvolvimento do Método de Webster e Cobbe (Costa, 1997):

$$s = 1900 \cdot f_w \cdot f_i \cdot f_z \cdot f_p \cdot f_t \cdot f_d \dots\dots\dots$$

(III.8)

com

s [u.v.l./h/via] – débito de saturação;
 f_w – factor de ajustamento da largura da via:

$$f_w = \begin{cases} 0,105 \cdot w + 0,653 & \text{se } 2,5 \leq w < 3,3 \text{ m} \\ 0,053 \cdot w + 0,826 & \text{se } 3,3 \leq w < 5,0 \text{ m} \end{cases} \dots\dots\dots$$

(III.9)

w [m] – largura da via;
 f_i – factor de ajustamento da inclinação da via:

$$f_i = 1 - \frac{2}{100} i \dots\dots\dots$$

(III.10)

i [%] – inclinação da via;
 f_z – factor de ajustamento da localização do cruzamento:

$$f_z = \begin{cases} 1,1 & \text{zona residencial} \\ 1,0 & \text{zona periférica} \\ 0,9 & \text{zona comercial central} \end{cases} \dots\dots\dots$$

(III.11)

f_p – factor de ajustamento da localização relativa da via:

$$f_p = \begin{cases} 1,00 & \text{via afastada do lancil} \\ 0,90 & \text{via junto do lancil} \end{cases} \dots\dots\dots$$

(III.12)

f_t – factor de ajustamento da composição do tráfego⁵:

$$f_t = \frac{100}{100 - \sum_t p_t \cdot E_t} \dots\dots\dots$$

(III.13)

p_t [%] – percentagem do veículo tipo t ;
 E_t – coeficiente de equivalência do veículo tipo t ;

⁵ A consideração deste coeficiente depende de no modelo se considerar ou não o tráfego homogeneizado

$$E = \begin{cases} 0,2 & \text{Bicicleta} \\ 0,4 & \text{Motorizada} \\ 1,5 & \text{Comercial Ligeiro (III.14)} \\ 2,0 & \text{Autocarro} \\ 2,3 & \text{Comercial Pesado} \end{cases}$$

f_d – factor de ajustamento da mudança de direcção:

$$f_d = \frac{1}{1 + \frac{1,5}{r}} \text{ (III.15)}$$

r [m] – raio de curvatura da trajectória.

O débito de saturação também pode ser calculado através da metodologia preconizada pelo HCM (TRB, 2000), na qual e relativamente à anterior se tem ainda em linha de conta a diferente procura de tráfego pelas vias, o atravessamento de peões/bicicletas, o estacionamento e a existência de paragens de transportes públicos nas imediações:

$$s = 1900 \cdot f_w \cdot f_i \cdot f_z \cdot f_t \cdot f_d \cdot f_v \cdot f_{pe} \cdot f_e \cdot f_b \text{ (III.16)}$$

com

s [veíc./h/via] – débito de saturação;

f_w – factor de ajustamento da largura da via:

$$f_w = 1 + \frac{w - 3,6}{9} \text{ (III.17)}$$

w [m] – largura da via ($2,4 \leq w \leq 4,8$ m);

f_i – factor de ajustamento da inclinação da via:

$$f_i = 1 - \frac{i}{200} \text{ (III.18)}$$

i [%] – inclinação da via ($-6 \leq i \leq +10$ %);

f_z – factor de ajustamento da localização do cruzamento:

$$f_z = \begin{cases} 0,9 & \text{centro urbano} \\ 1,0 & \text{outras áreas} \end{cases} \text{ (III.19)}$$

f_t – factor de ajustamento da composição do tráfego⁶:

⁶ Ver nota 5

$$f_t = \frac{100}{100 + P} \dots\dots\dots (III.20)$$

P [%] – percentagem de veículos pesados;

f_d – factor de ajustamento da mudança de direcção:

$$f_d = \begin{cases} 0,95 & \text{viragem à esquerda} \\ 0,85 & \text{viragem à direita} \end{cases} \dots\dots\dots (III.21)$$

f_v – factor de ajustamento da utilização de vias:

$$f_v = \frac{Q}{N \cdot Q_1} \dots\dots\dots (III.22)$$

Q [veíc./h] – volume total do movimento;

Q_1 [veíc./h/via] – volume do movimento na via mais carregada

N [un.] – número de vias;

f_{pe} – factor de ajustamento face ao atravessamento de peões/bicicletas:

$$f_{pe} = 1 - (1 - P_f) \cdot (1 - P_v) \dots\dots\dots (III.23)$$

P_f – proporção do tempo em que a zona de conflito está livre de peões/bicicletas;

P_v – proporção de tempo de verde “protegido”;

f_e – factor de ajustamento face à existência de estacionamento:

$$f_e = \frac{N - 0,1 - \frac{18 \cdot N_m}{3600}}{N} \quad (f_e \geq 0,05) \dots\dots\dots (III.24)$$

N [un.] – número de vias

N_m [un./h] – número de manobras de estacionamento por hora
($0 \leq N_m \leq 180$)

f_b – factor de ajustamento face a paragens de TP nas imediações

$$f_b = \frac{N - 0,1 - \frac{14,4 \cdot N_b}{3600}}{N} \quad (f_b \geq 0,05) \dots\dots\dots (III.25)$$

N_b [un./h] – número de transportes públicos que param por hora ($0 \leq N_b \leq 250$)

Observe-se que a aplicação de cada metodologia de referência resulta em diferentes resultados para os valores das variáveis em análise. Por outro lado, como se compreende, a utilização destas metodologias, tal como se apresentam, tornava o processo de modelação incomportável face à dimensão desta tarefa. Assim, como forma

de simplificar este processo, recorre-se usualmente a um conjunto de valores tipificados para um número limitado de situações de referência.

Deste modo, realce-se o grau de incerteza associado a esta tarefa de estimação e, consequentemente, a existência de inúmeras possíveis fontes de erro associadas ao processo de modelação.

4.2.3 Capacidade

A capacidade prática pode ser definida como o número máximo sustentável de veículos que pode passar numa dada secção ou num segmento uniforme de uma infra-estrutura rodoviária, durante um determinado período de tempo e sobre certas condições da via, geométricas, de tráfego, de ambiente e de controlo, sendo geralmente expressa em veículos ou unidades de veículos ligeiros por hora.

Para a estimação da capacidade podem-se utilizar os valores recomendados pelo HCM (TRB, 2000), para o nível de serviço E⁷, ou podem ser calculados utilizando a metodologia preconizada pelo *Report 387 do Transportation Research Board* (NCHRP, 1997), a seguir descrita:

i) Auto-estradas/Vias Rápidas:

$$Q_m = Q_i \cdot N \cdot F_P \cdot F_{PH} \dots\dots\dots (III.26)$$

com

Q_i [u.v.l./h] – capacidade ideal em função da velocidade (U):

$$Q_i = \begin{cases} 2\,400 \text{ u.v.l./h} & U \geq 110 \text{ Km/h} \\ 2\,300 \text{ u.v.l./h} & U < 110 \text{ Km/h} \\ 2\,200 \text{ u.v.l./h} & U = 96 \text{ Km/h} \dots\dots\dots (III.27) \\ 2\,100 \text{ u.v.l./h} & U = 88 \text{ Km/h} \\ 2\,000 \text{ u.v.l./h} & U = 80 \text{ Km/h} \end{cases}$$

N [un.] – nº de vias;

⁷ A noção de nível de serviço foi introduzida pelo *Highway Capacity Manual* de 1965 definindo as condições operacionais do tráfego fixando 6 níveis de serviço de A (regime livre) a F (regime congestionado) e em que o nível de serviço E é equivalente ao volume máximo antes de se atingir as condições de instabilidade, ou seja, representa a capacidade

F_P – factor de ajustamento devido aos veículos pesados⁸:

$$F_P = \frac{100}{100 + E_P \cdot P} \dots\dots\dots (III.28)$$

E_P – factor de equivalência de veículos pesados;

$$E_P = \begin{cases} 0,5 & \text{terreno plano} \\ 2,0 & \text{terreno ondulado} \\ 5,0 & \text{terreno montanhoso} \end{cases} \dots\dots\dots (III.29)$$

P [%] – percentagem de veículos pesados;

F_{PH} – Factor de ponta horário⁹.

ii) Vias urbanas:

$$Q_m = 1\,900 \cdot N \cdot F_P \cdot F_{PH} \cdot F_{est} \cdot F_{vve} \cdot F_C \dots\dots\dots (III.30)$$

com

N – n° de vias;

F_P – factor de ajustamento devido aos veículos pesados¹⁰:

$$F_P = \frac{1}{1 + P} \dots\dots\dots (III.31)$$

P – proporção de veículos pesados;

F_{PH} – Factor de ponta horário¹¹;

F_{est} – factor de ajustamento devido ao estacionamento à superfície:

$$F_{est} = \begin{cases} 0,9 & \text{estacionamento limitado a 1 hora} \\ 1,0 & \text{caso contrário} \end{cases} \dots\dots\dots (III.32)$$

F_{vve} – factor de ajustamento devido às vias de viragem à esquerda:

$$F_{vve} = \begin{cases} 1,1 & \text{vias exclusivas de viragem à esquerda} \\ 1,0 & \text{caso contrário} \end{cases} \dots\dots\dots (III.33)$$

F_C – factor de ajustamento devido à localização geográfica da via:

$$F_C = \begin{cases} 0,9 & \text{centro urbano} \\ 1,0 & \text{caso contrário} \end{cases} \dots\dots\dots (III.34)$$

⁸ Ver nota 5

⁹ Factor a considerar ou não em função do período modelado

¹⁰ Ver nota 5

¹¹ Ver nota 9

O Departamento de Transporte do Reino Unido (HMSO, 1999) propõe para a estimação da capacidade a utilização de valores tabelados em função do tipo de via e da velocidade legal, que se apresentam no quadro seguinte.

Descrição	Nº Sentidos	Nº de Vias (faixa de rodagem x nº de vias)	Localização	Velocidade Limite Legal (Km/h)	Capacidade (veic/h/sentido)
Via urbana	1	1 x 1	Central	48	800
			Não Central	48	800
			Limítrofe	64/80	1 500
		1 x 2	Central	48	1 600
			Não Central	48	1 600
			Limítrofe	64/80	3 000
		1 x 3	Central	48	2 400
			Não Central	48	2 400
			Limítrofe	64/80	4 500
	2	1 x 2	Central	48	800
			Não Central	48	800
			Limítrofe	64/80	1 500
		1 x 4	Central	48	1 600
			Não Central	48	1 600
			Limítrofe	64/80	3 000
		2 x 2	-	48/64/80	3 000
		2 x 3			4 500
		2 x 4			6 000
Via rápida urbana	2	2 x 2	-	48/64/80	3 000
Auto-estrada urbana	2	2 x 2	-	80/96/112	3 800
		2 x 3			5 700
		2 x 4			7 600
		2 x 5			9 500

Fonte: *Traffic Modelling in NESA* (HMSO,1999)

Quadro III.3 - Valores recomendados para a capacidade

Convém realçar que a estimação dos valores para as capacidades referidas pressupõem que a codificação dos cruzamentos seja “micro”, ou seja, estes valores são válidos para plena via e não têm em conta as capacidades das intersecções localizadas a jusante. Deste modo, no caso de uma codificação “macro” dos nós estes valores têm que ser corrigidos face ao tipo de intersecções em que os arcos vão confluir.

O *Report 387* (NCHRP, 1997) apenas faz referência à correcção a aplicar a intersecções controladas por sinais luminosos, sugerindo a aplicação do seguinte factor de ajustamento à capacidade calculada para vias urbanas:

$$F_{SL} = \frac{g}{C} \dots\dots\dots(III.35)$$

com

F_{SL} – factor de ajustamento da capacidade do arco devido à presença de intersecções controladas por sinais luminosos a jusante;

g [s] – tempo de verde útil;

C [s] – ciclo.

Este factor de ajustamento é igualmente proposto pelo Departamento de Transporte – R. U (HMSO, 1999).

No que se refere ao cálculo da capacidade para outros tipos de intersecções esta última instituição remete para a utilização dos programas de cálculo automático PICADY (*Priority Intersection Capacity and Delay*) para intersecções prioritárias, ARCADY (*Assessment of Roundabout Capacity and Delay*) para intersecções giratórias e OSCADY (*Optimised Signal Capacity and Delay*) para intersecções controladas por sinais luminosos, designadamente quando existem fases com movimentos “conflituosos”, observando-se que o cálculo necessita do volume de conflito, como já foi referido no sub-capítulo 4.2.2.

Por último, refira-se que, tal como no ponto anterior, a utilização das metodologias preconizadas conduz a diferentes valores da variável capacidade. Observe-se, por exemplo, que para vias urbanas e em função do número de vias, os valores da capacidade aplicando a primeira metodologia conduz a valores que variam entre cerca de 1 100 e 5 500 veículos/hora enquanto que o Departamento de Transporte do Reino Unido recomenda valores para a capacidade entre 800 e 6 000 veículos/hora.

Deste modo, realce-se mais uma vez o grau de incerteza associado ao cálculo desta variável e, portanto, da existência das diversas fontes de erro associadas ao processo de modelação de uma rede.

4.2.4 Velocidade

A velocidade é definida como a distância percorrida na unidade de tempo considerando um regime livre, sendo geralmente expressa em quilómetros por hora ou em metros por segundo.

Salienta-se que a velocidade a definir nos modelos é a velocidade no tempo uma vez que deve ser baseada no tempo de percurso que os veículos demoram a percorrer um dado arco. Deste modo, sempre que se refere velocidade subentende-se que a mesma se refere à velocidade no tempo

Tal como para a capacidade, a velocidade pode ser estimada a partir de valores tabelados no HCM de 2000 ou podem ser calculados com base na metodologia preconizada no *Report 387* (NCHRP, 1997), que se apresenta de seguida:

i) Vias com velocidades legal superior a 80 Km/h ($U_C > 80$ Km/h):

$$U_f = 0,88 \cdot U_C + 22 \dots\dots\dots(III.36)$$

ii) Vias com velocidades legal inferior ou igual a 80 Km/h ($U_C \leq 80$ Km/h):

$$U_f = 0,79 \cdot U_C + 19 \dots\dots\dots(III.37)$$

com

U_f [Km/h] – velocidade em regime livre;
 U_c [Km/h] – velocidade limite legal.

O Departamento de Transporte – R. U. (HMSO, 1999) propõe igualmente a utilização de valores padrão, em função do tipo de via e da velocidade limite legal, para a determinação das velocidades em regime livre, sendo estes apresentados no quadro seguinte.

Descrição	Nº Sentidos	Nº de Vias (faixa de rodagem x nº de vias)	Localização	Velocidade (Km/h)	
				Limite Legal	Regime Livre
Via urbana	1	1 x 1	Central	48	20
			Não Central	48	30
			Limítrofe	64/80	40/50
		1 x 2	Central	48	20
			Não Central	48	30
			Limítrofe	64/80	40/50
		1 x 3	Central	48	20
			Não Central	48	30
			Limítrofe	64/80	40/50
	2	1 x 2	Central	48	20
			Não Central	48	30
			Limítrofe	64/80	40/50
		1 x 4	Central	48	20
			Não Central	48	30
			Limítrofe	64/80	40/50
		2 x 2	-	48/64/80	40/50/65
		2 x 3			
		2 x 4			
Via rápida urbana	2	2 x 2	-	48/64/80	45/55/75
Auto-estrada urbana	2	2 x 2	-	80/96/112	80/90/100
		2 x 3			80/95/105
		2 x 4			
		2 x 5			

Fonte: *Traffic Modelling in NESAs* (HMSO,1999)

Quadro III.4 - Valores recomendados para a velocidade

Esta mesma instituição também propõe alternativamente o cálculo da velocidade através das seguintes expressões:

i) Auto-estradas urbanas

$$U_f = \begin{cases} 111 & 2 \times 2 \\ 118 & 2 \times 3 \text{ e } 2 \times 4 \end{cases} \dots\dots\dots \text{(III.38)}$$

ii) Vias rápidas urbanas

$$U_f = 80 - 5 \cdot \text{INT} - 3 \cdot \frac{\text{AXS}}{20} \dots\dots\dots \text{(III.39)}$$

iii) Vias urbanas limítrofes

$$U_f = \begin{cases} 80 - 5 \cdot \text{INT} - 3 \cdot \frac{\text{AXS}}{20} & \text{dois sentidos} \\ 70 - 5 \cdot \text{INT} - 3 \cdot \frac{\text{AXS}}{20} & \text{sentido único} \end{cases} \dots\dots\dots \text{(III.40)}$$

iv) Vias urbanas não centrais

$$U_f = 64.5 - \frac{\text{DEVEL}}{5} \dots\dots\dots \text{(III.41)}$$

v) Vias urbanas centrais

$$U_f = 39.5 - \frac{\text{INT}}{4} \dots\dots\dots \text{(III.42)}$$

com

- U_f [Km/h] – velocidade em regime livre;
- AXS [un./Km] – frequência de intersecções secundárias;
- INT [un./Km] – frequência de intersecções principais (geralmente giratórias ou controladas por sinais luminosos);
- DEVEL [%] – percentagem da via com desenvolvimento frontal.

Também para a determinação das velocidades nos arcos será necessário ter em consideração o tipo de modelação nas intersecções, nomeadamente se é “micro” ou “macro”, de forma a contabilizar os atrasos nas intersecções aos arcos.

Relativamente a este ponto, o *Report 387* (NCHRP, 1997) apenas refere o atraso devido às intersecções controladas por sinais luminosos, propondo a seguinte expressão para o cálculo da velocidade tendo em conta o atraso:

$$U_{fs} = \frac{L}{L/U_f + D/3600} \dots\dots\dots (III.43)$$

com

U_{fs} – velocidade em regime livre corrigida face à presença de a jusante de uma intersecção controlada por sinais luminosos;

$$D = 0,5 \cdot DF \cdot C \left(1 - \frac{g}{C}\right)^2 \dots\dots\dots (III.44)$$

D [s] – atraso;

DF – factor de ajustamento do funcionamento dos sinais e da sua coordenação;

$$DF = \begin{cases} 0,9 & \text{sinais actuados não coordenados} \\ 1,0 & \text{sinais com tempos fixos não coordenados} \\ 1,2 & \text{sinais coordenados em "onda vermelha"} \\ 0,9 & \text{sinais coordenados em "onda verde"} \\ 0,6 & \text{sinais centralizados e coordenados} \end{cases} \dots\dots (III.45)$$

C [s] – ciclo;

g [s] – tempo de verde útil;

L [Km] – comprimento do arco;

U_f [Km/h] – velocidade em regime livre.

No que se refere ao Departamento de Transporte – R. U. (HMSO, 1999) o mesmo propõe a seguinte contabilização de atrasos conforme o tipo de intersecções:

i) intersecções prioritárias

- movimento de viragem à direita da via principal 5,7 s
- movimento de viragem à esquerda da via principal 6,5 s
- movimento de viragem à direita da via secundária 7,8 s
- movimento em frente da via secundária 12,2 s
- movimento de viragem à esquerda da via secundária .. 10,6 s

ii) Intersecções giratórias

$$D = \frac{dbc}{js} + 0,23 \cdot U_R - 5,62 - 0,12 \cdot DC + 0,0000367 \cdot U_R \cdot DC \dots\dots (III.46)$$

com

D [s] – atraso;
dbc [m] – distância percorrida na rotunda:

$$dbc = \alpha \cdot \pi \cdot (DC - 7) \dots\dots\dots (III.47)$$

α - proporção da distância percorrida na placa central:

$$\alpha = \begin{cases} 0,25 & \text{movimento de viragem à direita} \\ 0,50 & \text{movimento em frente} \\ 0,75 & \text{movimento de viragem à esquerda} \end{cases} \dots\dots\dots (III.48)$$

js [m/s] – velocidade de circulação na placa central:

$$js = 0,96 \cdot \sqrt{DC} + 2,03 \dots\dots\dots (III.49)$$

U_R [Km/h] - média das velocidades dos arcos de entrada e de saída;
DC [m] – diâmetro do circulo circunscrito.

Por último, saliente-se mais uma vez a dificuldade que de um ponto de vista de modelação de redes existe na estimação dos valores para a variável velocidade resultante, por um lado, dos diferentes valores que resultam da aplicação de diferentes metodologias e, por outro, dos inúmeros tipos de arcos existentes numa rede. Deste modo, como já apontado para as variáveis anteriormente definidas saliente-se a inerência de erros ao processo de modelação.

4.2.5 Relações velocidade-volume

As funções que determinam a relação entre velocidades ou tempos de percurso nos arcos e o volume de tráfego que circula constituem um elemento essencial nos modelos de afectação com restrições à capacidade. Estas funções tentam de uma forma analítica reproduzir os? Diagramas Fundamentais da relação Velocidade- Volume (Figura III.11) ou Tempo de Percurso-Volume- (Figura III.12).

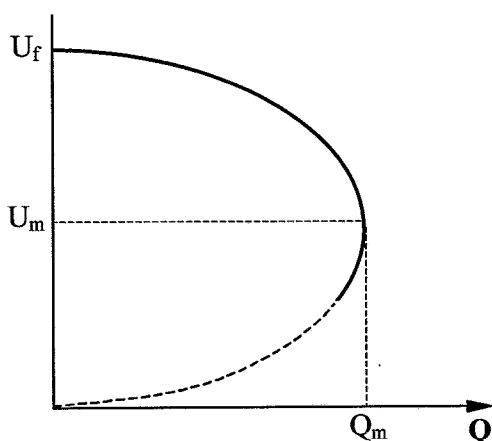


Figura III.11 - Diagrama fundamental da relação Velocidade- Volume

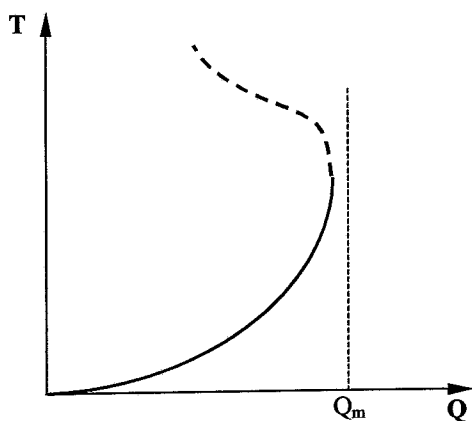


Figura III.12 - Relação Tempo de Percurso-Volume

De facto, na área de Engenharia de Tráfego, uma relação básica é a que relaciona a velocidade (U) num dado arco com o seu volume (Q). Em regime livre os veículos circulam à velocidade máxima (ou velocidade em regime livre - U_f) e à medida que o volume no arco aumenta a velocidade tende a diminuir (ver Figura III.11), com um período inicial de pequena diminuição e aumentando a percentagem de redução da velocidade quando o volume se aproxima da capacidade (Q_m), atingindo neste ponto a denominada velocidade em saturação (U_m). Quando se tenta forçar os volumes para além da capacidade atinge-se uma região instável de escoamento caracterizada por velocidades e volumes reduzidos.

Em termos práticos, nos modelos de afectação de tráfego a relação utilizada é a que relaciona os tempos de percurso com os volumes uma vez que o cálculo do custo generalizado é realizado com a variável tempos de percurso para além da distância.

A principal reflexão na análise destes diagramas simplificados é a de que não é correcto assumir que os tempos de percurso são pequenos (ou as velocidades são altas) quando os volumes são baixos uma vez que, por vezes, os maiores tempos de percurso (ou as menores velocidades) são atingidos em situações de escoamento de tráfego do tipo “para-avança” em que os volumes são muito baixos.

Face à adopção da programação matemática na formulação da afectação de equilíbrio estas funções devem obedecer a (Suh et al, 1990):

- i) a função deve ser não negativa e monótona crescente¹² em função do volume, com solução única;
- ii) a função deve ser contínua e derivável;
- iii) a função deve ser de fácil cálculo.

Estas funções podem ser divididas em dois tipos, nomeadamente em matemáticas e teóricas (Branston, 1976). As primeiras têm a vantagem de serem matematicamente simples e poderem ser calibradas com valores observados sendo que, no entanto, face à sua simplicidade não conseguem reflectir todas as características das infra-estruturas de transporte tais como os diferentes tipos de vias, factores ambientais, usos do solo e comportamento dos condutores. Por outro lado, as funções denominadas por teóricas tentam incorporar estes diferentes factores resultando em funções matematicamente mais complexas e difíceis de calibrar.

Ao longo dos anos têm sido propostas múltiplas funções para estas relações volumes-velocidades/tempos de percurso (Branston, 1976; NCHRP, 1997), sendo as mais comuns a denominada curva BPR (*Bureau of Public Roads* – EUA, actual *Federal Highway Administration*), e as recomendadas pelo Departamento de Transporte do Reino Unido. Estas curvas têm a vantagem de já estarem perfeitamente testadas e calibradas embora para o contexto dos respectivos países.

¹² Observe-se que esta afirmação concerne à relação entre tempos de percurso e volumes

A curva BPR foi desenvolvida nos finais dos anos 60 através da aproximação de um polinómio à curva de velocidade-volume do *Highway Capacity Manual* (HCM) de 1965, sendo definida pela seguinte expressão:

$$U = \frac{U_f}{1 + \alpha \cdot \left(\frac{Q}{Q_P}\right)^\beta} \dots\dots\dots (III.50)$$

com

- U [Km/h] – velocidade;
- U_f [Km/h] – velocidade em regime livre;
- Q [veíc./h] – volume;
- Q_P [veíc./h] – capacidade prática (80% da capacidade);
- α, β – parâmetros de calibração.

O parâmetro α fixa o rácio da velocidade em regime livre para a velocidade na capacidade prática e o parâmetro β fixa o declive da curva, ou seja, como é que a velocidade em regime livre baixa com o aumento do volume (um valor alto de β faz com que a curva seja insensível à razão (Q/Q_p) até que este atinja a unidade e a partir deste ponto a velocidade desce abruptamente).

Recentemente esta curva foi actualizada, tendo por base o HCM de 1994, nomeadamente no que se refere aos valores da velocidade em regime livre e da capacidade a utilizar, deixando de ser utilizados valores típicos de referência e passando os mesmos a ser calculados de acordo com as expressões referidas nos pontos 4.2.3 e 4.2.4 anteriores (NCHRP, 1997). No Quadro seguinte encontram-se representados os valores recomendados para os dois parâmetros em função do tipo de via e das velocidades limites legais.

Parâmetros	Auto-estradas			Vias múltiplas			Vias urbanas
	112 Km/h	96 Km/h	80 Km/h	112 Km/h	96 Km/h	80 Km/h	-
α	0,88	0,83	0,56	1,00	0,83	0,71	0,05/0,20
β	9,80	5,50	3,60	5,40	2,70	2,10	10,00

Fonte: *Planning techniques to estimate speed and service volumes for planning applications* (NCHRP, 1997);

Quadro III.5 – Valores recomendados para os parâmetros α e β da curva BPR

O Departamento de Transporte desenvolveu um grande número de curvas volume-velocidade para uma diversidade de arcos tipo, em ambiente urbano, suburbano e interurbano (HMSO, 1999), citando-se como exemplo as utilizadas em vias urbanas:

i) Auto-estradas em meio urbano

$$U = \begin{cases} U_f - 0,1 \cdot \text{BEND} - 0,28 \cdot H_R - 0,006 \cdot Q & Q < Q_m \\ U_m - 0,033 \cdot (Q - Q_m) & Q \geq Q_m \end{cases} \dots\dots\dots(\text{III.51})$$

ii) Vias rápidas em meio urbano e zonas limítrofes

$$U = \begin{cases} U_f - \left(12 + 50 \cdot \frac{\text{INT}}{3}\right) \cdot \frac{Q}{1000} & Q < Q_m \\ U_m - 0,045 \cdot (Q - Q_m) & Q \geq Q_m \end{cases} \dots\dots\dots(\text{III.52})$$

iii) Vias urbanas

$$U = U_f - 0,03 \cdot Q \quad Q < Q_m \dots\dots\dots(\text{III.53})$$

$$U_m = \begin{cases} 15 \text{ Km/h} & \text{área central} \\ 25 \text{ Km/h} & \text{outras} \end{cases} \dots\dots\dots(\text{III.54})$$

com

- U [Km/h] – velocidade;
- U_f [Km/h] – velocidade em regime livre;
- U_m [Km/h] – velocidade em capacidade;
- Q [veíc/h/via] – volume;
- Q_m [veíc/h/via] – capacidade;
- BEND [graus/Km] – coeficiente de sinuosidade em planta (Figura III.13):

$$\text{BEND} = \frac{\sum \phi_i}{L} \dots\dots\dots(\text{III.55})$$

- φ_i – [graus] – ângulos de desvio;
- L [Km] – extensão total do segmento;

HR [m/Km] – coeficiente de sinusidade em perfil (Figura III.13):

$$HR = \frac{\sum \Delta H_i}{L} \dots\dots\dots(III.56)$$

ΔH_i [m] – desníveis;

L [Km] – extensão total do segmento;

INT [un./Km] – frequência de intersecções principais (geralmente giratórias ou controladas por sinais luminosos).

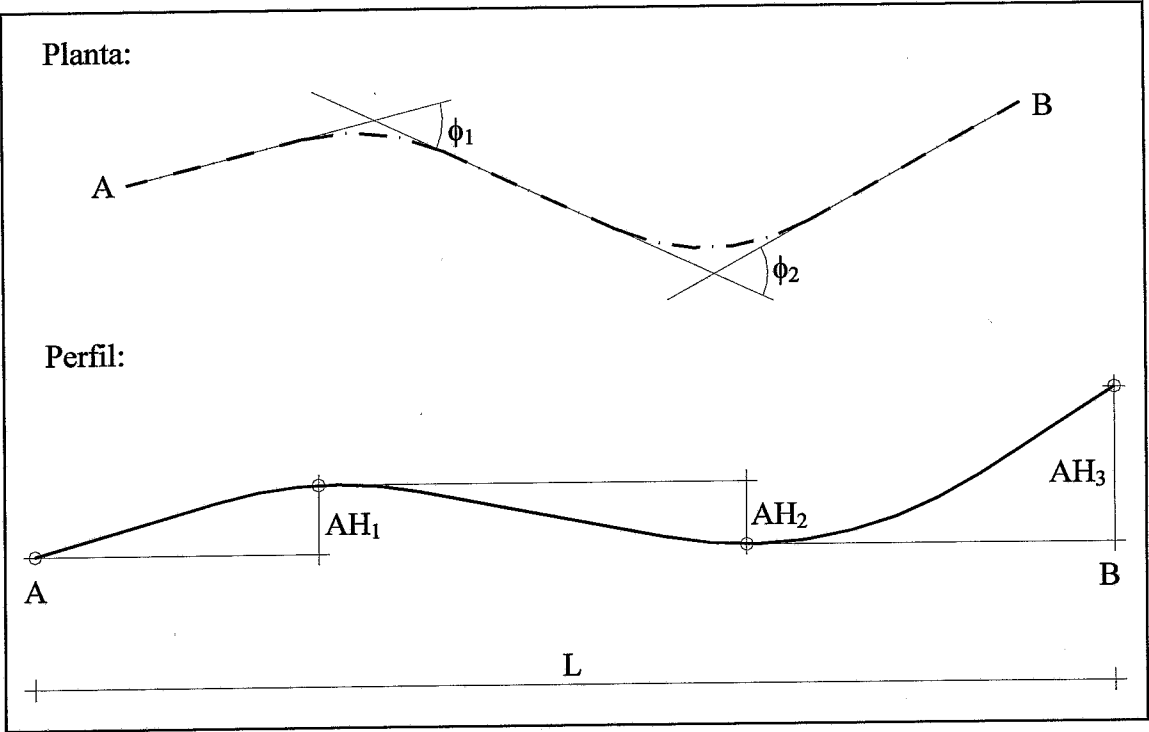


Figura III.13 - Cálculo dos coeficientes de sinusidade

Por último e relativamente às funções velocidade-volume convém referir que as mesmas dependem do modelo de afectação, podendo não ser nenhuma das já referidas. No entanto, e visto que estas se encontram calibradas e validadas, embora em contextos dos países onde foram desenvolvidas, podem ser sempre convertidas para as funções específicas dos modelos. Neste ponto, saliente-se, mais uma vez, o facto de estas “simplificações” implicam inevitavelmente a inerência de imprecisões no processo de modelação.

Para esta conversão pode ser utilizado o Método das “Áreas Equivalentes” (Yanaguaya, 1994) em que se assume que a curva que melhor se ajusta é aquela que reproduz a área sobre a mesma com maior precisão (Figura III.14):

$$\int_0^{Q_m} f_1(Q)dQ = \int_0^{Q_m} f_2(Q)dQ(III.57)$$

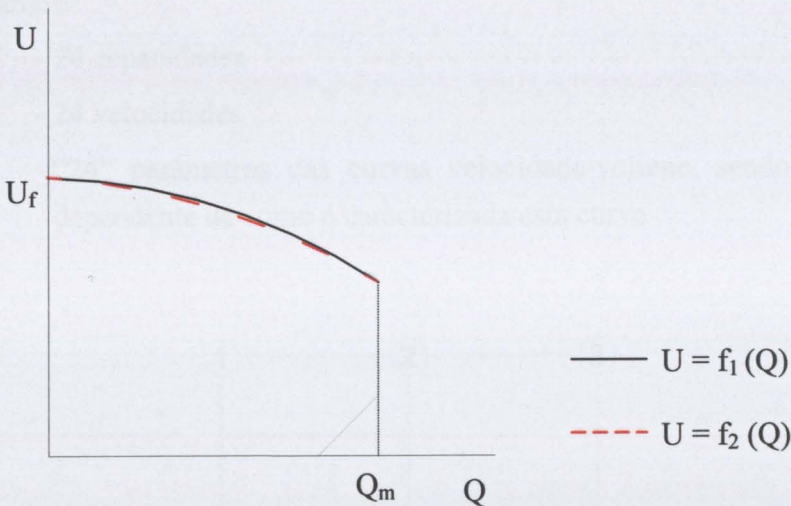


Figura III.14 - Conversão de funções velocidade-volume

4.2.6 Síntese

Face ao volume de informação necessário e indispensável para a caracterização de todos os atributos dos nós e arcos que constituem uma rede, esta operação de codificação deve ser cuidadosamente planeada e sistematizada de modo a minimizar eventuais erros ou omissões.

A título de exemplo do volume de dados necessário nesta tarefa de definição de atributos, considere-se a rede representada na Figura III.15 apenas constituída por 9 nós, dos quais 4 são fictícios (nós 1, 3, 7 e 8), e 12 arcos.

Considerando que não existem nem restrições de movimentos nos nós nem de sentidos nos arcos e que todas as intersecções são prioritárias, esta simples rede

necessita da estimação de no mínimo 118 variáveis de funcionamento¹³ correspondentes a 36 movimentos nos nós e 24 sentidos nos arcos, nomeadamente:

i) nós:

- 36 capacidades de movimientos
- 20 intervalos críticos

ii) **arcos:**

- 24 capacidades
- 24 velocidades
- “24” parâmetros das curvas velocidade-volume, sendo este número dependente de como é caracterizada esta curva

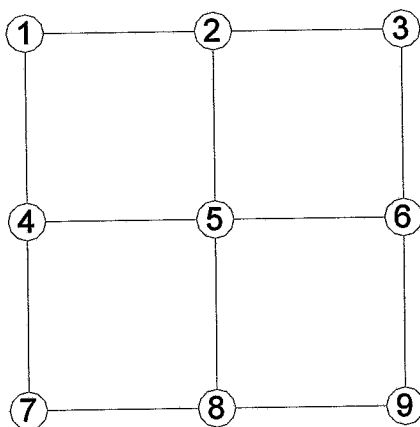


Figura III.15 - Representação esquemática de uma pequena rede

Assim, após a selecção da rede a modelar e face ao volume de informação envolvido na codificação, a utilização de formulários torna-se indispensável para a caracterização da rede, devendo os mesmos ser desenhados para o efeito tendo em atenção as especificidades do modelo de afectação a utilizar nomeadamente no que se refere:

- aos atributos a definir;
- ao tipo de codificação a realizar;.
- à entrada de dados para processamento.

13 Observe-se que a este número ainda haverá que adicionar o número de atributos necessário para a caracterização física dos nós e dos arcos.

Estes formulários devem ser realizados com recurso à numeração dos nós, ou seja, a cada um deve corresponder um nó, tendo por base a listagem realizada após a identificação de todos os nós para se evitar duplicações, como já referido, devendo também ser identificados todos os arcos que confluem no nó.

O desenho dos formulários deverá ter em atenção que a recolha de dados é realizada *in situ*, nomeadamente no que se refere aos atributos “físicos” e devem estar preparados para o posterior tratamento desta informação e “actualização” no que se refere ao cálculo das variáveis de funcionamento. Neste ponto, exemplifica-se nas figuras seguintes uma proposta de uma folha para a recolha das características físicas e de uma para posterior codificação e preenchimento com as variáveis de funcionamento.

Nó nº _____ Tipo _____ Nº de ramos _____ Localização _____	Planta de Localização
<i>Esboço</i>	Check List
	☐ Identificação dos arruamentos
	☐ Vias de entrada
	☐ Vias de saída
	☐ Movimentos
	☐ Afectação das vias
	☐ Regras de prioridade
	☐ Raios
	☐ Largura de vias
	☐ Separadores/baixas
	☐ Inclinações
	☐ Peões
	☐ Estacionamento
	Se intersecção giratória
	☐ Raio interior
☐ Raio exterior	
☐ Ângulo de entrada	
Se controlada por sinais luminosos	Check List
<i>Esquema de Fases</i>	☐ Ciclo
	☐ Tempos de verde
	☐ Tempos de interverde
	Se actuados
	☐ Tempos mínimos
☐ Tempos máximos	
☐ Eliminação de fase	

Figura III.16 - Exemplo de formulário para a recolha de dados no campo

Nó nº

Tipo

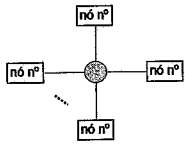
Nº de ramos

Localização

Ciclo

Desfasamento

Esquema



Arcos	Codificação do nó*	Codificação do arco*
-		
-		
-		
-		
-		

* função do modelo de afectação

Figura III.17 - - Exemplo de formulário para a codificação dos nós e arcos

Após esta primeira tarefa pode-se considerar que os dados para a caracterização física da rede se encontram perfeitamente definidos. No que se refere às variáveis de funcionamento o ideal seria, como já salientado, a sua caracterização através de dados obtidos através de medições directas para a rede em causa. No entanto, tal tarefa obrigaria a um enorme esforço no que diz respeito quer a recursos humanos como a financeiros, podendo-se afirmar que a realização de tal campanha de recolha de dados para a caracterização de toda uma rede e para cada estudo poderia ser irrealista e mesmo injustificável do ponto de vista de um decisor.

Deste modo, de forma a reduzir a complexidade desta tarefa, deve ser realizada a tipificação dos vários tipos de intersecções e das vias (função da sua localização, do seu modo de funcionamento e das suas características geométricas) e realizado o cálculo das variáveis de funcionamento através das expressões já desenvolvidas e testadas internacionalmente sendo, contudo, recomendável que estas sejam calibradas e validadas para a rede em causa. Note-se que esta tarefa de calibração e validação das variáveis de funcionamento deve ser realizada com dados reais cuja a recolha deverá ser dimensionada, de forma a minimizar os erros associados à amostragem, tendo em atenção a tipificação efectuada e de modo a não assumir uma dimensão incontrolável.

Após o cálculo dos valores para as variáveis de funcionamento para os vários tipos de nós/arcos é aconselhável a sua introdução em tabelas de modo não só a sistematizar a codificação e introdução de dados como também a minimizar a possível existência de discrepâncias de valores entre nós/arcos semelhantes (FHWA, 1983). Na figura seguinte exemplifica-se uma possível tabela para este tipo de atributos relativamente aos arcos.

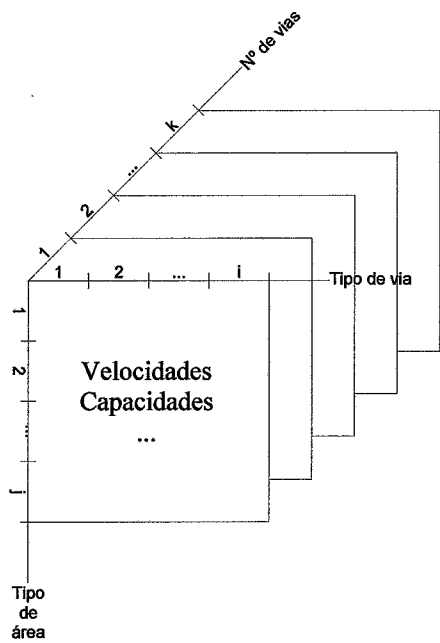


Figura III.18 - Exemplo para tabelas de atributos

No entanto, será de observar que tipificação referida associada à utilização deste tipo de tabelas faz com que se esteja a assumir uma homogeneidade de características para os nós e arcos que na realidade não existe, podendo-se dizer que se estão a assumir alguns erros de previsão para as variáveis de funcionamento.

5. Calibração e Validação de Modelos de Afecção

5.1 Preâmbulo

Durante o desenvolvimento de um modelo de afecção deverão ser realizadas verificações específicas para assegurar que o modelo está a caracterizar o funcionamento real da rede, designadamente que não só os cálculos das velocidades, dos volumes e dos atrasos estejam dentro dos valores observados, como também que os percursos seleccionados entre todos os pares de zonas sejam os escolhidos pelos condutores.

Este é o objectivo da fase de calibração do modelo, sujeita a posterior validação que, de uma forma sucinta, consiste em aproximar o modelo à realidade e verificar essa aproximação (cf ponto 4. do Capítulo II), através da avaliação das medidas de desempenho resultantes do modelo com as do sistema real de modo a verificar a fiabilidade do mesmo.

Neste ponto será de salientar que “a validação deve ser vista não como um conjunto isolado de procedimentos que se seguem ao desenvolvimento do modelo mas como parte integrante de tal desenvolvimento” (Banks et al, 1996). Assim, pode-se dizer que a calibração e posterior validação de um modelo é um processo iterativo com reanálises sucessivas desde o início da sua construção até à validação final.

A avaliação do desempenho dos modelos é usualmente realizada através do cálculo de parâmetros, definidos como uma medida de diferença entre os valores reais (obtidos a partir de amostras da população) e os valores resultantes da aplicação do modelo de certas variáveis que caracterizam as condições operacionais de uma rede. A estes parâmetros de aferição encontram-se associados critérios, definidos como os valores limites que os parâmetros devem cumprir para que se considere o modelo calibrado ou validado.

Os testes usualmente efectuados nestas fases de calibração e validação dos modelos consistem assim na comparação dos resultados produzidos pelo modelo com os observados no sistema real, tentando-se atingir os valores dos critérios associados aos parâmetros de aferição do desempenho do modelo.

Realce-se que os testes a efectuar requerem que a calibração se realize com um conjunto de dados distintos e independentes dos utilizados no processo de validação (Figura III.19).

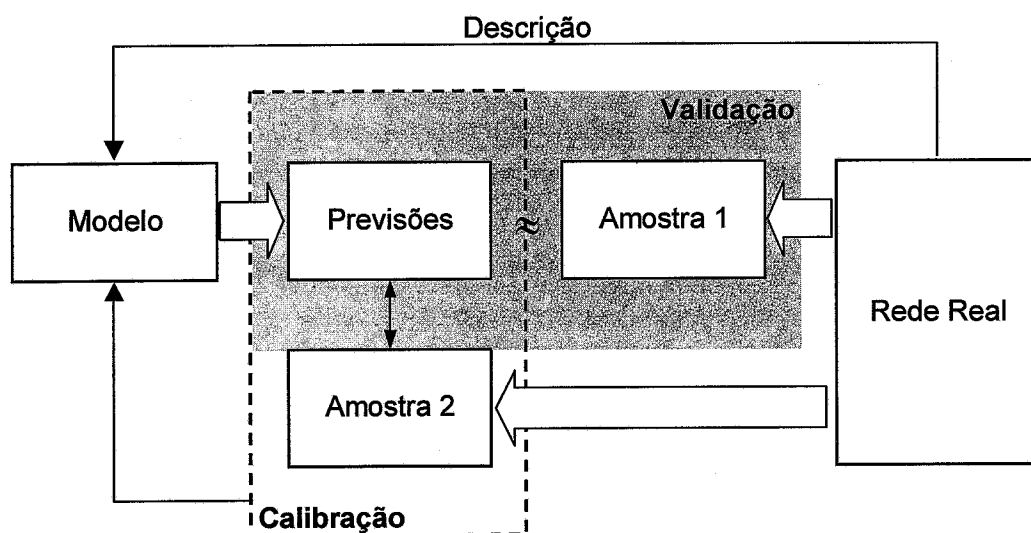


Figura III.19- Calibração e validação de um modelo

A fixação de critérios associados aos parâmetros nunca pode reflectir uma correspondência absoluta entre o sistema modelado e o sistema real, ou seja, não se pode exigir que os valores dos parâmetros calculados pelo modelo sejam iguais aos obtidos com base nas observações reais pelo que a existência de “erros” é inerente.

A impossibilidade de fixar critérios universais para os parâmetros de calibração/validação para afirmar que um modelo se encontra apto a ser aplicado, conduz a que o nível de exactidão adequado de um modelo seja de algum modo subjectivo e tenha uma grande dependência não só do objectivo final como dos recursos disponíveis (Barton-Aschman Associates Inc. & Cambridge Systematics Inc., 1997).

Deste modo, face à dificuldade de controlo dos erros associada à construção do modelo o conhecimento mais exacto possível da relação entre as diversas fontes de erro e a qualidade dos resultados finais assume uma particular relevância para a definição dos critérios e, consequentemente, do nível de desempenho do modelo.

Por outro lado, o recurso a análises subjectivas também faz parte do processo de calibração/validação. Este tipo de análise consiste principalmente na investigação de factos anómalos não mensuráveis identificados pela existência de conflitos entre as previsões de um modelo e o desempenho real de uma rede tal como, por exemplo, a existência de filas de espera em locais que na realidade apresentam uma situação fluída e vice-versa.

Por último, será de observar que não é possível avaliar um modelo de afectação isoladamente uma vez que os resultados ao nível do desempenho da rede não só reflectem os erros inerentes a este passo do modelo de transportes mas também aos anteriores, nomeadamente os ligados ao processo de construção da matriz O/D bem como à descrição da rede. Esta questão tem particular relevância em áreas urbanas congestionadas em que pequenas discrepâncias na matriz têm um grande impacto nos atrasos e, conseqüentemente, nas vias que os veículos utilizam ao longo da rede.

5.2 Parâmetros e critérios de aferição do desempenho

5.2.1. Enquadramento

As variáveis de tráfego usualmente utilizadas na avaliação do funcionamento de um modelo, embora parcialmente dependentes do modelo utilizado, são geralmente os volumes, as velocidades ou os tempos de percurso, os comprimentos de filas de espera, os atrasos e os intervalos de tempo entre veículos/distância entre veículos, ou seja, todas as variáveis de tráfego utilizadas como indicadores do nível de desempenho de uma rede rodoviária.

Estas variáveis são obtidas a partir de medições realizadas em diversas secções/troços de referência da rede rodoviária, sendo a sua selecção bem como dos locais de medição um importante procedimento, pelo que deve ser criteriosamente definida de acordo com o modelo utilizado e com os objectivos do estudo. Em áreas urbanas é importante seleccionar diferentes locais que garantam uma amostra representativa de situações de tráfego distintas (HMSO, 1996).

Por outro lado, quando se comparam os valores das variáveis obtidos pelo modelo com os valores “reais”, é importante assegurar que a recolha de dados é suficiente para a caracterização de cada variável e que os valores estão a ser comparados com um dado nível de exactidão. Em redes urbanas esta questão assume uma maior importância face à variabilidade temporal do comportamento do tráfego com a consequente implicação nos valores das variáveis que o caracterizam.

Deste modo, admitindo que os pressupostos estatísticos no que diz respeito à normalidade das variáveis de tráfego são válidos, os valores do modelo (Y) não devem ser comparados com a média da variável observada ($\bar{X}$) mas com o seu intervalo de confiança (Barton-Aschman Associates Inc. & Cambridge Systematics Inc.,1997; HMSO, 1991), tal como se exemplifica na figura seguinte.

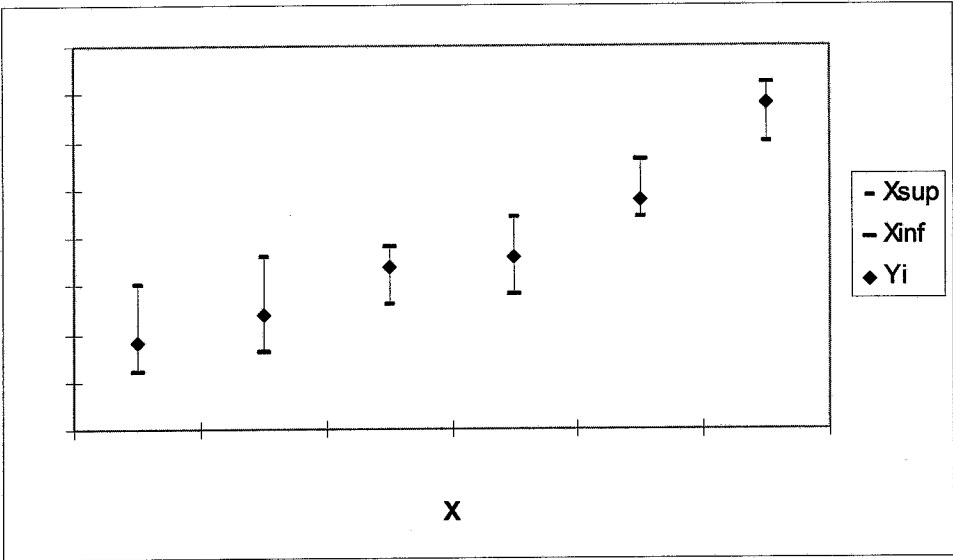


Figura III.20 - Comparação das variáveis

O intervalo de confiança é expresso em função do nível de significância (α), sendo recomendado pelo *Traffic Appraisal Manual* (HMSO, 1991) o valor de 95%. Os limites inferior (X_{inf}) e superior (X_{sup}) dos intervalos de confiança das médias amostrais, considerando garantidos os pressupostos estatísticos de normalidade, são dados por:

$$(X_{inf}, X_{sup}) = \left(\bar{X} - z_{1-\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \bar{X} + z_{1-\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \right) \dots\dots\dots (III.58)$$

para 95% $\Rightarrow \alpha = 0,05 \Rightarrow z_{0,975} = 1,96$

com

$\bar{X}$ - valor médio;

σ - desvio padrão;

N - tamanho da amostra;

$z_{1-\alpha/2}$ - valor da distribuição de Student;

É ainda desejável que as variáveis para as quais os valores observados apresentem intervalos de confiança com uma amplitude superior a 15% em relação à média não sejam incluídas na calibração/validação (HMSO, 1991).

5.2.2 Níveis de agregação

As análises comparativas entre valores das variáveis observadas e modeladas, podem ser realizadas a três níveis, nomeadamente ao nível do sistema, do “itinerário” e do arco, estando estes níveis de agregação de algum modo relacionados com os passos do modelo que podem ser a fonte dos erros detectados (FHWA, 1983), ou seja, no primeiro nível as diferenças encontram-se geralmente associadas à construção da Matriz e os seguintes, caso se considere a Matriz isenta de erros, encontram-se ligados à modelação da rede.

No primeiro nível incluem-se a verificação de certos valores de variáveis de tráfego globais (distância total percorrida, velocidade média na rede, ...) ou a agregação de variáveis ao longo de um cordão, de uma *screenline* ou de uma *cutline* (Figura III.21). Estas três entidades são todas definidas por linhas imaginárias que seccionam os arcos de uma rede viária de acordo com certos critérios (FHWA, 1990; HMSO, 1996), nomeadamente:

- cordão: definido de forma a envolver uma dada zona ou conjunto de zonas, estando normalmente associados cordões aos limites das áreas modeladas, entre outros;
- screenline: definida de forma a interceptar os principais fluxos de tráfego de passagem e geralmente interceptando os limites de um cordão; considera-se desejável que este tipo de linhas seja coincidente com barreiras físicas naturais (rio, linha de caminho de ferro, etc.) uma vez que mais facilmente se localiza e minimiza o número de atravessamentos;

- *cutline*: definida ao longo de um corredor de forma a interceptar o tráfego ao longo de apenas um “eixo”.

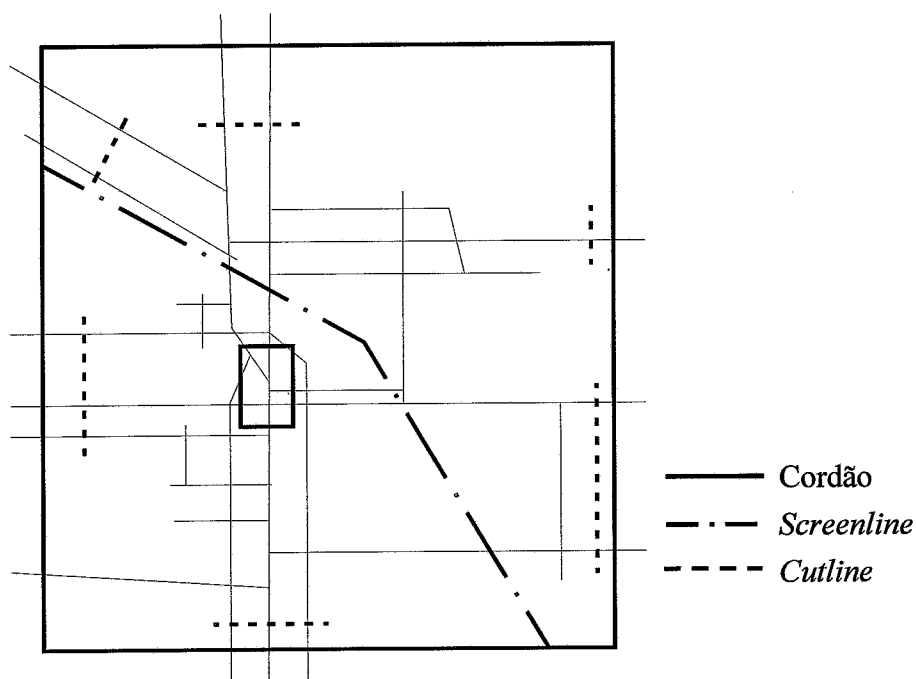


Figura III.21 - Exemplo de cordão, *screenline* e *cutline*

No segundo e terceiro nível incluem-se variáveis geralmente relacionadas com tempos ou velocidades de percurso num dado itinerário e de variáveis ligadas a volumes nos arcos ou atrasos em nós.

5.2.3 Metodologias de avaliação do desempenho de modelos

5.2.3.1 *Preâmbulo*

Na bibliografia consultada (EC, 2000; Barton-Aschman Associates Inc. & Cambridge Systematics Inc., 1997; HMSO, 1996; El-Mously, 1994; Taylor, 1979) existem vários tipos de análises para a avaliação dos resultados de modelos, que consistem no cálculo de parâmetros ou na realização de análises estatísticas com os valores das variáveis modeladas nos diferentes locais k para os quais se dispõe de valores observados. Estes parâmetros e análises encontram-se a seguir descritas:

- i) Diferença Absoluta (DA), calculada como a diferença existente entre o valor modelado (Y) e o valor médio observado (X), sendo de observar que o sinal, positivo ou negativo, pode ser um importante indicador:

$$DA = \sum_k Y_k - \sum_k X_k \dots\dots\dots(III.59)$$

- ii) Diferença Relativa (DR) em que os valores são normalizados de forma a remover os efeitos de escala, podendo ser expressa sobre a forma de percentagem ou de rácio:

$$DR = \frac{\sum_k Y_k - \sum_k X_k}{\sum_k X_k} ; \dots\dots\dots(III.60)$$

- iii) Representação gráfica das variáveis observadas e modeladas (Figura III.22) para, de uma forma expedita, poderem ser detectadas visualmente discrepâncias entre os valores registados:

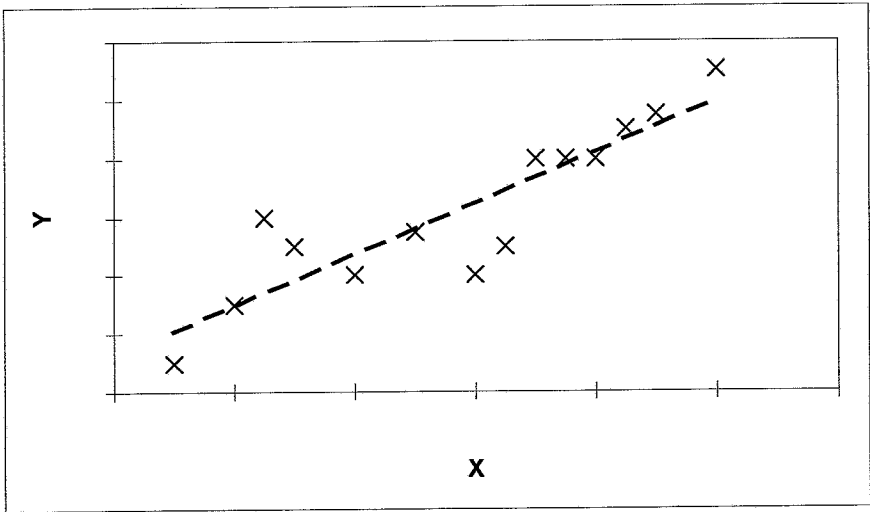


Figura III.22- Representação gráfica das variáveis

- iv) Medidas estatísticas de forma a inferir o grau com que as variáveis se encontram relacionadas:

- regressão dos valores observados e modelados:

$$Y = a + b \cdot X$$

em que os valores esperados para as constantes a e b são 0 e 1, respectivamente;

- medidas do grau de correlação entre os valores observados e modelados:
 - coeficiente de determinação (r^2), ou seja, a percentagem da variância de Y explicada pela regressão;
 - variância residual $\left(\sum_k (Y_k - a - b \cdot X_k) \right)$, ou seja, a medida de variação de Y em torno da recta ajustada;
- testes de diferenças entre as médias e as variâncias dos valores observados e modelados:
 - teste t de Student;
 - análise da variância.

De um modo geral, o cálculo destes parâmetros ou a aplicação das análises preconizadas têm a vantagem de serem facilmente realizadas com o recurso a programas de cálculo automático usuais, tais como folhas de cálculo.

No entanto, refira-se o facto de o peso associado aos eventuais erros inerentes às diferenças entre observado e estimado ser o mesmo. Por exemplo, em termos relativos, uma diferença de 10 em 100 veículos é equivalente a uma diferença de 200 em 2 000 veículos e, enquanto a primeira situação corresponde a uma condição de tráfego fluida em que a diferença tem um impacto mínimo no sistema, a segunda já pode corresponder a um arco congestionado em que a discrepância pode representar a diferença entre estar-se na presença de uma situação instável ou estar-se perante uma situação estável. Igualmente se poderia dizer, por exemplo, que uma diferença absoluta de 50 veículos é um grande erro se os fluxos são da ordem da centena mas é insignificante se os fluxos forem da ordem dos milhares

Por outro lado, relativamente aos dois primeiros parâmetros, as diferenças entre os valores modelados e observados podem-se anular, uma vez que o modelado pode ser superior ou inferior ao observado, resultando valores para os parâmetros que poderiam conduzir a conclusões erradas sobre o funcionamento do modelo.

De forma a contornar estes problemas têm sido desenvolvidos e propostos não só outros tipos de análises como também o recurso a outros tipos de parâmetros de aferição do desempenho de modelos, que se descrevem nos sub-capítulos seguintes.

5.2.3.2 A metodologia “Inglesa”

O manual recomendado por diversos departamentos de transporte do Reino Unido¹⁴, denominado por *Traffic Appraisal in Urban Areas* (HMSO, 1996), aponta dois métodos analíticos alternativos para a análise comparativa entre variáveis observadas e modeladas. As variáveis definidas por este manual para a realização destas análises são os volumes horários direccionais (q) e os tempos de percurso (tp).

O primeiro método consiste na análise estatística dos valores observados e modelados das variáveis através do recurso à Regressão Linear Simples e à Análise de Correlação.

A primeira consiste em descrever o grau de relacionamento linear entre a variável independente volume observado (q_o) e a variável dependente volume modelado (q_m) ou seja:

$$q_{m_i} = a + b \cdot (q_{o_i} - \overline{q_o}) + \varepsilon_i \dots\dots\dots (III.61)$$

com

- q_{m_i} – volume horário modelado no arco i;
- q_{o_i} – volume horário observado no arco i;
- $\overline{q_o}$ - média dos volumes observados:

$$\overline{q_o} = \frac{1}{N} \sum_i^N q_{o_i} \dots\dots\dots (III.62)$$

- N – número de arcos em que se dispõe de observações
- ε_i – erro aleatório associado a q_{m_i}.

A aplicação do Método dos Mínimos Quadrados (ver Guimarães, 1999) ao conjunto constituído pelos valores observados e modelados (q_{o_i}, q_{m_i}), permite estimar os parâmetros a e b, nomeadamente:

$$a = \overline{q_m} = \frac{1}{N} \sum_i^N q_{m_i} \dots\dots\dots (III.63)$$

¹⁴ Highways Agency, Scottish Office Development Department, Welsh Office, Department of the Environment for Northern Ireland, Department of Transport

$$b = \frac{\sum_i [(q_{o_i} - \overline{q_o}) \cdot (q_{m_i} - \overline{q_m})]}{\sum_i (q_{o_i} - \overline{q_o})} \dots\dots\dots (III.64)$$

com

$\overline{q_m}$ - média dos volumes modelados;
 $\overline{q_o}$ - média dos volumes observados;
 q_{m_i} - volume horário modelado no arco i ;
 q_{o_i} - volume horário observado no arco i .

A segunda análise consiste no cálculo do coeficiente de correlação amostral (r), por forma a especificar como as variáveis se relacionam, que é definido por:

$$r = \frac{\sum_i [(q_{o_i} - \overline{q_o}) \cdot (q_{m_i} - \overline{q_m})]}{\sqrt{\sum_i (q_{o_i} - \overline{q_o})^2} \cdot \sqrt{\sum_i (q_{m_i} - \overline{q_m})^2}} \dots\dots\dots (III.65)$$

com

$\overline{q_m}$ - média dos volumes modelados;
 $\overline{q_o}$ - média dos volumes observados;
 q_{m_i} - volume horário modelado no arco i ;
 q_{o_i} - volume horário observado no arco i ;
N - número de arcos em que se dispõe de observações.

Este primeiro método consiste então em determinar o declive da recta de regressão (b) e o coeficiente de correlação (r), apontando como critérios para estes dois parâmetros os apresentados no quadro seguinte.

Parâmetro	Critério
b	[0,90;1,10]
r	≥0,95

Quadro III.6 - Critérios para os parâmetros associados à regressão e correlação

Será de ter em atenção que a interpretação dos resultados apenas com estes dois parâmetros pode conduzir a conclusões erradas. De facto, quando existe uma elevada gama de valores para as variáveis, o que se encontra omnipresente quando se analisam volumes de tráfego de diferentes arcos de uma rede viária, associada à variação temporal normal de dia para dia dos volumes, os valores para estes parâmetros podem não ter significado (HMSO, 1996).

Deste modo, na tentativa de ultrapassar este problema, recomenda-se a utilização de uma representação gráfica das variáveis observadas, apresentando o intervalo de confiança a 95%, e modeladas, tal como exemplificado anteriormente (cf Figura III.22), verificando-se visualmente o ajustamento dos valores à recta de regressão e tendo em atenção a amplitude do intervalo de confiança (HMSO, 1996).

O segundo método descrito consiste na comparação dos volumes e dos tempos de percurso, modelados e observados, introduzindo-se o cálculo da denominada “Estatística GEH”, inspirada no teste do chi-quadrado (χ^2).

Esta “estatística” pode ser calculada individualmente para cada arco, para conjuntos de arcos que constituem um cordão ou uma *screenline*, ou como uma medida global para toda a rede, sendo dado por:

$$GEH = \sqrt{\frac{(q_m - q_o)^2}{0.5 \cdot (q_m + q_o)}} \quad \vee \quad \overline{GEH} = \frac{1}{N} \cdot \sqrt{\sum_i \frac{(q_{mi} - q_{oi})^2}{0.5 \cdot (q_{mi} + q_{oi})}} \quad \dots (III.66)$$

com

q_{mi} – volume horário modelado no arco i ;

q_{oi} – volume horário observado no arco i ;

N – número de arcos em que se dispõe de observações.

Este parâmetro empírico sugerido por Geoff Hovers da Câmara de Londres (Van Vliet, 2002) deve ser interpretado como a raiz quadrada do produto da diferença absoluta ($q_m - q_o$) pela diferença relativa ($\frac{q_m - q_o}{0.5 \cdot (q_m + q_o)}$), podendo-se então considerar

que a estatística GEH incorpora tanto os erros absolutos como relativos. Observe-se que a diferença relativa é calculada com a média dos valores observado e modelado no denominador de modo a evitar eventuais problemas se algum destes valores for nulo.

Com esta definição introduz-se um parâmetro menos sensível aos problemas já referidos quando apenas se usam as diferenças absolutas e/ou as relativas. Citando um exemplo (Van Vliet, 2002), um erro de 20 em 100 é equivalente a um erro de 90 em 2000 e ambos apresentam um GEH semelhante (aproximadamente igual a 2), ou seja, o mesmo valor para o parâmetro em duas situações distintas de procura mas para as quais o impacto da diferença entre observado e modelado é semelhante.

Na comparação de volumes observados e modelados, e de forma a se ter uma ordem de grandeza para o parâmetro do GEH, os arcos com valor igual ou inferior a 5 indicam um ajustamento aceitável enquanto que os arcos com valores superiores a 10 provavelmente necessitam de uma maior atenção (Van Vliet, 2002).

Será ainda de observar relativamente a esta estatística que o GEH-quadrado não deve ser interpretado como o Chi-quadrado, no que se refere a indicar uma medida de ajuste entre o observado e o modelado. De facto, de um ponto de vista puramente estatístico todos os modelos estão errados no sentido em que falham na reprodução das observações reais mas, no entanto, deve-se atender a que o modelo, embora não completamente exacto, é adequado para o objectivo em que é aplicado (Van Vliet, 2002).

No Quadro III.7 são apontados os parâmetros habitualmente utilizados, caracterizadores das diferenças absolutas/relativas entre as variáveis de tráfego, nomeadamente entre volumes observados (q_o) e modelados (q_m) e entre tempos de percurso observados (tp_o) e modelados (tp_m), bem como os critérios admissíveis preconizados no referido Manual (HMSO, 1996).

Um modelo que não cumpra estas metas pode ser considerado admissível se as maiores discrepâncias se concentrarem fora da área de principal de estudo. Inversamente se o modelo cumprir todos os parâmetros mas com discrepâncias significativas na área principal de estudo, o mesmo deve ser considerado inaceitável (HMSO, 1996).

Parâmetro	Critério	
$P85 = \%Arcos\ com\ \begin{cases} q_m - q_o \leq 100 & \text{se } q_o \leq 700 \\ \frac{ q_m - q_o }{q_o} \leq 15\% & \text{se } 700 < q_o \leq 2\ 700 \\ q_m - q_o \leq 400 & \text{se } q_o > 2\ 700 \end{cases}$	$\geq 85\%$	...(III.67)
$DR^* = \frac{\sum V_m - V_o }{\sum V_o}$	$\leq 5\%$	...(III.68)
$GEHM^{**} = \overline{GEH}$	≤ 2	...(III.69)
$GEH5 = \%Arcos\ com\ GEH \leq 5$	$\geq 85\%$	...(III.70)
$GEHS^* = \overline{GEH}$	≤ 4	...(III.71)
$Tp = \%Percursos\ com\ \frac{ tp_o - tp_m }{tp_o} \times 100 < 15\% \text{ (ou 1 minuto)}$	$\geq 85\%$	...(III.72)

* - No conjunto de arcos que “pertencem” a um cordão ou *screenline*
** - Calculado para 85% dos arcos com “melhores” GEH

Quadro III.7 - Parâmetros e critérios para as diferenças

5.2.3.3 A metodologia da Federal Highway Agency – FHWA (Estados Unidos)

A metodologia definida no Manual recomendado pelo FHWA (Barton-Aschman Associates Inc. & Cambridge Systematics Inc. 1997) consiste fundamentalmente na comparação de volumes observados e modelados nos arcos e do cálculo do parâmetro global denominado por Distância Total Percorrida (VMT–*Vehicle Miles of Travel*), definido como o somatório do produto do volume no arco pelo comprimento do mesmo:

$$VMT = \sum_k q_k \cdot d_k \dots\dots\dots(III.73)$$

com
q_k– volume no arco k;
d_k – comprimento no arco k.

A utilização deste parâmetro reside no facto de nos Estados Unidos ser obrigatório para os modelos de transporte nas áreas urbanas fixadas pela Agência de Protecção Ambiental (EPA – *Environment Protection Agency*), tal como definido pelo *Clean Air Act Amendments of 1990* (FHWA, 1992).

A utilização deste parâmetro também permite de certa forma a verificação dos vários passos do modelo de transportes, uma vez que tem em conta o número de viagens (Geração), o comprimento das mesmas (Distribuição) e os caminhos escolhidos (Afecção). Refira-se ainda a utilidade de se realizar o cálculo deste parâmetro por habitação e por utilizador para a identificação de fontes de erro do modelo. Por exemplo um modelo que sobrestima este parâmetro mas em que o mesmo apresenta valores razoáveis por utilizador pode apontar para erros na modelação da rede.

A determinação do parâmetro VMT real deve ser realizada de acordo com o definido no Manual de Trabalhos de Campo *Highway Performance Monitor System* (FHWA, 1985), existindo também uma base de dados que inclui estimativas deste parâmetro para vários tipos de vias no que diz respeito à sua classificação funcional. Observe-se que esta comparação, ao ser realizada com valores estimados, terá que ter em atenção os erros que lhes estão associados

O segundo nível de testes definido pelo FHWA concentra-se na comparação dos volumes de tráfego observados e modelados agregados em *screenlines*, em *cutlines*, por tipo de vias e por áreas bem como ao nível individual, sendo propostos os parâmetros a seguir definidos:

- coeficiente de determinação ($k = 1, \dots, N$):

$$r^2 = \left(\frac{\sum_k ((q_{o_k} - \overline{q_o}) \cdot (q_{m_k} - \overline{q_m}))}{\sqrt{\sum_k (q_{o_k} - \overline{q_o})^2} \cdot \sqrt{\sum_k (q_{m_k} - \overline{q_m})^2}} \right)^2 \dots\dots\dots (III.74)$$

- desvio do erro médio quadrático relativo (*Percent Root Mean Square of the Error* - %RMSE; $k = 1, \dots, N$):

$$\%RMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_k (q_{m_k} - q_{o_k})^2}{(N-1)}}}{\frac{\sum_k q_{o_k}}{N}} \times 100 \dots\dots\dots(III.75)$$

- erro percentual por área ($k = 1, \dots, A_r$):

$$\%A_r = \frac{\sum_k q_{m_k}}{\sum_k q_{o_k}} \dots\dots\dots(III.76)$$

- erro percentual por tipo de via ($k = 1, \dots, T_s$):

$$\%T_s = \frac{\sum_k q_{m_k}}{\sum_k q_{o_k}} \dots\dots\dots(III.77)$$

com

- q_{o_k} – volume observado no arco k ;
- $\overline{q_o}$ - média dos volumes observados;
- q_{m_k} – volume modelado no arco k ;
- $\overline{q_m}$ - média dos volumes modelados;
- N – número total de arcos com observações;
- A_r – número total de arcos com observações na área r ;
- T_s – número total de arcos tipo s com observações;

Por último ainda é referido no Manual que se devem comparar as velocidades/tempos de percurso reproduzidas pelo modelo com as observadas, por tipo de vias e por áreas. A este nível não é apresentado nenhum parâmetro, apenas sendo referido que deverão ser considerados vários segmentos de vias de forma a diluir os atrasos devidos às intersecções e que a avaliação deve ser realizada tendo presente o valor médio, mínimo e máximo da variável observada.

No que diz respeito aos critérios para estes parâmetros, embora seja salientado que “um critério absoluto para a avaliação de todos os modelos não pode ser definido exactamente”, são apontados vários valores que fornecem uma boa orientação para a



avaliação do desempenho relativo dos modelos. No quadro seguinte apresentam-se os valores para os critérios recomendados não só pelo FHWA como pelo MDOT (*Michigan Department of Transport*).

Parâmetro		Critério	
		FHWA	MDOT
VMT		≤ 30%	
r^2		≥ 0,88	
%RMSE		≤ 3%	
%A _r		≤ 5%	
%T _s	Auto-estrada	≤ 7%	≤ 6%
	Via Principal	≤ 10%	≤ 7%
	Via Secundária	≤ 15%	≤ 10%
	Via local	≤ 25%	≤ 20%

Quadro III.8 - Critérios para os parâmetros preconizados pelo FHWA e MDOT

Note-se que ao nível dos volumes de tráfego agregados em *screenlines* e em *cutlines* o MDOT aponta como limites máximos das diferenças relativas dos volumes horários observados e modelados os valores de 5% e 10% respectivamente, enquanto o FHWA para as mesmas diferenças mas relativas ao Tráfego Médio Diário Anual (TMDA) sugere o gráfico apresentado na Figura III.23.

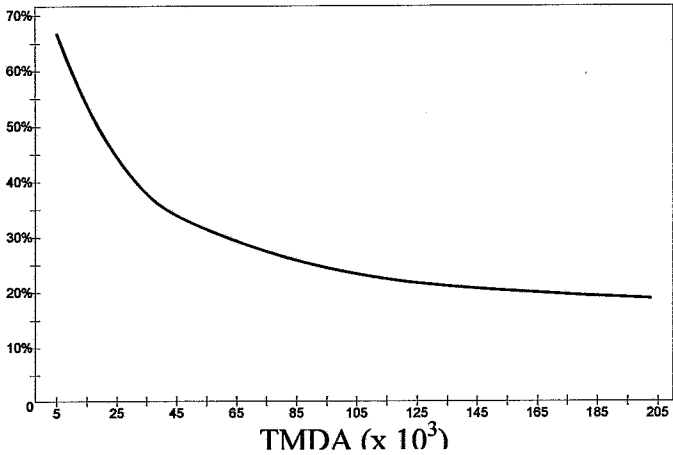


Figura III.23 - Desvio total máximo aceitável dos volumes em *screenlines*

Relativamente às diferenças relativas dos volumes em cada arco, considerados individualmente, são apontados como limites os valores constantes no Quadro III.9, observando-se que as diferenças máximas permitidas referem-se ao TMDA.

TMDA (Veículos)	FHWA	MDOT
< 1 000	≤ 60%	≤ 200%
1 000 – 2 500	≤ 47%	≤ 100%
2 500 – 5 000	≤ 36%	≤ 50%
5 000 – 10 000	≤ 29%	≤ 25%
10 000 – 25 000	≤ 25%	≤ 20%
25 000 – 50 000	≤ 22%	≤ 15%
> 50 000	≤ 21%	≤ 10%

Quadro III.9 - Desvio total máximo aceitável dos volumes diários

No que concerne aos volumes dos arcos para períodos horários o FHWA recorre aos recomendados pela CCTA-*Contra Costa Transit Authority* (JHK Associates, Dowling Associates, 1992) de S. Francisco que, em função do tipo de via, fixa as diferenças máximas admissíveis (Δ) e o número mínimo de arcos em que tal se deve verificar (%Arcos), apresentando estes valores no quadro seguinte

Tipo de Via	$\Delta = \frac{ q_o - q_m }{q_o}$	%Arcos
Auto-estrada	20%	75%
	10%	50%
Via principal (TMDA ≥ 10 000 veíc.)	30%	75%
	15%	50%
Movimentos de viragem principais (≥ 1000 veíc./h)	20%	50%
Movimentos de viragem secundários (500 – 1000 veíc./h)	20%	30%

Quadro III.10 - Desvio total máximo aceitável dos volumes horários

Por último, convém referir que existe ainda uma metodologia de calibração/validação desenvolvida para a FWHA (Owen, 1996), mais dirigida para os modelos microscópicos da família denominada por TRAF (Kaman Sciences Corporation, 1996), nomeadamente para os modelos NETSIM (*Network Simulation*) e FRESIM (*Freeway Simulation*).

Esta metodologia define quatro níveis de testes estatísticos correspondentes aos graus de agregação das variáveis para a comparação dos valores reais com os modelados, a seguir descritos de uma forma muito sucinta:

- i) Estatística 1 – cálculo da média e desvio padrão para as diversas variáveis de tráfego modeladas e observadas;
- ii) Estatística 2 – realização dos testes de normalidade de χ^2 e de Kolmogorov-Smirnov unidimensional;
- iii) Estatística 3 - realização do teste de Kolmogorov-Smirnov bidimensional;
- iv) Estatística 4 - comparação de padrões.

5.2.3.4 Outras “metodologias”

Aitken (1993) sugere o cálculo do denominado “coeficiente de eficiência” (E), que conjuntamente com o coeficiente de determinação (r^2) testa os erros sistemáticos de um modelo, sendo dado por:

$$E = \frac{\sum_k (q_{m_k} - \overline{q_m})^2 - \sum_i (q_{m_k} - q_{o_k})^2}{\sum_k (q_{m_k} - \overline{q_m})^2} \dots\dots\dots (III.78)$$

com

- q_{o_k} – volume observado no arco k ;
- q_{m_k} – volume modelado no arco k ;
- $\overline{q_m}$ - média dos volumes modelados.

De acordo com este autor, se as variáveis de tráfego modeladas se encontrarem bastante correlacionadas com as observadas mas existirem erros sistemáticos então o Coeficiente de Eficiência é muito menor que o coeficiente de determinação ($E \ll r^2$).

Pelo contrário, se o modelo se encontra livre de qualquer erro sistemático então estes dois coeficientes são iguais ($E = r^2$).

Pindyck e Rubinfeld (1981) sugeriram dois outros parâmetros denominados por RMSE (*Root Mean Square Error*)¹⁵ e PRMSE (*Percent Root Mean Square Error*), afirmando que os mesmos constituem uma boa medida do desempenho do modelo, sendo o primeiro calculado em termos absolutos e o segundo em termos relativos, nomeadamente:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_k (q_{m_k} - q_{o_k})^2} \dots\dots\dots \text{(III.79)}$$

ou

$$\text{PRMSE} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_k \left(\frac{q_{m_k} - q_{o_k}}{q_{o_k}} \right)^2} \dots\dots\dots \text{(III.80)}$$

com

- q_{o_k} – volume observado no arco k ;
- q_{m_k} – volume modelado no arco k ;
- N – número total de arcos com observações.

Relativamente ao parâmetro RMSE Bovy (1985) afirmou: “O parâmetro RMSE é francamente recomendado para testar e analisar o desempenho do modelo de afectação, principalmente porque, caso a amostra de arcos seleccionada seja representativa, este parâmetro relativo à amostra constitui uma estimativa não enviesada do erro médio da população, o que permite retirar conclusões sobre os volumes reais nos arcos.[...] (pelo que) o parâmetro RMSE pode ser utilizado como uma medida de confiança para as variáveis modeladas.”

Deste modo, é proposta a representação gráfica dos pontos definidos pelo par variáveis observadas (q_o) e modeladas (q_m) o que permite identificar os que se encontram fora da fronteira definida com base neste parâmetro ($q_o, q_m \pm \text{RMSE}$), conforme o exemplo apresentado na figura seguinte.

¹⁵ Observe-se que o cálculo deste parâmetro expressa o desvio padrão da amostra

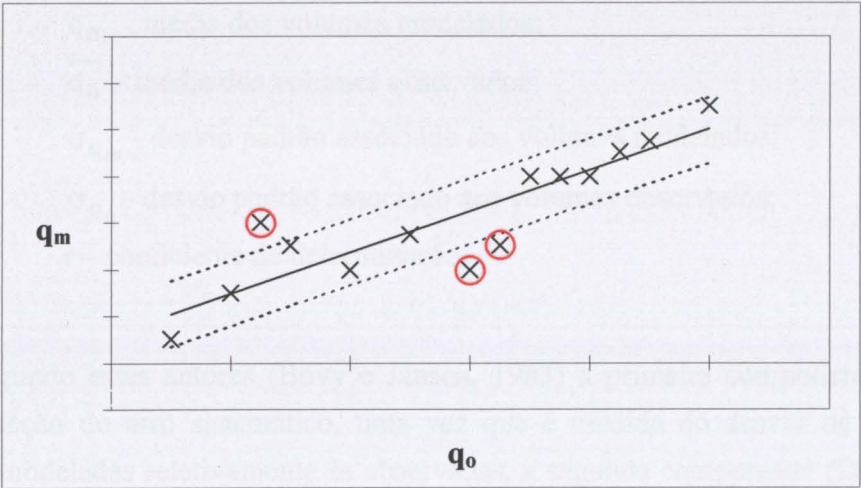


Figura III.24 – Exemplo da utilização do parâmetro RMSE

Alternativamente, Bovy e Jansen (1983) propõem que este parâmetro seja decomposto para uma melhor detecção e compreensão dos factores que causam as diferenças entre as variáveis tráfego observadas e modeladas. Deste modo, o cálculo do parâmetro RMSE seria realizado através da adição de 3 componentes, nomeadamente:

- i) Quadrado da diferença das médias das variáveis observadas e modeladas, que representa a diferença média ou o “desvio” (AE – *Average Error*);
- ii) Quadrado da diferença dos desvios padrões das variáveis observadas e modeladas, ou seja , a variância (DSD – *Difference Standard Deviation*);
- iii) Covariância entre as variáveis observadas e modeladas (CV – *Covariation*).

Assim, o parâmetro RMSE passa a ser definido por:

$$RMSE = AE^2 + DSD^2 + CV^2 \dots\dots\dots (III.81)$$

em que

$$AE = \overline{q_m} - \overline{q_o} \dots\dots\dots (III.82)$$

$$DSD = \sigma_{q_m} - \sigma_{q_o} \dots\dots\dots (III.83)$$

$$CV = 2 \cdot (1 - r) \cdot \sigma_{q_m} \cdot \sigma_{q_o} \dots\dots\dots (III.84)$$

com

- $\overline{q_m}$ - média dos volumes modelados;
- $\overline{q_o}$ - média dos volumes observados;
- σ_{q_m} - desvio padrão associado aos volumes modelados;
- σ_{q_o} - desvio padrão associado aos volumes observados;
- r – coeficiente de determinação.

Segundo estes autores (Bovy e Jansen, 1983) a primeira componente (AE) dá uma indicação do erro sistemático, uma vez que é medida do desvio da média das variáveis modeladas relativamente às observadas, a segunda componente (DSD) traduz a capacidade do modelo reproduzir a variância dos valores esperados, e a última (CV) representa o erro não sistemático.

Assim, um bom modelo deverá conduzir a valores baixos para as duas primeiras componentes, devendo a relativa à variância apresentar um valor muito próximo de zero. Quanto à terceira componente, é apontado que a mesma poderá apresentar valores altos uma vez que não é realista que as variáveis modeladas e observadas estejam perfeitamente correlacionadas.

Ziad El-Mously (1994) propõe/cita alguns parâmetros calculados com base nos volumes de tráfego observados e modelados, para a avaliação do desempenho de um modelo de afectação de tráfego, dividindo-os em paramétricos e não paramétricos.

As medidas não paramétricas não necessitam de nenhum pressuposto sobre a distribuição dos fluxos de tráfego, apenas requerendo que as variáveis volume observado e volume modelado sejam independentes.

Dentro deste grupo são apontadas as já referidas diferenças absolutas (DA) e relativas (DR). Segundo Ziad El-Mously (1994) o cálculo destes parâmetros pode conduzir a que os seus valores se aproximem de zero uma vez que os erros positivos podem ser anulados pelos erros negativos. Alternativamente e de modo a ir de encontro a este problema, propõe o cálculo do valor absoluto destas diferenças, ou seja:

$$|DA| = \frac{1}{N} \sum_k |q_{mk} - q_{ok}| \dots\dots\dots (III.85)$$

e

$$|DR| = \frac{1}{N} \sum_i \left| \frac{q_{m_k} - q_{o_k}}{q_{o_k}} \right| \dots\dots\dots (III.86)$$

com

- q_{o_k} – volume observado no arco k ;
- q_{m_k} – volume modelado no arco k ;
- N – número total de arcos com observações.

Os testes paramétricos referidos por Ziad El-Mously (1994) assumem que os fluxos de tráfego entre qualquer par Origem-Destino seguem uma distribuição multinomial. Neste tipo de teste refere os parâmetros denominados por “Ratio da Máxima Verosimilhança” (LR-*Likelihood Ratio*) e por “Ganho de Informação” (IG-*Information Gain*), definidos por:

$$LR = \sum_k \left(\frac{q_{m_k}}{q_{o_k}} \right)^{q_{o_k}} \dots\dots\dots (III.87)$$

e

$$IG = \sum_k \left[\frac{q_{o_k}}{t_{o_k}} \cdot \log \left(\frac{q_{o_k} \cdot t_{m_k}}{q_{m_k} \cdot t_{o_k}} \right) \right] \dots\dots\dots (III.88)$$

com

- q_{o_k} – volume observado no arco k ;
- q_{m_k} – volume modelado no arco k ;
- t_{o_k} – tempo de percurso observado no arco k ;
- t_{m_k} – tempo de percurso modelado no arco k ;

Este autor afirma que o primeiro parâmetro tende para a unidade à medida que o desempenho do modelo se aperfeiçoa e que o parâmetro IG se aproxima de zero à medida que o modelo melhor se ajusta à realidade.

5.2.4 Amostragem

Uma vez que a avaliação do desempenho de um modelo de afectação de tráfego é geralmente realizada por comparação de valores de variáveis de tráfego, observados *versus* modelados, após a selecção dos parâmetros deverá ser preparada a metodologia para a recolha das variáveis que permitam o seu cálculo.

Numa rede urbana, o número de arcos é de tal modo extenso que uma campanha de recolha de dados de tráfego em toda a rede se torna proibitiva, quer em termos de custos quer em termos de tempo. Assim, deve-se inferir o comportamento da rede através da análise de amostras com as quais se pretende caracterizar a rede modelada.

No entanto, será de observar que a comparação de valores observados relativamente aos modelados é necessária mas não suficiente na medida em que, se se utilizar o mesmo conjunto, ou conjuntos estreitamente correlacionados de dados para a calibração e para a validação do modelo, estar-se-á a “adulterar” os resultados e as medidas dos parâmetros obtidos podem não reflectir a realidade. De facto, ao se utilizar um modelo de simulação, espera-se que o mesmo reproduza os dados com os quais foi calibrado, pelo que a sua validação apenas com os mesmos dados é um teste inadequado para se avaliar o desempenho do modelo.

De forma a ultrapassar esta questão deve-se recorrer a dois conjuntos de dados distintos (*dual sample scheme*) em que o modelo é calibrado com um conjunto de valores e o segundo conjunto será utilizado na validação. Assim deverão ser seleccionados dois conjuntos de arcos independentes para a recolha de dados, garantindo-se, segundo o apresentado no *Traffic Appraisal Manual* (HMSO, 1996), esta independência através da fixação do critério de os arcos estarem separados por pelo menos um nó - centróide ou intersecção. Esta condição, embora nada mais seja afirmado no referido manual, deve ser entendida que ao nó de separação também estejam associados os respectivos arcos, tal como se exemplifica na figura seguinte em que se poderia garantir que os volumes de tráfego nos arcos *a* e *d* são independentes.

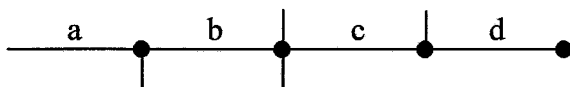


Figura III.25 – Exemplo de selecção de arcos com observações independentes

Uma outra hipótese será definir dois períodos diferentes (por exemplo, a ponta da manhã e a ponta da tarde) garantindo assim a separação das amostras. No entanto, ao se utilizar este processo será necessário proceder-se à construção de dois modelos no que concerne à caracterização da procura para cada um dos períodos o que pode implicar um esforço exagerado de modelação.

A questão da definição do tamanho da amostra é um assunto pouco ou mesmo nada referido, tendo na bibliografia consultada sido apenas encontrada uma referência no *Traffic Appraisal Manual* (HMSO, 1991):

“O número de locais de contagem necessários depende da escala do modelo: para pequenos esquemas a comparação realizada com 10 contagens ou menos pode ser suficiente, para um esquema típico o número de contagens deverá ser no mínimo de 20 ao qual deverão ser incluídos muitos mais locais à medida que a escala do modelo aumenta.”

Por último, será ainda de observar que relativamente à variável tempo de percurso, nada é referido nem quanto à cobertura de rede que se deve garantir nem quanto aos “comprimentos” mínimo e máximo de cada um dos percursos. Relativamente a este ponto, apenas no já referido manual seguido pelo FHWA (Barton-Aschman Associates Inc. & Cambridge Systematics Inc., 1997), é feita uma breve referência, notando-se aí que “deverão ser considerados vários segmentos de vias de forma a diluir os atrasos devidos às intersecções”.

5.2.5 Síntese

Face aos parâmetros de aferição descritos nos pontos anteriores, constata-se que a característica mais comum a que recorrem é a da utilização no seu cálculo dos volumes de tráfego como a variável fundamental. Este facto é perfeitamente justificável pela simples razão de ser a variável de mais fácil observação e que a envolve menores recursos para a sua recolha.

A principal crítica feita a muitos destes testes é, como foi visto, a de se associar o mesmo peso aos eventuais erros inerentes às diferenças entre observado e estimado ou

estas diferenças se anularem, podendo ainda acrescentar-se a desvantagem de nada se poder concluir se os volumes estão sobre ou subestimados.

Relativamente às análises estatísticas deve-se ter especial cuidado, citando-se mais uma vez Van Vliet (2002): “de um ponto de vista puramente estatístico todos os modelos estão errados no sentido de falharem no que se refere a reproduzir observações reais mas, no entanto, deve-se atender a que o modelo, embora não completamente exacto, é adequado para o objectivo em que é aplicado”.

O único parâmetro que tem em atenção a algumas destas questões é o de carácter empírico e denominado por “Estatística-GEH”.

No entanto, o recurso aos volumes de tráfego não é suficiente para a avaliação do desempenho de modelos pelo que o recurso à caracterização das variáveis de tráfego tempos de percurso/velocidades também é focado, embora de forma mais ligeira, pelas diversas metodologias.

Neste ponto será de salientar que a aplicação do parâmetro VMT, preconizado pelo FHWA não pode ser transferível visto que não existem estimativas do mesmo para outros contextos que nas áreas urbanas fixadas no CAAA (EUA). Por outro lado, será ainda de acrescentar que ao se utilizar estimativas, face à impossibilidade de se calcular o seu valor real para uma rede urbana derivado do grande número de recursos a envolver, a consequente inerência de erros deve ser devidamente ponderada.

Relativamente aos critérios associados aos parâmetros, apenas as metodologias preconizadas pelo FHWA (Barton-Aschman Associates Inc. & Cambridge Systematics Inc., 1997) e pelo TAM (HMSO, 1996) apontam as condições exactas que os mesmos devem satisfazer. No entanto, mesmo nestes casos, nada é referido nem quanto ao modo como os valores limites foram obtidos nem quanto ao grau de erro admissível, ou seja, quais os impactos no desempenho final do modelo que resultam do cumprimento destes valores.

Observe-se, como já muitas vezes salientado, que os erros são inerentes ao desenvolvimento de um modelo, particularmente os erros de simplificação, de previsão e de transferência, pelo que os critérios fixados devem subentender este facto, sendo

então indispensável avaliar qual o impacto no desempenho de um modelo das diversas fontes de erro.

Por outro lado, estes critérios também devem ter subjacente as flutuações temporais da procura, com a consequente implicação nas variáveis de tráfego utilizadas para a avaliação dos modelos. Esta questão é abordada em ambas as metodologias de referência aqui citadas (Barton-Aschman Associates Inc. & Cambridge Systematics Inc., 1997; HMSO, 1991), nomeadamente para a determinação dos intervalos de confiança das variáveis de tráfego, embora nada seja adiantado quanto à fixação dos valores dos critérios de modo a ter em atenção este facto.

Por último, é de realçar também a escassez de referências relativamente à fixação das amostras, não só quanto à sua dimensão como também da sua caracterização (tipo de vias, comprimento de percursos,...) indispensável tanto para o processo de calibração como para a posterior validação. Assim, verifica-se que a subjectividade (espírito crítico/experiência) associada aos recursos disponíveis estão sempre fortemente associados a esta tarefa da definição das amostras.

5. 3 Procedimentos de calibração

5.3.1. Enquadramento

Durante o desenvolvimento de um modelo devem ser realizadas verificações específicas de modo a assegurar que os resultados da afectação estão de acordo com a “realidade”, designadamente ao nível das velocidades e dos volumes de tráfego nos arcos bem como dos atrasos nos nós.

Antes de se iniciar o processo de calibração a rede deve ser verificada relativamente à existência de erros de codificação, devendo-se utilizar todas as potencialidades dos programas para os procurar, caso existam. Geralmente, os eventuais erros mais comuns são:

- arcos adicionais entre pares de nós;
- arcos conectados a nós errados;

- omissões de arcos e/ou nós;
- ligações incorrectas a centróides;
- geometria de nós e/ou arcos incorrecta;
 - nós:
 - tipo de intersecção;
 - número de ramos de entrada/saída
 - movimentos permitidos;
 - afectação de vias;
 - regras de prioridade;
 - sequências e tempos de fases, no caso de intersecções controladas por sinais luminosos, e desfasamentos caso estes sejam coordenados;
 - arcos:
 - comprimentos;
 - sentidos;
 - vias exclusivas;
- incongruências nos valores das variáveis de funcionamento para arcos ou nós semelhantes;

Após a verificação da rede modelada, de um modo geral é quase sempre necessário realizar correcções ao modelo, devendo os mesmos obedecer a regras lógicas e só serem utilizados quando justificável, ou seja, nunca se deve recorrer a ajustamentos arbitrários de variáveis “mensuráveis”, tais como a comprimentos dos arcos ou à geometria dos nós, bem como a ajustamentos artificiais às variáveis de funcionamento para forçar uma “aproximação” artificial às condições observadas.

Esta tarefa constitui o objectivo da fase de calibração que, como já salientado, é o da aproximação do modelo à realidade, podendo-se dizer que consiste num processo iterativo em que se realizam as quatro acções a seguir enunciadas (El-Mously, 1994):

- i) Seleccção da técnica de afectação de tráfego: os erros decorrentes da técnica de afectação devem-se à selecção entre modelos com ou sem restrições de capacidade e determinísticos ou estocásticos;
- ii) Correcção da oferta: alteração das características físicas da rede modelada de forma a torná-la mais representativa da rede real através da mudança de localização ou do número de ligações dos centróides para aperfeiçoar o

“acesso” das zonas à rede ou através da introdução e/ou remoção de arcos ou através da correcção das características dos arcos;

- iii) Correcção dos valores para as variáveis de funcionamento: estas variáveis determinam a relação entre os fluxos de tráfego e os tempos de viagem da rede sendo, como já foi referido, os seus valores estimados com base em métodos e técnicas existentes e podendo estes ter que ser corrigidos em função do funcionamento do modelo.
- iv) Correcção da procura: a procura de transporte é uma das principais fontes de discrepância entre os valores dos volumes de tráfego modelados e os observados numa rede rodoviária, ligada a desvios na Matriz Origem-Destino que pode ser “corrigida” recorrendo a diferentes estratégias sendo de realçar a utilização de técnicas de “máxima entropia” que utilizam o conhecimento de volumes de tráfego reais em certos arcos.

Este processo, tal como está explicitado no diagrama apresentado na Figura III.26, é realizado de uma forma iterativa principalmente no que concerne às três últimas acções. Salienta-se que após a acção correspondente à correcção da procura e caso não sejam atingidos os objectivos previamente fixados para a validação ter-se-á que “recuar” neste processo de calibração eliminando os resultados obtidos nesta última acção.

Observe-se ainda que todas as alterações realizadas no desenrolar deste processo de calibração devem ser devidamente justificadas bem como anotadas de modo não só a permitir eventuais “retrocessos”, como também constituir uma base para futuras modelações.

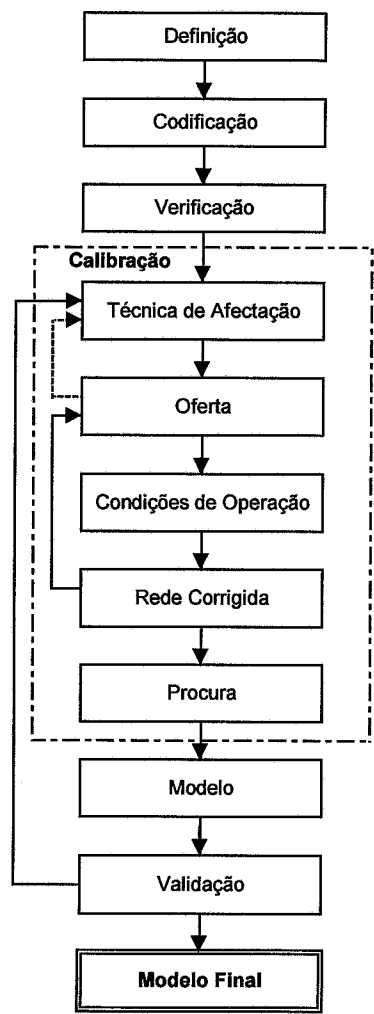
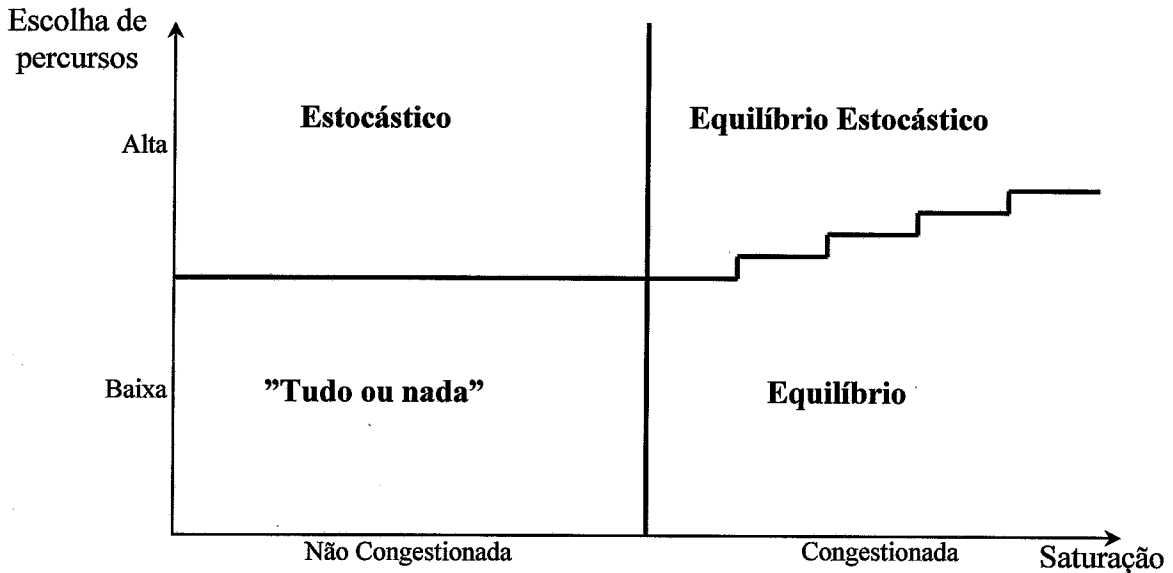


Figura III.26 – Integração do processo de calibração no desenvolvimento de um modelo

5.3.2 Selecção da técnica de afectação

A primeira acção consiste em definir o princípio ou a regra de selecção de percursos, função da dependência da técnica de afectação com o tipo de rede em análise, tanto no que diz respeito à procura como à oferta. De uma forma geral a escolha da técnica de afectação, embora também seja em função do modelo disponível, depende dos graus de saturação da rede e da existência de percursos alternativos (Figura III.27).



Fonte: HMSO, 1996

Figura III.27 – Selecção da técnica de afectação

Deste modo, quando se está na presença de uma rede perfeitamente definida em termos hierárquicos, em que por um lado não existem várias alternativas de percurso entre pares de zonas, ou quando existem apresentam “custos” muito distintos e, por outro lado, não existem situações de congestionamento, ou seja, a rede é fluida em termos de escoamento de tráfego, a utilização da técnica de afectação “tudo ou nada” é recomendada.

De facto, esta técnica para além de ser mais eficiente em termos computacionais será a que, nestas situações, melhor reproduz os padrões de selecção de percursos visto que todos os utilizadores de uma rede que apresenta as condições referidas irão optar pelos caminhos de “custo” mínimo.

No caso de uma rede também com condições fluidas de tráfego mas em que existem várias alternativas de caminhos entre pares de zonas, a única forma de se modelar as decisões dos diferentes utilizadores pela normal opção entre os vários percursos, será através da introdução do elemento estocástico na afectação. Assim, quando na presença deste tipo de redes a técnica de afectação que melhor reproduz a selecção de caminhos será a estocástica.

Quando se está em presença de redes congestionadas deve-se optar entre a afectação utilizando o equilíbrio do utilizador ou o equilíbrio estocástico, uma vez que terá de se ter sempre presente as restrições à capacidade.

Perante este tipo de condições de rede a dispersão de percursos entre pares de zonas pode ser obtida apenas pelos efeitos da utilização do conceito de equilíbrio. No entanto, a existência de uma rede com um grande número de caminhos alternativos entre pares O-D e em que o grau de saturação não seja muito elevado, implica que se utilize o equilíbrio estocástico de modo a tentar reflectir a diferente percepção de custos dos utilizadores e, consequentemente, a repartir adequadamente as viagens pelas várias hipóteses.

À medida que as redes apresentam um grau de saturação considerável deve-se optar pela técnica do equilíbrio do utilizador uma vez que é mais eficiente (Sheffi, 1985) e o efeito da restrição à capacidade tende a distribuir adequadamente as viagens pelos vários percursos possíveis entre pares de zonas sem necessidade de recorrer à lógica estocástica de distribuição dos processos de decisão dos condutores.

Neste ponto será ainda de referir que quando se opta pelos modelos estocásticos, puros ou de equilíbrio, ter-se-á obrigatoriamente de calibrar o denominado parâmetro de dispersão que fixa a variabilidade das viagens pelos caminhos que não sejam o(s) de custo mínimo, salientando-se que a fixação do valor para o parâmetro de dispersão assume uma grande importância. Para a sua estimação têm sido propostos vários métodos tais como os de Daganzo (1977) e Sheffi (1985), tendo apenas por base a minimização das diferenças entre os valores das variáveis, volumes de tráfego e tempos de percurso, observadas e modeladas, pelo que a probabilidade de geração de erros associados a esta estimação é alta.

5.3.3 Correção da oferta

Após a selecção da técnica de afectação, a rede modelada deverá ser analisada para assegurar a sua integridade e conexão. Saliente-se que nesta fase as eventuais correcções/alterações a realizar apenas devem incidir nas características físicas da rede,

nomeadamente através da inserção de novos nós e arcos e na verificação dos conectores de centróide no que se refere ao seu número e às suas ligações à rede

A verificação da conectividade e integridade da rede pode ser iniciada com a afectação de uma Matriz O-D unitária e, através do recurso a um visualizador animado da rede em operação ou recorrendo-se à visualização da árvore mínima¹⁶, proceder à verificação da lógica da escolha de caminhos entre pares de zonas (Figura III.28).

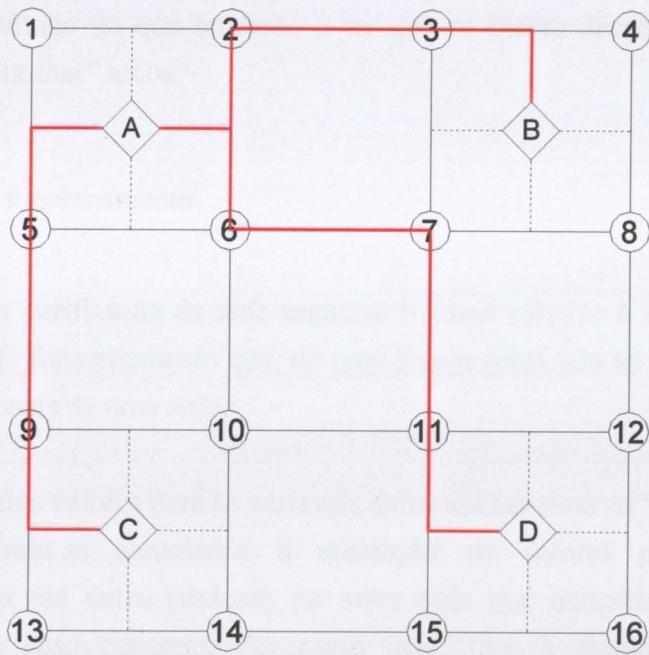


Figura III.28 – Exemplo da árvore mínima referente à zona A

Observe-se que nesta afectação em que se utiliza uma matriz unitária, ou seja, em que apenas existe uma viagem entre cada par de zonas, o percurso adoptado deve ser o que corresponde ao “caminho mais curto”, que deverá ser validado pelo conhecimento local da rede.

Esta análise não dispensa a averiguação dos caminhos utilizados quando se afecta a matriz real à rede modelada, excepto no caso em que se utilize a técnica de afectação de “tudo ou nada”, devendo também neste caso os caminhos seleccionados serem comparados com os reais (HMSO, 1996).

¹⁶ Representação numa rede dos caminhos mais curtos de uma zona para todas as outras zonas

Neste ponto de verificação de rede, uma importante ajuda parcial são os denominados e já referidos cordões e/ou *screenlines* na medida em que a comparação de volumes, observados e modelados, nos arcos que as atravessam poderão ser um bom indicador sobre se o número de arcos modelados é suficiente ou insuficiente (FHWA, 1983). De facto, se a rede está definida deficientemente o volume total nos arcos pertencentes a um dado cordão ou *screenline* modelado será superior ao observado, podendo denotar a falta de arcos, que terão de ser incluídos. Pelo contrário se a rede é muito densa, relativamente às zonas, o volume total afectado será menor que o observado em resultado do que tenderão a ter que se incluir secções de observações adicionais e/ou “eliminar” arcos.

5.3.4 Variáveis de funcionamento

Finalizada a verificação da rede segue-se o passo relativo à análise dos valores para as variáveis de funcionamento que, de uma forma geral, são as responsáveis pelas condições operacionais de uma rede.

Na fixação dos valores para as variáveis de funcionamento os “erros” usualmente cometidos encontram-se associados à utilização de valores para as variáveis desenvolvidos para um outro contexto ou outra rede que poderão não ser os mais adequados para o caso concreto. Por outro lado, face à dimensão da tarefa de codificação, o recurso a simplificações, nomeadamente através da tipificação dos nós/arcos e da normalização dos valores das variáveis de funcionamento, é prática corrente.

Deste modo, embora os valores destas variáveis devam ser calibrados com base em valores observados para a rede em estudo, como já referido, é quase sempre necessário proceder-se a alterações/correcções face à análise comparativa do funcionamento da rede modelada *versus* a realidade. Observe-se que para esta tarefa a importância do conhecimento dos impactos dos erros no desempenho final do modelo associados à estimação destas variáveis assume especial relevância.

No passado recente, têm sido desenvolvidos métodos sistemáticos para a calibração dos valores das variáveis de funcionamento dos modelos de afectação, podendo os mesmos ser classificados em duas famílias, nomeadamente os de

otimização matemática, vinculados às técnicas dos mínimos quadrados ou de máxima verosimilhança, e os heurísticos desenvolvidos com base na experiência e conhecimento real de modelação (El-Mously, 1994; Fricker, 1993; Suh, 1990; Fricker, 1989):

i) otimização matemática:

- NL – *Network Loading*;
- UE – *User Equilibrium* (EM – *Entropy Maximizing*);
- MLS – *Minimizing Least Squares*;
- BL – *Bilevel Programming*;

ii) heurísticos:

- SLSA – *Simultaneous Link Speed Adjustment*;
- DIA – *Direct Impedance Adjustment*;
- PA – *Parameter Adjustment*;

No diagrama apresentado na Figura III.29 (El-Mously, 1994) relacionam-se os diferentes métodos propostos em função das variáveis de funcionamento a calibrar, observando-se que alguns destes métodos também permitem a calibração do parâmetro de dispersão, no caso de se aplicar a afectação estocástica, bem como os dados reais necessários para os aplicar (volumes de tráfego e/ou tempos de percurso nos arcos).

Assim, El-Mously (1994) recomenda, em função da fonte de erro a corrigir e se apenas se dispõem dos volumes de tráfego reais para a avaliação do desempenho dos modelos, a aplicação dos seguintes métodos:

- SLSA ou DIA para a calibração das variáveis de funcionamento que caracterizam as condições em regime livre do arco (Q e U), sendo preferencial a aplicação do primeiro;
- PA para a calibração dos parâmetros das funções volumes-velocidades (α e β);
- BL, EU e NL para a calibração dos parâmetros das funções volume velocidade e/ou dos parâmetros de dispersão (θ), sendo a aplicação dos dois primeiros métodos preferíveis.

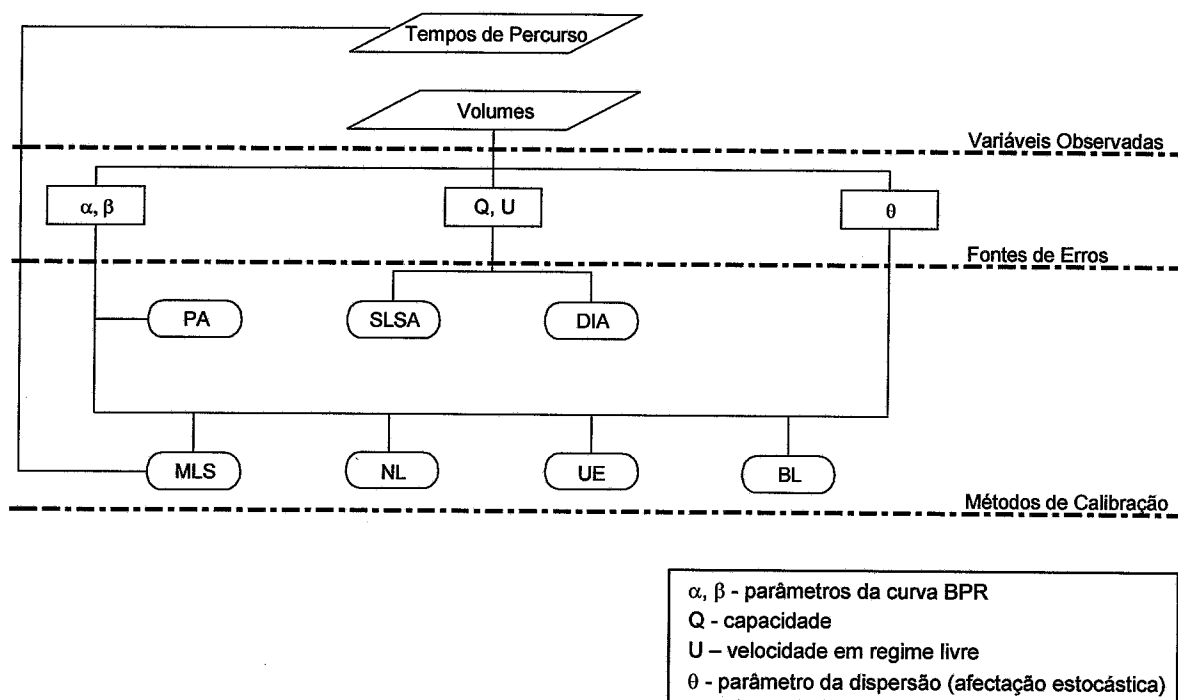


Figura III.29 - Métodos sistemáticos de calibração

Caso se disponha adicionalmente de tempos de percursos reais então a recomendação recai sobre a aplicação do método MLS para a calibração dos parâmetros das funções volumes-velocidades e/ou dos parâmetros de dispersão.

É, no entanto, importante notar que todos estes métodos foram desenvolvidos tendo em vista apenas a minimização da diferença entre variáveis observadas e modeladas, nomeadamente volumes e/ou tempos de percurso nos arcos, não fazendo qualquer referência à verificação da lógica de funcionamento das redes, tal como por exemplo a validação dos caminhos entre pares Origem-Destino e de situações de congestionamento observadas. Neste ponto, será de observar que a calibração das variáveis de funcionamento para além do cumprimento dos critérios dos parâmetros de calibração, tal como o objectivo destes métodos, deve sempre passar também pela utilização de análises subjectivas ao funcionamento da rede tendo por base o conhecimento real da mesma.

Será também de referir que os métodos heurísticos mencionados (SLSA, DIA e PA) foram testados por El-Mously (1994) tendo por base duas redes, uma fictícia (Archerville) e uma real (Eindhoven), tendo sido detectados alguns problemas na

convergência destes métodos sistemáticos de calibração em função da dimensão da rede e do seu grau de saturação.

Por outro lado, a utilização destes métodos apenas permite a “calibração” das variáveis de funcionamento dos arcos, nomeadamente a capacidade, a velocidade e os parâmetros da relação volume-velocidade, observando-se que para esta curva apenas se menciona a denominada curva BPR.

A acrescentar a estes factos é de salientar que estes métodos não fazem qualquer referência à calibração das variáveis que caracterizam o funcionamento dos nós, fundamentais para a representação das condições operacionais em redes urbanas.

Assim, poder-se-á dizer que a aplicação destes métodos sistemáticos de calibração se encontra limitada a certo tipo de redes, nomeadamente a redes de pequena ou média dimensão e não congestionadas (El-Mously, 1994). A estas limitações deve-se acrescentar o facto de só poderem ser aplicados a redes em que as condições de funcionamento possam ser realizadas apenas com a caracterização das variáveis de funcionamento dos arcos.

Por outro lado, segundo o TAM (HMSO, 1996) a calibração deve ser dirigida a verificações específicas à rede assegurando que os cálculos das velocidades e volumes nos arcos e dos atrasos nos nós estão a ser os esperados, não descurando a verificação dos percursos entre todos os pares Origem-Destino. Nos arcos estas verificações passam pela comparação de volumes e tempos de percurso nos locais onde se dispõe de observações, sendo também de realizar verificações da razão volume/capacidade de modo a detectar possíveis anomalias. Nos nós deve-se ter especial atenção às capacidades calculadas pelos modelos bem como às previsões dos atrasos ou comprimentos de filas de espera.

Neste processo os eventuais ajustamentos a efectuar aos valores das variáveis de funcionamento devem ser sempre realizados no sentido de aproximar o funcionamento do modelo à realidade sem se forçar o modelo a fornecer os resultados esperados (HMSO, 1996; FHWA, 1983).

Por último convém mais uma vez referir que, face ao elevado número de variáveis de funcionamento existentes em qualquer modelo de afectação passível de ser

aplicado em redes urbanas, o primeiro passo, antes de se iniciar a calibração destas variáveis, deverá ser realizado no sentido de se analisar qual a importância de cada uma delas no desempenho global do modelo.

5.3.5 Correção da procura

Como já foi referido, a procura representada pela Matriz Origem-Destino é uma das principais responsáveis pelos desvios entre variáveis observadas e modeladas principalmente pelos três seguintes factos:

- i) agregação das viagens por zonas, o que implica que as viagens intra-zonas não sejam modeladas;
- ii) flutuações normais do tráfego de dia para dia e impossibilidade, face ao volume de informação necessário, da recolha de dados para a caracterização da matriz e para a calibração/validação ser realizada simultaneamente;
- iii) limitações e simplificações assumidas no processo de construção da matriz.

Deste modo, poderá tornar-se necessária a correção da matriz de forma a actualizá-la relativamente a movimentos não observados com exactidão aquando da sua construção e que necessitam de ser refinados para uma melhor correspondência com os fluxos de tráfego observados.

Esta “actualização” pode ser realizada através de uma simples factorização a toda ou parte da matriz ou pela utilização de técnicas de estimação de matrizes a partir de volumes de tráfego reais em secções.

Observe-se que esta actualização só deve ser realizada quando após os três procedimentos anteriores os resultados obtidos falham no que concerne à calibração do modelo e, apenas, se fornecerem uma melhoria significativa relativamente à matriz original. É, ainda, de realçar que se após esta última acção de calibração não se obtiverem resultados para que se possa realizar a validação final do modelo, o processo de calibração deverá ser reiniciado tendo por base a matriz original.

Relativamente aos dados/condições necessárias para a realização da actualização de uma matriz, devem-se considerar os seguintes (HMSO, 1996):

- i) uma matriz já existente e validada;
- ii) um conjunto de contagens de tráfego em secção recente e fidedigno;
- iii) uma modelação da rede;
- iv) um modelo de afectação com restrições à capacidade.

Na actualização de matrizes a selecção das secções de contagem é uma tarefa importante, podendo mesmo ser considerada crítica, mas bastante difícil de determinar. Willumsem (1981) propõe que a selecção não seja realizada de uma forma aleatória mas que se fixem as secções que mais provavelmente irão originar uma matriz mais “exacta”, sugerindo que se cumpram as seguintes regras na selecção:

- arcos com maiores volumes de tráfego;
- arcos que são utilizados por percursos Origem-Destino para os quais não existam secções de contagem em mais nenhum arco utilizado por estes percursos;

No entanto, a utilização de volumes de tráfego reais na actualização de matrizes pode trazer alguns problemas, nomeadamente de falta de consistência (resultantes dos erros de observação que podem originar condições de descontinuidades de fluxos) e de falta de independência, ou seja, considerar volumes linearmente dependentes (Carvalho, 1996). Estes problemas foram reconhecidos e avaliados por diversos autores que desenvolveram algumas técnicas para os ultrapassar (Oh, 1991; Van Zuylen et al, 1980; Willumsen, 1978).

Relativamente ao número óptimo de secções a incluir, Willumsem (1991) e Carvalho (1996) também referem a dificuldade em o determinar, uma vez que detectaram que os benefícios resultantes pela inclusão de secções adicionais tanto aumenta rapidamente como desce abruptamente em função do conjunto inicial seleccionado.

Deste modo, as secções a utilizar para a actualização da matriz devem-se concentrar na(s) área(s) em que a matriz necessite de ser ajustada, principalmente pelo facto destes valores não terem sido observados com exactidão, respeitando as regras atrás enunciadas e o seu número deve ser obtido por tentativas até se atingirem resultados credíveis (Carvalho, 1996). Recomenda-se que as contagens a utilizar sejam

verificadas para assegurar que as mesmas são consistentes, designadamente no que concerne aos valores dos volumes observados em arcos “adjacentes”.

Por outro lado, para a actualização da matriz deve-se adoptar um processo iterativo, limitando o número de células que são ajustadas, preferencialmente por zonas, e verificar a escala dos ajustamentos efectuados. Em cada passo as matrizes resultantes devem ser verificadas no que se refere a efeitos anómalos, devendo ser eliminadas as secções de contagem que possam repercutir valores inverosímeis nas células.

Os métodos mais utilizados para realizar estas correcções à matriz podem ser divididos nos que assumem que não existem erros associados às contagens¹⁷ e nos que admitem que estas não são exactas, e nos passíveis de aplicação a redes congestionadas ou somente a redes fluidas. No Quadro III.11 apresentam-se vários exemplos de diversos métodos aplicáveis na “actualização” de Matrizes Origem-Destino, com base no trabalho de investigação desenvolvido por Carvalho (1996).

No referido trabalho (Carvalho, 1996) também são propostas e testadas três alternativas heurísticas ao método iterativo A/ME2 denominadas por MAS (*Method of Successive Averages*), IE (*Interpolation/Extrapolation*) e MT (*Mixed Technique*). Os testes efectuados no que se refere à qualidade da matriz estimada foram desenhados para dois diferentes níveis de saturação da rede (médio e alto) e para dois conjuntos de volumes de tráfego em secções (15 e 20% dos arcos da rede), citando-se as seguintes principais conclusões gerais:

- a aplicação de qualquer um dos métodos estima matrizes que se encontram mais próximas da “real”;
- para redes com um grau de saturação médio a redução de erros na matriz é tanto maior quanto maior for o número de contagens de tráfego tido em consideração pelo modelo mas para redes com um grau de saturação alto esta tendência inverte-se;
- a aplicação de qualquer método alternativo (MAS, IE ou MT) produz melhores resultados relativamente ao método tradicional (A/ME2).

¹⁷ Observe-se que este pressuposto teórico, na prática não é atingido a por um lado à variabilidade temporal dos volumes de tráfego e por outro estes valores resultarem de um processo de medições o qual se encontra sujeito a erros (medição, amostragem)

Método	Erros nas Contagens	Redes Congestionadas
Técnicas de Inferência Estatística - Maher (1983) - Cascetta (1984) - McNeil (1985) - Spiess (1987)	Sim	Não
Máxima Entropia/Minimização da Informação - ME2: Willumsem (1981); Van Zuylen, Willumsem (1980)	Não	Não
Métodos sequenciais - A/ME2: Willumsem (1981) - Oh (1991) - Fisk (1988,1989)	Não	Sim
Métodos sequenciais - Yang (1992) - Spiess (1990) - Floarina, Chen (1993) - Heydecker (1995)	Sim	Sim

Quadro III.11 – Métodos de “actualização” de matrizes a partir de volumes de tráfego reais

Deste modo, pode-se dizer que a aplicação dos métodos de actualização de matrizes resultam em benefícios para o modelo embora se saliente, mais uma vez, a dificuldade inerente à determinação do número exacto de secções de contagem a incluir na actualização da matriz.

Por último, é ainda de realçar que a aplicação destes métodos poderá ser função dos programas de cálculo automáticos disponíveis, tanto no que se refere ao modelo de afectação e método de “actualização” de matrizes a aplicar como também à sua compatibilidade.

6. Fontes e Impactos Potenciais dos Erros no Processo de Modelação

6.1. Enquadramento

Neste ponto pretende-se identificar não só a origem de alguns dos erros mais comuns, cometidos durante o processo de desenvolvimento de um modelo de afectação, bem como os possíveis impactos dos mesmos no desempenho final do modelo.

Observe-se que cada erro identificado deve ser devidamente avaliado para se determinar se individualmente ou combinado com outros é a causa dos impactos. Por outro lado, na tentativa de corrigir cada erro devem-se apenas realizar alterações justificáveis, não permitindo alterações arbitrárias que de certo modo “obriguem” o modelo a dar os resultados que se pretende.

Antes de se identificar as possíveis fontes de erro com o objectivo de os eliminar ou minimizar, é importante salientar que, como se pôde constatar ao longo do presente capítulo, a aplicação de um modelo passa por três etapas distintas que irão ter influência sobre o desempenho final do modelo:

- A) Decisão do tipo de modelo “teórico” a utilizar;
- B) Definição do sistema a modelar;
- C) Construção do modelo.

A primeira etapa refere-se à definição da estrutura do modelo a aplicar nomeadamente aos modos de simulação e de afectação, em função do estado actual do desenvolvimento neste campo de investigação. Após esta tomada de decisão, os eventuais erros, que englobam os de especificação, de transferência e computacionais, não podem ser controlados visto que dependem das especificidades em que o modelo foi desenvolvido. No entanto, este facto deve estar sempre presente e ser devidamente ponderado tendo por base o(s) objectivo(s) em que o modelo irá ser aplicado.

A segunda etapa tem por objectivo a definição do sistema a modelar, ao nível da área de análise e do seu detalhe, dependentes não só do(s) objectivo(s) como também da decisão anterior. Nesta etapa estão inerentes os erros de simplificação e de agregação, devidos basicamente à impossibilidade de modelação de toda uma rede e ao conceito de

zonas (será de observar que estes dois itens não são independentes uma vez que a definição de rede e o sistema de zonamento estão interrelacionados).

A terceira e última etapa concerne a caracterização do sistema a modelar, tanto da procura, representada pela matriz Origem-Destino e à qual se encontram associados erros de amostragem e medição, como da oferta, descrita pelo conjunto de arcos e nós e respectivos atributos, ou seja, as características físicas e as variáveis de funcionamento aos quais se encontram associados erros de medição e previsão.

Deste modo, pode-se afirmar que na primeira fase o controlo do grau de precisão dos resultados alcançados está essencialmente ligado ao processo de selecção do modelo a utilizar enquanto que na segunda e terceira fase os erros podem ser controlados já a um nível operacional.

No entanto, a segunda fase é função do(s) objectivo(s) e muito dependente dos recursos disponíveis pelo que, uma vez fixada, a sua alteração iria inevitavelmente implicar bastantes consequências (por exemplo, um novo zonamento obrigaria a toda a redefinição não só da Matriz como da rede), podendo-se então concluir que o controlo dos erros encontra-se basicamente inerente à fase de construção do modelo.

Assumindo que embora a caracterização física da rede esteja sujeita a erros, estes podem ser “eliminados” após uma cuidadosa verificação, as eventuais fontes de erros encontram-se assim associadas ao número de viagens da matriz Origem-Destino e aos valores estimados para cada uma das variáveis de funcionamento. Deste modo, a qualidade destes dados ir-se-á reflectir no desempenho final do modelo e o conhecimento do impacto de cada um desempenhará um papel fundamental no processo de calibração do modelo.

Antes de se iniciar a avaliação dos impactos dos erros no desempenho final do modelo deverá ser realizada uma análise crítica à rede de forma a “eliminar” os eventuais erros inerentes à segunda e terceira fases que concernem a identificação e caracterização física da rede. Tal pode ser realizado tendo em atenção os seguintes pontos (FHWA, 1983):

- i) compatibilização da rede com as zonas;
- ii) isenção de erros de codificação;

iii) verificação dos conectores de centróides.

Esta análise pode ser realizada tendo presente que, de um modo geral, o problema mais comum e facilmente detectável em redes é o da não correspondência entre volumes observados e modelados. Nestes casos deve-se verificar os volumes nos arcos nas proximidades, que podem constituir alternativa, uma vez que as viagens podem estar a ser desviadas por alguma causa, derivada de erro de modelação, para estes últimos. Neste aspecto, a selecção da denominada análise por arco, disponível em quase todos os programas e em que é possível visualizar quais os pares Origem-Destino que utilizam um determinado arco, é bastante útil visto que poderá constituir uma ajuda na determinação do(s) erro(s).

6.2. Impactos típicos das diferentes tipologias de erros de modelação

Os impactos mais usuais e possíveis fontes de erro são descritos seguidamente (HMSO, 1996; FHWA, 1983):

- i) Os caminhos entre pares Origem-Destino não são os “reais”:
 - erros de codificação;
 - omissões de arcos;
 - conectores de centróides;
 - valores das capacidades nas zonas de rede mais densa;
 - valores dos pesos associados à distância e ao tempo.
- ii) Volumes totais modelados na rede superiores aos observados:
 - consistência dos valores da matriz Origem-Destino *versus* volumes das contagens realizadas;
 - rede modelada “sub-dimensionada” face à dimensão das zonas.
- iii) Volumes totais modelados na rede inferiores aos observados:
 - consistência dos valores da matriz Origem-Destino *versus* volumes das contagens realizadas;
 - rede modelada “sobre-dimensionada” face à dimensão das zonas.
- iv) Volumes totais modelados na rede semelhantes aos observados mas em certos arcos há diferenças significativas:

- conectores de centróides nas imediações;
 - valores das velocidades e/ou capacidades dos arcos.
- v) Volumes modelados nos arcos principais (maior capacidade) elevados comparativamente com os observados:
- conectores de centróides nas imediações;
 - valores das velocidades e/ou capacidades neste tipo de vias sobrestimados;
 - valores das velocidades e/ou capacidades nas vias secundária subestimados;
 - valores das capacidades nos arcos que “alimentam” este tipo de vias sobrestimados.
- vi) Volumes modelados nos arcos principais (maior capacidade) baixos comparativamente com os observados:
- conectores de centróides nas imediações;
 - valores das velocidades e/ou capacidades neste tipo de vias subestimados;
 - valores das velocidades e/ou capacidades na rede secundária sobrestimada;
 - valores das capacidades nos arcos que “alimentam” este tipo de vias subestimados.
- vii) Volumes modelados nos arcos secundários (menor capacidade) altos comparativamente com os observados:
- conectores de centróides nas imediações;
 - valores das velocidades e/ou capacidades neste tipo de vias sobrestimados;
 - valores das velocidades e/ou capacidades na rede principal subestimados.
- viii) Volumes modelados nos arcos secundários (menor capacidade) baixos comparativamente com os observados:
- conectores de centróides nas imediações;
 - valores das velocidades e/ou capacidades neste tipo de vias subestimados;

- valores das velocidades e/ou capacidades na rede principal sobrestimados.
- ix) Velocidades modeladas elevadas comparativamente com as observadas:
 - valores das velocidades e/ou capacidades subestimados;
 - parâmetro(s) da relação volume-velocidade.
- x) Velocidades modeladas baixas comparativamente com as observadas:
 - valores das velocidades e/ou a capacidades subestimados;
 - parâmetro(s) da relação volume-velocidade.
- xi) Vias com procura acima da capacidade:
 - número de iterações no modelo de afectação subestimado;
 - valores das velocidades e capacidades nas vias com maiores volumes sobrestimados;
 - valores das velocidades e capacidades mas vias com menores volumes subestimados.

OBS: Não existe nenhuma prioridade na listagem das possíveis causas dos erros e, consequentes, medidas de correcção.

Quando se refere à capacidade ou velocidade nas vias será de referir que estas se referem às condições operacionais tanto do arco como do nó situado a jusante.

Pela análise desta lista, embora se constatem algumas fontes de erro inerentes à descrição e caracterização física da rede que devem ser “eliminadas”, pode-se afirmar que os erros se devem principalmente à descrição das condições operacionais da rede, admitindo que a matriz Origem-Destino está “correcta” e vice-versa.

6.3. Avaliação da importância relativa dos erros função do seu impacto

Face ao exposto nos pontos anteriores, ao desenvolvimento de um modelo estão inevitavelmente associadas diversas fontes de erro com consequentes impactos no seu desempenho. No entanto, verificou-se a escassez de referências no que concerne à aplicação de análises que permitam a avaliação e a identificação do impacto relativo no desempenho de um modelo em função do(s) erro(s) cometido(s).

Este conhecimento da relação entre qualidade de dados de entrada e resultados dos modelos assume uma importância vital para o desenvolvimento de modelos uma vez que, por um lado, são fixados determinados critérios que se devem alcançar e, por outro, nada se refere quanto à precisão que se deve atingir para os dados necessários ao funcionamento do modelo.

Igualmente, pode-se afirmar que a compreensão *a priori* de qual o impacto de cada tipo de erros possíveis de serem cometidos na construção de um modelo no seu desempenho final pode, de algum modo, contribuir para uma “otimização” deste processo de construção.

A definição de abordagens que permitam ir ao encontro desta problemática encontram-se num estado pouco ou mesmo nada desenvolvido, como se poderá constatar no próximo capítulo, pelo que o desenvolvimento de uma metodologia que permita avaliar esta relação “causa-efeito” assume particular relevância.

IV. METODOLOGIA DE ANÁLISE DO IMPACTO DE ERROS

1. Preâmbulo

1.1 Enquadramento

A construção de um modelo de afectação em meio urbano exige um grande esforço tanto no que concerne à caracterização da procura como da oferta, implicando necessariamente o recurso a simplificações de modo a sistematizar a estimação de todas as variáveis necessárias ao desenvolvimento do modelo. Assim, o conhecimento do contributo de cada uma das variáveis de *per si* e integradas no contexto global de modelação para o desempenho final do modelo assume particular relevância.

Por outro lado, a função básica de um modelo de afectação é o de estabelecer as relações do conjunto formado pelos dados de entrada (matriz O-D e rede viária) para se obter os resultados finais, definidos pelas diversas variáveis que caracterizam o tráfego (volumes, velocidades, atrasos, percursos utilizados, ...). No entanto, a aplicação de modelos encontra-se limitada no que se refere à compreensão da relação existente entre a qualidade dos dados de entrada e o rigor dos resultados produzidos pelos modelos, nomeadamente no que concerne ao conhecimento dos impactos dos erros inerentes ao desenvolvimento de um modelo, ou seja, a sensibilidade do modelo aos erros nos dados.

O desenvolvimento de qualquer modelo deve assim integrar a aplicação de análises de sensibilidade no sentido de se avaliar qual o impacto nos resultados face a alterações nos valores de uma ou mais variáveis, simulando erros normalmente associados à construção de modelos. Surpreendentemente a aplicação de análises de sensibilidade a modelos de afectação não tem sido explorada face embora o longo passado da utilização deste tipo de modelos (Clark e Watling, 2002).

De facto, os trabalhos nesta área concentram-se no estudo teórico de funções que permitam estabelecer uma relação linear entre os fluxos de equilíbrio nos arcos e os dados de entrada, ou seja, a solução final de um modelo em função de novas condições iniciais. Assim, as aplicações neste campo têm como objectivo a previsão de soluções de equilíbrio em função de vários cenários hipotéticos sem que para tal seja necessário a aplicação de modelos de afectação.

Os trabalhos actuais de análise de sensibilidade (Yang, 1995 e 1997; Bell e Iida, 1997; Leurent, 1998) derivam quase exclusivamente de aplicações e extensões dos resultados teóricos e respectivos procedimentos obtidos por Tobin e Friez's (1988), os quais permitem estimar os fluxos de equilíbrio nos arcos sobre perturbações dos elementos da matriz Origem-Destino e/ou dos parâmetros das relações volumes-velocidades (Clark e Watling, 2002).

No entanto, apenas Clark e Watling (2002) testaram o seu trabalho de investigação numa rede real, embora de pequena dimensão (constituída por 29 zonas e por 123 arcos), em que simplesmente foram testadas as capacidades de previsão da relação estabelecida *versus* o desempenho do modelo face a alterações de uma célula da matriz Origem-Destino ou da capacidade num arco.

Deste modo, face ao estado actual nesta área de investigação, no presente trabalho pretende-se estudar a introdução de análises de sensibilidade no processo de calibração de um modelo com o objectivo de se avaliar a resposta do mesmo a alterações sistemáticas e estruturadas dos valores das variáveis de modo a avaliar o potencial impacto da ocorrência de diferentes tipos e níveis de erros, identificando-se o grau de sensibilidade de cada uma delas com recurso aos parâmetros correntes de aferição do desempenho.

1.2 Objectivos da análise

A utilização de técnicas de análise de sensibilidade permite o conhecimento relativo à contribuição de cada um dos dados de entrada para o desempenho do modelo, uma vez que os seus valores podem ser modificados de um modo controlado e os respectivos impactos nos resultados podem ser avaliados.

Assim, as vantagens associadas à utilização desta metodologia são as de fornecer informação complementar, nomeadamente no que concerne a:

- i) credibilidade do modelo, na medida em que ao se realizarem alterações controladas dos dados de entrada os impactos esperados podem ser de algum modo previstos;
- ii) análise do erro através da determinação da amplitude do erro “admissível” dos dados de entrada, quantificando o impacto de erros resultantes da estimação das variáveis e, consequentemente, identificando as mais sensíveis, ou seja, aquelas para as quais os erros se reflectem num maior impacto no desempenho do modelo;
- iii) validação dos parâmetros de calibração, uma vez que a introdução de “erros” controlados permite de algum modo analisar o comportamento destes parâmetros.

Assim, face a esta informação, e contrariamente ao trabalho de investigação já realizado nesta área, é possível integrar as análises de sensibilidade no processo de construção de modelos, nomeadamente para uma “optimização” da fase de calibração.

Observe-se que as análises a realizar apenas incidem sobre as fontes de erro das variáveis para as quais se tem influência ao longo do desenvolvimento de um modelo que, tal como referido no capítulo anterior, “se resumem” às que caracterizam a procura (número de viagens) e às que representam as condições de operação de uma rede (variáveis de funcionamento).

Por outro lado, os erros de transferência decorrentes da variabilidade temporal do comportamento do tráfego devem constituir um factor principal na fixação dos valores para os critérios associados aos parâmetros de aferição de um modelo.

De facto, a avaliação do desempenho de um modelo é realizada com recurso aos parâmetros de aferição calculados com bases nos valores das variáveis modeladas e observadas, sendo estas últimas resultantes de uma campanha de medições. Por outro lado, a caracterização da matriz Origem-Destino também resulta de observações reais. Face ao volume de informação necessário, as campanhas de recolha de dados são geralmente realizadas em diferentes períodos pelo que quando se está a avaliar o desempenho do modelo esta circunstância deverá estar sempre presente. Deste modo, no

presente trabalho também é proposta uma “metodologia” que permite a análise dos diversos parâmetros existentes.

2. A Metodologia Básica de Análise

2.1. A Filosofia básica de análise

A realização das análises de sensibilidade tem por base a existência prévia de um modelo de afectação desenvolvido segundo o estado actual do conhecimento. O pressuposto para a sua aplicação será a de o referido modelo se encontrar “isento” de erros não só dos inerentes às duas primeiras etapas de desenvolvimento (definição do tipo de modelo a aplicar e sistema a modelar) como dos decorrentes da descrição física da rede, tarefa esta inerente à terceira etapa (construção do modelo).

Tipicamente um modelo de afectação necessita de um dado número de características físicas da rede ($a[h]$, $h = 1, \dots, H$) sendo os seus resultados ($mod[k]$, $k = 1, \dots, K$) função de uma dada procura ($M[i,j]$, $i,j = 1, \dots, N$) e das variáveis responsáveis pela descrição das condições operacionais da rede ($v[l]$, $l = 1, \dots, L$), ou seja:

$$mod[k] = F_k(a[h], M[i,j], v[l]) \dots\dots\dots(IV.1)$$

com

$$F_k(a[h], M[i,j], v[l])$$
 - representação do modelo

Admitindo que um modelo se encontra isento de erros e que o mesmo representa um dado sistema real então pode-se fixar todos os seus dados de entrada ($a[h]$, $M[i,j]$, $v[l]$) e, conseqüentemente, os seus resultados ($mod[k]$) como o estado particular de um sistema virtual representativo de uma “realidade”:

$$mod_R[k] = F_k(a[h], M[i,j], v[l]) \dots\dots\dots(IV.2)$$

com

$$mod_R[k]$$
 – conjunto de variáveis que caracterizam o desempenho de um determinado sistema “real”

Com base neste pressuposto é então possível introduzir-se de forma sistemática e estruturada um conjunto de erros no modelo gerando-se novos modelos e respectivos conjuntos de resultados ($\text{mod}_{\varepsilon_i}[k]$) sendo, com base no sistema virtual, possível avaliar o impacto destes erros no desempenho dos modelos, ou seja, a diferença entre $\text{mod}_R[k]$ e cada $\text{mod}_{\varepsilon}[k]$, através do cálculo dos diferentes parâmetros de aferição do desempenho:

$$P[t] = F_t(\text{mod}_R[k], \text{mod}_{\varepsilon}[k]) \dots\dots\dots(IV.3)$$

com

- $P[t]$ - parâmetro t de aferição do desempenho de modelos;
- $\text{mod}_R[k]$ - valor “real” da variável de desempenho k ;
- $\text{mod}_{\varepsilon}[k]$ - valor modelado da variável de desempenho k .

Neste ponto será de referir que os resultados da análise e, consequentemente, as suas generalizações são, com toda a probabilidade, muito dependentes do “ambiente” de modelação, principalmente no que concerne a:

- tipo de modelo a aplicar face não só às diversas especificidades teóricas que têm por base bem como às diferentes estruturas de cálculo associadas;
- tipo de rede designadamente não só no que concerne à sua densidade de arcos e sua estrutura de hierarquização como também ao grau de congestionamento da rede;
- comportamento típico dos condutores nomeadamente no que diz respeito ao seu processo de escolha dos trajectos das deslocações.

No entanto, com a metodologia proposta pretende-se que a mesma integre o processo de desenvolvimento de um modelo nomeadamente na fase de calibração. Assim, após a tarefa de verificação da codificação do modelo, fixa-se o mesmo como representativo do sistema real ($\text{mod}_R[k]$) e realizam-se as análises de sensibilidade tanto no que se refere à caracterização das condições de funcionamento da rede como à representação da procura (Figura IV.1).

Este tipo de metodologia permite assim identificar a sensibilidade das variáveis de um modelo com vista à “optimização” da fase de calibração. Deste modo, algumas

das conclusões retiradas no presente trabalho no que concerne às vantagens da aplicação desta metodologia podem ser generalizáveis para outros ambientes.

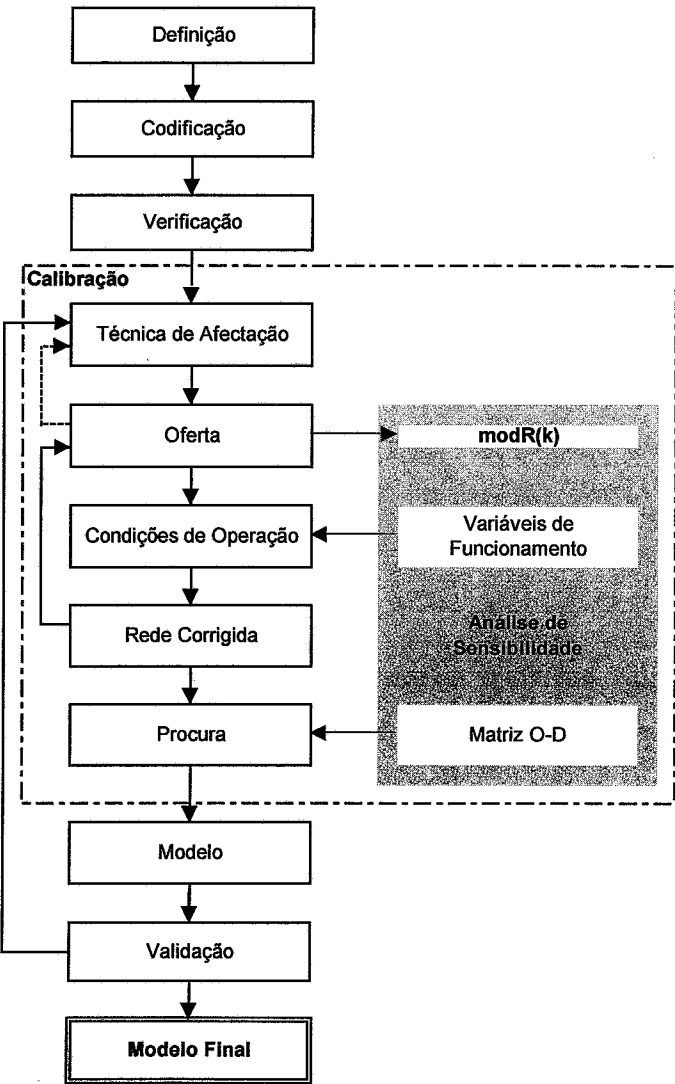


Figura IV.1 – A análise de sensibilidade no desenvolvimento de um modelo

2.2 Tipos de análises de sensibilidade

As análises de sensibilidade podem ser realizadas através da aplicação da denominada análise tradicional em que se simulam erros nos valores de apenas uma variável em cada análise, ou através da simulação de erros simultaneamente em mais de que uma variável.

A aplicação do primeiro tipo de análise de sensibilidade permite identificar a relação causa-efeito, embora se impossibilite testar o grau de interacção entre as diversas fontes de erro. O pressuposto do modelo disponível até este passo ser o “correcto”, como atrás referido, permite extrair informação sobre os tipos e níveis de impactos dos “erros” isoladamente introduzidos no desempenho do modelo.

Assim, no que concerne à caracterização da oferta, propõe-se a utilização deste tipo de análises com o objectivo de avaliar a resposta dos modelos a alterações sistemáticas dos valores das variáveis de funcionamento de modo a identificar o grau de sensibilidade de cada uma delas. Esta informação assume especial importância para a realização à posteriori das alterações/correções plausíveis dos valores das variáveis que fixam as condições operacionais de uma rede, uma vez que se consegue isolar e avaliar o efeito das variações em função da resposta do modelo, identificando aquelas com maior relevância para o desempenho do modelo, o que permitirá uma mais rápida convergência da calibração.

Por outro lado, este tipo de análises também permitem determinar a amplitude das variações dos valores das variáveis de funcionamento que se reflecte com algum impacto nos resultados do modelo.

A realização destas análises de sensibilidade pode ainda acrescentar credibilidade aos resultados do modelo na medida em que, ao se realizar este tipo de testes em situações controladas, é possível verificar se os impactos são ou não os esperados, tendo por base a experiência e o conhecimento da rede.

Por último, será de realçar que a informação obtida através da realização destes testes será bastante útil na aplicação de modelos pois pode permitir não só a compatibilização de recursos com a recolha de dados, como também gerar análises aproximadas/preliminares e, conseqüentemente, o desenvolvimento de modelos simplificados que possibilitem uma primeira abordagem dos problemas.

No lado da procura, a realização de análises de sensibilidade às viagens da Matriz Origem-Destino permite identificar quais as zonas mais sensíveis, ou seja, aquelas em que ligeiras alterações provocam grandes impactos na rede.

Estes testes também podem não só trazer benefícios para efeitos de agregação de zonas, com vista à definição de *screenlines* e/ou cordões, bem como para a análise crítica dos parâmetros de calibração tentando isolar os efeitos dos erros da matriz no modelo e, conseqüentemente, retirar conclusões quanto à rede modelada bem como determinar a amplitude dos erros admissíveis.

O segundo tipo de análises assenta na introdução de erros simultâneos em mais do que uma variável, de modo a se analisar uma eventual interacção entre as diversas fontes de erro e verificar-se qual o efeito dessa simultaneidade no desempenho de modelos.

Assim, é possível avaliar se a existência de diversas fontes de erro têm um efeito “substractivo”, ou seja, se a ocorrência de erros em várias variáveis diminui o impacto global ou se, pelo contrário, o efeito é “aditivo” ou “multiplicativo”, isto é, se a simultaneidade de erros implica um maior ou muito maior impacto no desempenho dos modelos. Assim, poder-se-á (ou não) identificar qual(ais) o(s) parâmetro(s) que melhor conseguem identificar a existência de diversos tipos de erro num modelo.

De modo a se analisar este efeito de erros simultâneos, o mesmo foi definido como a diferença entre o valor do parâmetro calculado para o modelo no qual foram introduzidos simultaneamente os diferentes erros e o somatório dos valores dos parâmetros calculados para os modelos em que os erros foram introduzidos isoladamente, ou seja:

$$E_{es} = P_e - \sum_i P_{e_i} \dots\dots\dots(IV.4)$$

com

- E_{es} – efeito do erro simultâneo;
- P_e – valor do parâmetro calculado para o modelo com ocorrência de todos os tipos de erros;
- P_{e_i} – Valor do parâmetro calculado para o modelo com ocorrência do erro tipo i .

Deste modo, foi então possível definir os três tipos de efeitos que reflectem o impacto no modelo com ocorrência simultânea de erros comparativamente à

composição dos impactos resultantes se se considerar cada tipo de erro a ocorrer isoladamente, nomeadamente:

- i) efeito “subtrativo”: quando o impacto é menor ($E_{es} < 0$), indicando que a ocorrência de erros simultâneos tende a atenuar os impactos no modelo;
- ii) efeito “aditivo”: quando o impacto é semelhante ($E_{es} \approx 0$), indicando que a ocorrência de erros simultâneos têm o mesmo efeito no modelo;
- iii) efeito “multiplicativo”: quando o impacto é maior ($E_{es} > 0$), indicando que a ocorrência de erros simultâneos tende a agravar os impactos no modelo.

Por último, será de observar que as análises de sensibilidade aplicadas não foram realizadas de uma forma exaustiva na medida em que não se simulou todo o tipo de erros decorrentes da construção de um modelo com probabilidade de ocorrer, designadamente erros aleatórios na estimação dos valores das variáveis de funcionamento. No entanto, saliente-se que a metodologia preconizada permite a análise de qualquer tipo ou combinação de erros.

2.3 Geração de erros

A realização de análises de sensibilidade das variáveis necessita de um processo de simulação de erros nos valores das variáveis, os quais devem ser gerados de modo a serem representativos dos que resultam de um normal desenvolvimento do modelo de afectação.

No que concerne à sua ocorrência estes erros podem ser sistemáticos devidos à sobre ou subestimação de todos os valores de uma dada variável, ou aleatórios resultantes de erros que pontualmente se podem cometer no valor de uma dada variável.

Neste ponto, convém isolar a avaliação dos impactos dos erros que podem ser cometidos na descrição da oferta, ou seja, da estimação dos valores para as variáveis de funcionamento, dos erros referentes à caracterização da procura reflectidos no número de viagens da matriz Origem-Destino.

Assim, face ao processo de desenvolvimento de um modelo e partindo-se do pressuposto que para os valores das variáveis de funcionamento apenas se cometem

erros sistemáticos uma vez que embora a possibilidade de os aleatórios ocorrerem ser alta os erros “grosseiros” podem (devem) ser corrigidos na fase da calibração com base nos procedimentos já mencionados no capítulo anterior (por exemplo, a verificação da existência de discrepâncias nos valores das variáveis ao longo de um dado eixo). No entanto, será de observar que este pressuposto não é universalmente válido uma vez que podem sempre ocorrer erros aleatórios na definição dos valores para as variáveis de funcionamento no sentido em que, embora em média se possa estimar os seus valores de uma forma global, face ao processo de codificação (cf Capítulo III), pontualmente pode-se ter sempre erros quer por defeito quer por excesso.

Os erros da matriz podem ter quer um carácter sistemático face à sobre ou subestimação da procura de uma forma global, quer um carácter aleatório devido a no processo de construção e/ou actualização da matriz se cometerem erros localizados na estimação do número de viagens em certas células ou conjunto de células.

Será ainda de salientar os “erros” na procura resultantes da variabilidade temporal que caracteriza esta variável, ou seja, o facto de, face aos recursos envolvidos, a construção da Matriz Origem-Destino e as variáveis de tráfego utilizadas para a avaliação do desempenho do modelo se realizarem com dados obtidos em períodos temporais distintos, quando se reconhece que numa rede viária a procura não é constante de dia para dia.

Relativamente à simulação dos “novos” valores das variáveis envolvidas os mesmos podem ser simulados simplesmente através da factorização dos valores “correctos”, devendo-se testar uma dada gama de valores, fixando previamente a amplitude de variação em percentagem ($\pm \delta\%$) e o incremento (I) a realizar em cada análise. Assim, para cada iteração o novo valor X^k para a variável com o valor x será dado por:

$$X^k = X + \varepsilon \cdot X \dots\dots\dots(IV.5)$$

com

$$\varepsilon \text{ [%]} - \text{erro introduzido } (\varepsilon \in [-\delta, +\delta]).$$

Por outro lado, a simulação de erros poderá ser realizada tendo por base que o valor da variável é o valor da média amostral que segue uma distribuição normal e cujo

desvio padrão é em percentagem do seu valor médio, ou seja, todas os valores da mesma variável têm o mesmo coeficiente de variação.

A geração de novos valores para as variáveis pode ser realizada adoptando o método baseado no Teorema do Limite Central (ver Costa, 1987). Este teorema estabelece que a soma de n variáveis aleatórias independentes X_j com valores médios μ_j e variâncias σ_j^2 , quando n tende para o infinito tem uma distribuição normal:

$$N\left(\mu = \sum_j \mu_j ; \sigma^2 = \sum_j \sigma_j^2\right) \dots\dots\dots (IV.6)$$

sendo a respectiva variável normal reduzida dada por:

$$z = \frac{\sum_j X_j - \sum_i \mu_j}{\sqrt{\sum_j \sigma_j^2}} \dots\dots\dots (IV.7)$$

Caso a geração de variáveis aleatórias (u_j) seja uniformemente distribuída no intervalo $[0,1]$, então:

$$\begin{cases} X_j = u_j \\ \mu_j = \frac{1}{2} \\ \sigma_j^2 = \frac{1}{12} \end{cases} \dots\dots\dots (IV.8)$$

Deste modo o cálculo da variável normal reduzida é dada por:

$$z = \frac{\sum_j u_j - \frac{n}{2}}{\sqrt{\frac{n}{12}}} \dots\dots\dots (IV.9)$$

Para além deste método a geração de amostras aleatórias $N(X, \sigma^2)$ também pode ser realizada pelo Método de Box-Muller (ver Guimarães, 1999). Na base do método

proposto está o facto de que as variáveis transformadas, definidas de acordo com a expressão a seguir apresentada, seguirem a distribuição $N(0,1)$:

$$z = \sqrt{-2 \cdot \ln u_1} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot u_2) \dots\dots\dots$$

(IV.10)

com

u_1 e u_2 - variáveis aleatórias uniformemente distribuídas em $[0,1]$.

Deste modo, o novo valor da variável $\underline{X}^k$ pode ser calculado através do valor da variável reduzida $\underline{z}$ e do desvio padrão $\underline{\sigma}$ fixado, aplicando a seguinte expressão:

$$X^k = X + z \cdot \sigma \dots\dots\dots$$

(IV.11)

No que concerne à fixação do desvio padrão (σ) associado ao valor médio da variável ($\bar{X}$) deve-se ter presente que para dado um conjunto de $\underline{n}$ observações:

- o intervalo $\bar{X} \pm \sigma$ contém 68% das observações;
- o intervalo $\bar{X} \pm 2 \cdot \sigma$ contém 95% das observações;
- o intervalo $\bar{X} \pm 3 \cdot \sigma$ contém 99,7% das observações;

Como o coeficiente de variação é dado por:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} \dots\dots\dots$$

(IV.12)

Ao se fixar um coeficiente de variação para todas as variáveis o desvio padrão de cada variável deve ser igual a:

- (CV) ao se admitir que 32% dos valores para as variáveis podem reflectir um erro superior a $\pm CV$ do seu valor médio;
- (CV/2) ao se admitir que 5% dos valores para as variáveis podem reflectir um erro superior a $\pm CV$ do seu valor médio;
- (CV/3) ao se admitir que 0,3% dos valores para as variáveis podem reflectir um erro superior a $\pm CV$ do seu valor médio.

2.4 Análises Tipo

Após a selecção dos parâmetros de aferição de desempenho do modelo e tendo por base não só o tipo de erros quanto à sua ocorrência (sistemáticos e aleatórios) bem como de que modo a geração de erros pode ser realizada, podem-se definir quatro tipos de procedimentos iterativos para se realizarem os testes de sensibilidade preconizados.

Admitindo que o “vector” $X [X_1, X_2, \dots, X_n]$ contém todas as variáveis que caracterizam o modelo “real” ($\text{mod}_R[k] = F_k(a_h, X)$), tanto ao nível da procura como das condições de operacionais, pode-se assim definir os seguintes procedimentos:

A. Erro de ocorrência sistemática com um dado valor $\underline{\varepsilon} \in [-\delta, +\delta]$ e incremento I :

1. Definir a variável X_i a testar
2. Fixar o erro em percentagem a introduzir em $\varepsilon = -\delta$
3. Calcular o novo valor para todas as variáveis X_i do modelo através da expressão $X_i^\varepsilon = X_i + \varepsilon \cdot X_i$ e redefinir o novo “vector” $X^\varepsilon [X_1, \dots, X_i^\varepsilon, \dots, X_n]$
4. Alterar o modelo base com os novos valores das variáveis
5. Correr o modelo de afectação obtendo-se $\text{mod}_\varepsilon[k] = F_k(a_h, X^\varepsilon)$
6. Calcular os novos parâmetros de desempenho do modelo, $P[t] = F_t(\text{mod}_R[k], \text{mod}_\varepsilon[k])P$
7. Se $\varepsilon < \delta$ fixar o novo erro em $\varepsilon = \delta + I$ e voltar a 3., caso contrário parar

B. Erro de ocorrência aleatória seguindo a Distribuição Uniforme e com um dado valor $\underline{\varepsilon} \in [-\delta, +\delta]$ e incremento I :

1. Definir a variável X_i a testar
2. Definir o número de testes aleatórios a realizar N e inicializar $n = 1$
3. Seleccionar aleatoriamente qual o valor da variável $\underline{x} \in [X_i]$ do modelo a alterar
4. Fixar o erro em percentagem a introduzir em $\varepsilon = -\delta$

5. Calcular o novo valor para a variável $\underline{x}$ através da expressão $x^k = x + \varepsilon \cdot x$ e redefinir o novo “vector” $X^\varepsilon [X_1, \dots, X_i^\varepsilon, \dots, X_n]$
6. Alterar o modelo base com o novo valor da variável
7. Correr o modelo de afectação obtendo-se $\text{mod}_\varepsilon[k] = F_k(a_h, X^\varepsilon)$
8. Calcular os novos parâmetros de desempenho do modelo $P[t] = F_t(\text{mod}_R[k], \text{mod}_\varepsilon[k])$
9. Se $\varepsilon < \delta$ fixar o novo erro em $\varepsilon = \delta + I$ e voltar a 5.
10. Se $n < N$ então $n = n + 1$ e voltar a 3., caso contrário parar

C. Erro de ocorrência sistemática e variação do seu valor médio admitindo a Lei Normal:

1. Definir a variável $\underline{X}_i$ a testar
2. Fixar o desvio padrão
3. Definir o número de testes a realizar $\underline{M}$ e inicializar $m = 1$
4. Calcular o novo valor X_i^ε para todas as variáveis $\underline{X}_i$ do modelo através do método baseado no Teorema do Limite Central ou no método de Box-Muller e redefinir o novo “vector” $X^\varepsilon [X_1, \dots, X_i^\varepsilon, \dots, X_n]$
5. Alterar o modelo base com os novos valores das variáveis
6. Correr o modelo de afectação obtendo-se $\text{mod}_\varepsilon[k] = F_k(a_h, X^\varepsilon)$
7. Calcular os novos parâmetros de desempenho do modelo $P[t] = F_t(\text{mod}_R[k], \text{mod}_\varepsilon[k])$
8. Se $m < M$ então $m = m + 1$ e voltar a 4., caso contrário parar

D. Erro de ocorrência aleatória seguindo a Distribuição Uniforme e variação do seu valor médio admitindo a Lei Normal:

1. Definir a variável $\underline{X}_i$ a testar
2. Fixar o desvio padrão
3. Seleccionar aleatoriamente qual o valor da variável $\underline{x} \in [X_i]$ do modelo a alterar
4. Definir o número de testes aleatórios a realizar $\underline{N}$ e inicializar $n = 1$

5. Definir o número de testes a realizar M e inicializar $m = 1$
6. Calcular o novo valor para a variável $\underline{x}$ através do método baseado no Teorema do Limite Central ou no método de Box-Muller e redefinir o novo “vector” $X^\varepsilon [X_1, \dots, X_i^\varepsilon, \dots, X_n]$
7. Alterar o modelo base com o novo valor da variável
8. Correr o modelo de afectação obtendo-se $\text{mod}_\varepsilon[k] = F_k(a_h, X^\varepsilon)$
9. Calcular os novos parâmetros de desempenho do modelo $P[t] = F_t(\text{mod}_R[k], \text{mod}_\varepsilon[k])$
10. Se $m < M$ então $m = m + 1$ e voltar a 5.
11. Se $n < N$ então $n = n + 1$ e voltar a 3., caso contrário parar

Observe-se que estes quatro tipos de procedimentos facilmente podem ser combinados de modo a ser possível testar o segundo tipo de análises de sensibilidade preconizadas, ou seja, nas quais se admite a simultaneidade nas fontes de erro.

2.5 O processo de selecção e condicionantes associadas a um modelo de referência

A aplicação da metodologia preconizada é bastante dependente do modelo de referência adoptado tanto no que concerne à definição das variáveis necessárias à construção do modelo a testar como aos resultados das análises.

Assim, por um lado, a selecção das variáveis a testar é função do modelo utilizado apenas se podendo avaliar os impactos de erros naquelas sobre as quais se tem controlo. Por outro lado, os resultados obtidos para um dado modelo podem não ser generalizáveis para outros tipos de modelos (com restrições à capacidade *versus* sem restrições à capacidade; estáticos *versus* dinâmicos; macroscópicos *versus* microscópicos; determinísticos *versus* estocásticos; analíticos *versus* simulação). Refira-se ainda que, mesmo entre modelos do mesmo tipo, esta condicionante também se pode encontrar presente face aos diferentes pressupostos e metodologias de cálculo utilizadas.

No entanto, uma análise comparativa das eventuais diferentes sensibilidades face às diferentes especificidades dos diversos modelos revela-se uma tarefa inabarcável

em virtude dos vastos recursos envolvidos na modelação de um mesmo sistema real. Será contudo de observar, como já referido, que a presente investigação tem como pressuposto base que as análises preconizadas sejam integradas no processo de calibração de um modelo, com os ajustamentos necessários a cada tipo de modelo, de modo a otimizar esta importante fase na construção de um modelo.

No presente trabalho adoptou-se como modelo de referência o Modelo SATURN descrito no ponto 3 do presente capítulo, uma vez que a extensa tarefa inerente à construção de um modelo representativo de um sistema rodoviário real já se encontrar realizada, nomeadamente a rede da cidade do Porto, cujo processo de construção se apresenta no Capítulo V. Também será de referir que o modelo SATURN é um modelo de referência mundialmente disseminado e para o qual existem inúmeras aplicações em redes reais.

2.6 Selecção dos parâmetros de aferição

Os resultados dos modelos de afectação de tráfego contemplam uma vasta gama de variáveis de tráfego (volumes de tráfego, velocidades, atrasos, ...) representativas do estado do sistema modelado, as quais devem ser utilizadas para a avaliação do desempenho do modelo. Esta avaliação é normalmente realizada através da comparação dos valores obtidos pelo modelo com os valores das variáveis observadas no sistema real.

Como se pôde constatar no Capítulo III existe uma grande variedade de parâmetros de aferição do desempenho de um modelo, tanto de carácter estatístico como de carácter empírico, cuja base para o respectivo cálculo são as variáveis Volume de Tráfego e Velocidade/Tempo de Percurso.

Por outro lado, também se pode afirmar que estas duas variáveis constituem a principal base de suporte dos processos de calibração de um modelo como também se encontram associadas à maior parte dos critérios de eficácia subjacentes aos objectivos da aplicação de modelos de transporte individual em meio urbano. Será de observar que o facto de estas variáveis de tráfego serem as de mais “fácil” observação e posterior tratamento também tem uma grande influência na sua utilização.

Aos parâmetros de aferição encontram-se associados critérios, ou seja, valores limite que os mesmos devem respeitar, que permitem avaliar o grau de desempenho do modelo e, conseqüentemente, se possa considerar que o modelo em causa representa com qualidade o sistema real e, conseqüentemente, é passível de aplicação. Neste ponto, deve ser salientado que a definição dos valores para os critérios deve reflectir as questões ligadas às flutuações temporais do comportamento de tráfego uma vez que estas se reflectem nos valores das variáveis de tráfego.

Assim, de modo a, por um lado, testar e definir os parâmetros de aferição de desempenho de um modelo e, por outro, fixar os respectivos critérios, deverá ser realizada uma análise da variabilidade dos valores que estes parâmetros assumem tendo por base estas flutuações.

Para a realização desta análise é necessário que o pressuposto já referido de o modelo desenvolvido se encontrar isento de erros seja válido, e que os valores para as variáveis de tráfego (X_i) sigam uma Lei Normal com um valor médio igual ao valor fornecido pelo modelo e com um dado coeficiente de variação ($CV = \frac{\sigma_{X_i}}{X_i}$), igual para todas as variáveis.

Deste modo é possível gerar novos valores para as variáveis de tráfego com o objectivo de simular os impactos nos valores das variáveis de tráfego face às flutuações temporais do comportamento da procura. Assim, o novo valor para a variável de tráfego (X_i^t) pode ser obtido adoptando o já referido método baseado no Teorema do Limite Central:

$$X_i^t = X_i + z \cdot \sigma_{X_i}$$

(IV.13)

com
 z – valor da variável normal reduzida;

ou alternativamente utilizar o também já referido método de Box-Muller:

$$X_i^t = X_i + \sigma_{X_i} \cdot \sqrt{-2 \cdot \ln u_1} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot u_2)$$

(IV.14)

com
 u_1 e u_2 - variáveis aleatórias uniformemente distribuídas em $[0,1]$

Com base nestes métodos podem assim ser gerados n conjuntos de valores para as variáveis e proceder-se ao cálculo para cada conjunto dos parâmetros de aferição de desempenho de modo não só a realizar uma análise crítica de cada um como também validar/fixar os valores dos critérios que se lhes encontram associados.

2.7 Avaliação dos impactos de erros

A aplicação de qualquer um dos procedimentos gera um grande conjunto de resultados para os valores dos parâmetros de aferição que devem ser analisados em função dos erros introduzidos. Esta análise deve ser realizada avaliando a evolução dos parâmetros de aferição do desempenho do modelo face aos erros introduzidos, podendo ser realizada pela análise da sua elasticidade.

A elasticidade de um dado parâmetro ($P[t]$) relativamente à variável X_i na qual foi introduzida o erro é dada por (adaptado de Ortuzar e Willumsen, 1990):

$$E(P[t], X_i) = \frac{\partial P[t]}{\partial X_i} \cdot \frac{X_i}{P[t]} \dots\dots\dots (IV.15)$$

Esta expressão pode ser interpretada como a modificação em percentagem do parâmetro em relação a uma dada modificação em percentagem da variável em que foi introduzido o erro.

No entanto, deve-se observar que esta análise para certos parâmetros não pode ser realizada visto que certos parâmetros têm o valor nulo para a hipótese base. Assim, propõe-se que a interpretação da elasticidade seja realizada pela análise da evolução dos valores dos parâmetros em função da modificação em percentagem da variável em que o erro foi introduzido. Esta análise poderá assim ser realizada através da representação num único gráfico do comportamento de todos os parâmetros.

3. O Modelo de Referência SATURN

3.1 Estrutura do modelo

O modelo SATURN (*Simulation and Assignment of Traffic to Urban Roads Networks*), constituído por um conjunto de programas, destina-se à análise de redes e foi desenvolvido pelo *Institute for Transport Studies*, da Universidade de Leeds (R. U.), encontrando-se largamente disseminado e aplicado desde 1981 (Van Vliet e Hall, 2002).

Este modelo foi inicialmente desenvolvido para a análise de pequenos esquemas de redes nos finais dos anos 70, tendo vindo a ser constantemente desenvolvido como um modelo convencional de afectação de tráfego no sentido de aplicação a grandes redes não só urbanas como interurbanas. Actualmente a versão mais completa (SATURN 10.3) permite a modelação de 21 000 nós de simulação e de 200 000 arcos de afectação, com um máximo de 8 250 zonas.

O conjunto de programas associado ao modelo SATURN (Figura IV.2) inclui 7 programas principais, 3 para a aplicação do modelo¹⁸ e 4 destinados à sua análise que permitem retirar um grande conjunto de informação (programas P1X - análise gráfica, SATED - edição da rede interactiva e simulação dos nós individualmente, SATLOOK - descrição detalhada da rede e SATDB - base de dados).

A este conjunto principal ainda se encontram associados programas auxiliares que permitem a criação e realização de operações de matrizes (MX) e a aplicação do Método da Máxima Entropia (Willumsem, 1981; Van Zuylen e Willumsem, 1980) com base em contagens de tráfego (SATPIJA e SATME2), bem como de programas para a criação de “sub-matrizes” e/ou de “sub-redes” (SATCH) e de optimização, nomeadamente para a coordenação de sinais luminosos (SATOFF).

No que respeita a programas auxiliares, existem ainda os que permitem a interpretação dos ficheiros binários resultantes da aplicação dos programas específicos ao modelo SATURN (DACHEX e DALOOK) bem como para a exportação e

¹⁸ Observe-se que tanto SATALL como SATURN9 são ficheiros de procedimentos que incluem o programa SATEASY (afectação) associado a SATSIM (simulação), e estes dois programas agrupados com SATNET (preparação da rede), respectivamente

importação de ficheiros, binários para texto ASCII e vice-versa (DADUMP E DALOAD). Este tipo de programas torna possível a criação de programas específicos para a realização de tratamentos de dados e outros tipos de análises automáticas.

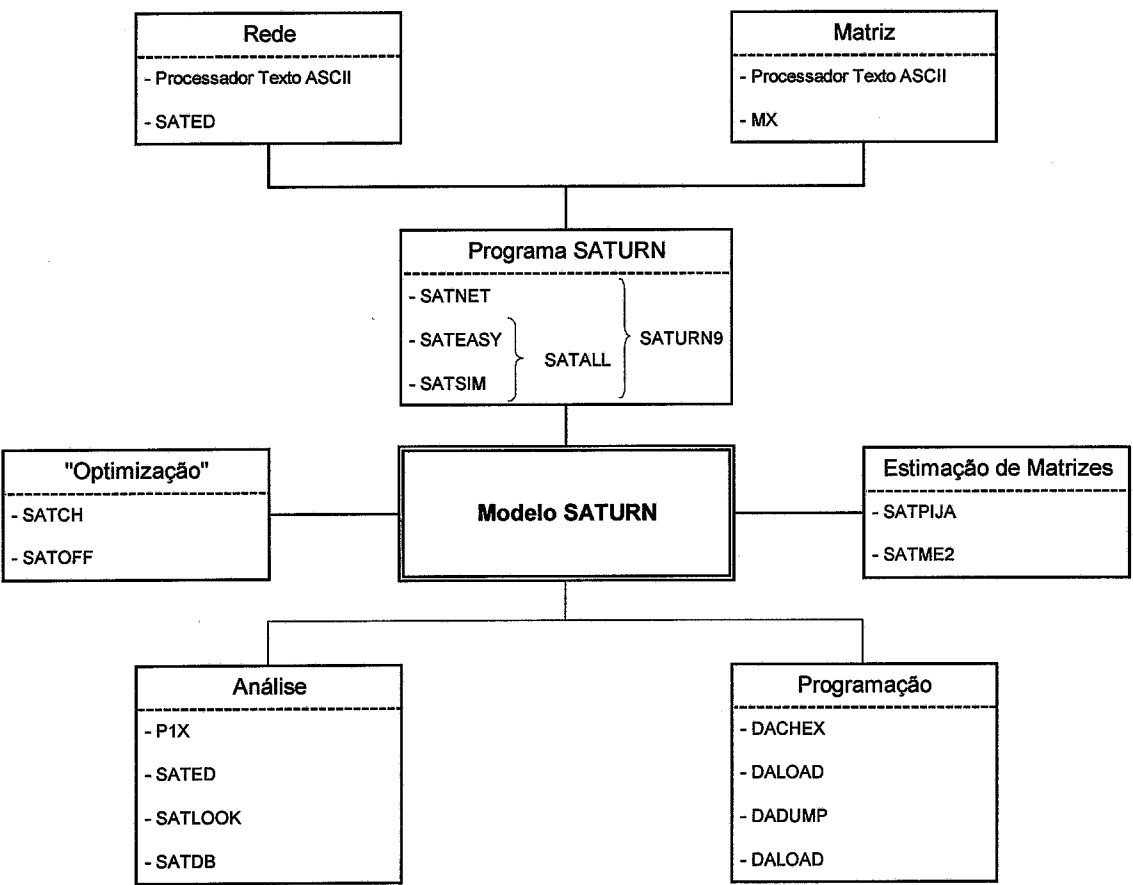


Figura IV.2 - Estrutura do modelo SATURN

Por último, será de observar que a criação dos ficheiros de dados, quer para a definição da Matriz Origem-Destino, quer os referentes à codificação da rede, pode ser realizada ou através da utilização de um qualquer editor de texto de código ASCII seguindo um dado conjunto de especificações, ou através do recurso dos programas de edição interactiva MX e SATED, respectivamente.

3.2 Princípios básicos de modelação

O modelo SATURN, tal como qualquer outro, necessita da definição de uma rede e de uma Matriz Origem-Destino que ao serem introduzidos no programa afecta as viagens aos percursos, através da aplicação da técnica de afectação previamente fixada, e simula o comportamento do tráfego na rede, calculando os volumes totais nos arcos que constituem a rede e os “custos” correspondentes (tempos, atrasos, distâncias percorridas, etc).

Neste modelo podem ser fixadas qualquer uma das quatro técnicas de afectação já mencionadas, ou seja:

- i) tudo ou nada
- ii) estocástica
- iii) equilíbrio de utilizador, aplicando o algoritmo de Frank-Wolfe ou o método das médias sucessivas;
- iv) equilíbrio estocástico, aplicando o método das médias sucessivas.

No modelo SATURN ainda é permitida a definição de mais que uma classe de utilizadores, através de várias matrizes O-D ou por percentagem de viagens, e a definição de um equilíbrio elástico que consiste na variação da matriz O-D em função dos custos de viagem ($M_{ij} = f(C_{ij})$). Finalmente a afectação pode ainda ser realizada pela subdivisão do período de tempo total modelado em que os resultados da afectação transitam entre períodos subsequentes.

A afectação da matriz à rede é realizada em duas etapas. Na primeira o modelo, aplicando a técnica de afectação seleccionada e o algoritmo respectivo, calcula o(s) caminho(s) mínimo(s) entre cada origem e cada destino e afecta as viagens aos arcos que constituem esse(s) caminho(s), tendo por base os atrasos calculados pela simulação com os volumes anteriormente afectados. Com base nestes volumes afectados o modelo calcula os novos atrasos nos arcos e nos nós e reinicializa a tarefa de afectação (ver Figura IV.3).

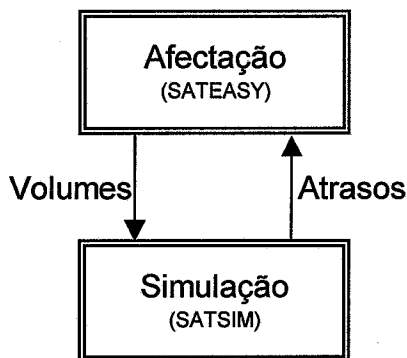


Figura IV.3 - Processo afecção/simulação

A simulação do movimento de veículos é realizada através do recurso aos denominados histogramas de volumes (*Cyclic Flow Profiles* – Robertson, 1974). No modelo SATURN estes histogramas são constantes ao longo do período de tempo modelado, representando cada histograma um ciclo dividido num número finito de intervalos de tempo representando o volume de tráfego médio nesse intervalo.

Estes histogramas são definidos para cada movimento isoladamente tendo cada um associado cinco histogramas (ver Figura IV.4) que definem os seguintes perfis para cada nó:

- “IN” – volume a montante do arco de entrada;
- “ARRIVE” – volume a jusante do arco de entrada, obtido pela derivação do anterior tendo por base um modelo de dispersão de pelotões;
- “QUEUE” - número médio de veículos em fila de espera e que, por um lado, contribui para o cálculo do atraso médio por veículo e, por outro, permite ao modelo ter em consideração o efeito de “bloqueamento de intersecções anteriores” (blocking back);
- “ACCEPT” – volume que pode realizar o movimento, calculado com base não só no tipo de cruzamento, tipo de via, prioridade e capacidade do movimento, bem como na existência de filas de espera no arco de saída;
- “OUT” – volume a montante no arco de saída, calculado com base nos dois anteriores e que contribui para o cálculo do perfil “IN” deste arco.

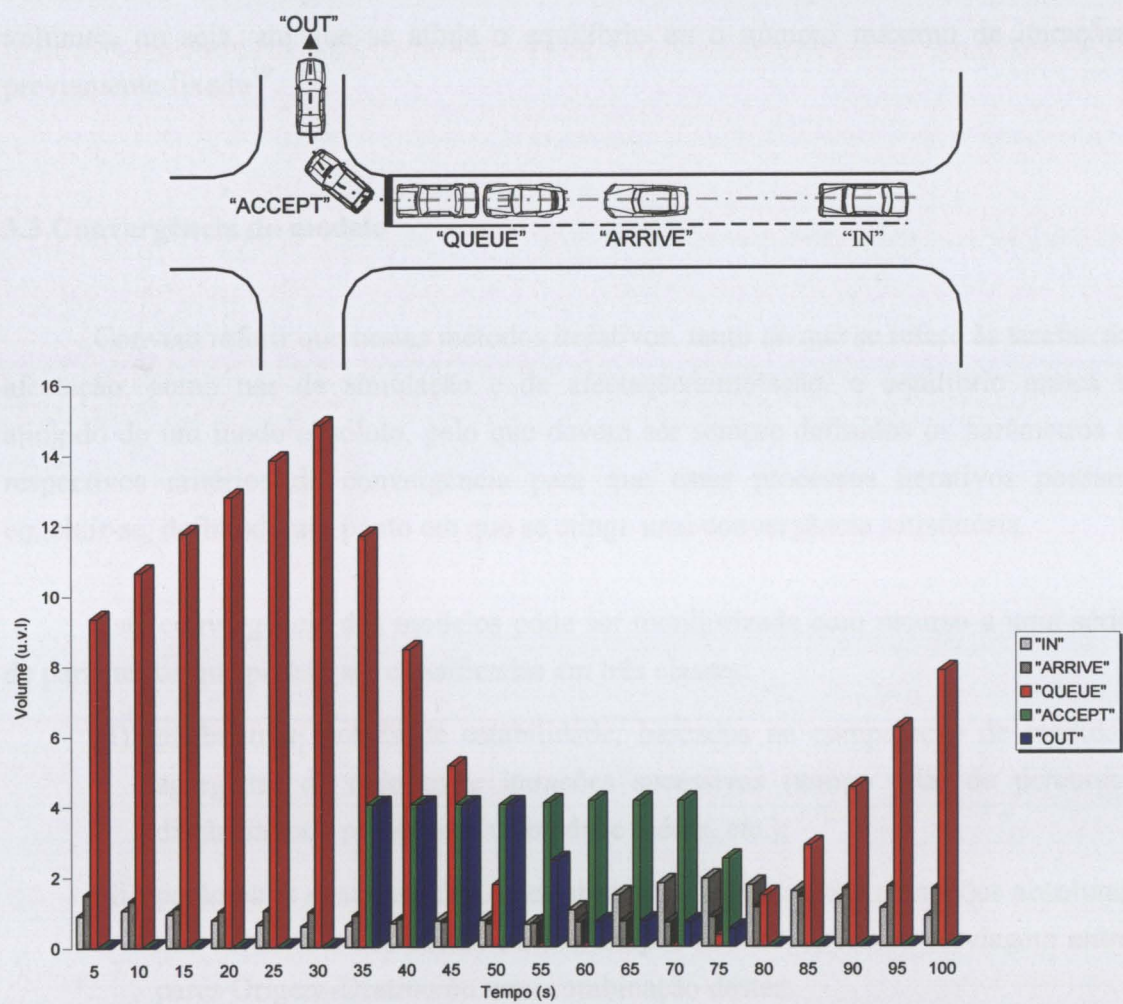


Figura IV.4 - Exemplo de histogramas de volumes

Face ao princípio seguido em cada histograma, os histogramas de saída de uma intersecção geram os perfis para as seguintes, servindo este efeito para “movimentar” o tráfego ao longo da rede. Por outro lado, o facto de as diversas correntes de tráfego se intersectarem implica obrigatoriamente a existência de alguma interacção entre as mesmas pelo que o conhecimento prévio dos volumes que confluem num mesmo nó é de importância fulcral, nomeadamente o cálculo dos histogramas que necessita do conhecimento do volume de conflito. O modelo SATURN modela esta interacção de um modo iterativo na medida em que o cálculo da n-ésima iteração é baseado no volume de conflito da (n-1)-ésima iteração.

Deste modo, as tarefas de afectação e de simulação, não só consideradas isoladamente como em conjunto, são realizadas de um modo iterativo até que os

volumes nos arcos sejam consistentes com os atrasos a que correspondem esses volumes, ou seja, até que se atinja o equilíbrio ou o número máximo de iterações previamente fixado¹⁹.

3.3 Convergência do modelo

Convém referir que nestes métodos iterativos, tanto no que se refere às tarefas de afectação, como nas de simulação e de afectação/simulação, o equilíbrio nunca é atingido de um modo absoluto, pelo que devem ser sempre definidos os parâmetros e respectivos critérios de convergência para que estes processos iterativos possam concluir-se, definindo um ponto em que se atinge uma convergência satisfatória.

Esta convergência dos modelos pode ser monitorizada com recurso a uma série de parâmetros que podem ser classificadas em três classes:

- i) parâmetros globais de estabilidade, baseados na comparação de medidas agregadas da rede entre iterações sucessivas (tempo total de percurso, distância total percorrida, velocidade média, etc.);
- ii) parâmetros desagregados de estabilidade, baseados nas alterações absolutas dos volumes e dos custos ou dos tempos nos arcos, custos de viagem entre pares Origem-Destino ou uma combinação destes;
- iii) parâmetros de proximidade, que reflectem a proximidade dos volumes e custos do objectivo da afectação, observando-se que estes parâmetros apenas podem ser utilizados caso exista a formulação do objectivo da afectação, como é o caso do equilíbrio.

Será ainda de observar que a utilização destes parâmetros depende da técnica de afectação:

- no equilíbrio de utilizador e no equilíbrio estocástico tanto os parâmetros de estabilidade como os de proximidade devem ser satisfeitos;

¹⁹ Quando o critério de convergência fixado for o número máximo de iterações nada se poderá afirmar sobre se o equilíbrio foi ou não atingido

- nos estocásticos puros os parâmetros de proximidade não podem ser utilizados e a estabilidade, caso possível, deve ser verificada com recurso a várias afectações utilizando diferentes “sementes” para a geração de números aleatórios;
- na afectação com diferentes classes de utilizadores a estabilidade deve ser monitorizada individualmente e a proximidade para o conjunto;
- na afectação dinâmica a convergência pode ser monitorizada para todo o período.

Van Vuren (1997) aconselha a utilização dos seguintes parâmetros para a monitorização da convergência dos modelos, face não só à sua facilidade de cálculo, de interpretação e de explicação, como também pela sua robustez na estabilidade de afectação:

- média da diferença absoluta nos volumes de tráfego entre iterações sucessivas

$$\overline{DA} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_i^k - Q_i^{k-1}| \dots\dots\dots (IV.16)$$

com

N – número de arcos;
 Q_i^k - volume no arco i na iteração k ;

- média da diferença relativa nos volumes de tráfego entre iterações sucessivas:

$$\overline{DR} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Q_i^k - Q_i^{k-1}|}{Q_i^{k-1}} \dots\dots\dots (IV.17)$$

- percentagem de arcos da rede em que os volumes se alteram menos que 5% entre iterações sucessivas:

$$Q^{5\%} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i^{5\%} \quad \text{com} \quad A_i^{5\%} = \begin{cases} 1 & \text{se } |Q_i^k - Q_i^{k-1}| \leq 0,05 \cdot Q_i^{k-1} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (IV.18)$$

No que concerne ao parâmetro de proximidade o mesmo autor recomenda a utilização do “intervalo dual” (δ - *duality gap*) que se caracteriza por representar a

“distância” a que a presente afectação se encontra do equilíbrio. Este parâmetro é definido pela diferença relativa entre o custo total determinado pela afectação efectiva e o custo total se todas as viagens utilizassem os caminhos de custo mínimo:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^N [C_i(Q_i^k) \cdot (Q_i^k - F_i^{k+1})]}{\sum_{i=1}^N [F_i^{k+1} \cdot C_i(Q_i^k)]} \dots\dots\dots(IV.19)$$

com

$C_i(Q_i^k)$ – custo no arco i face à estimativa de volume actual V_i^k ;
 F_i^{k+1} - volume no arco i face a uma afectação “tudo ou nada” com custo $C_i(Q_i^k)$.

Os critérios de referência para estes parâmetros na comparação entre os valores assumidos em iterações consecutivas encontram-se apresentados no quadro seguinte, observando-se que para os parâmetros de estabilidade é suficiente que apenas um dos três seja cumprido para se assegurar a convergência do modelo. No que se refere ao parâmetro de proximidade deve-se garantir que o mesmo cumpra o critério quer no processo iterativo afectação/simulação quer no processo isolado de afectação.

Parâmetro	Critério
$\overline{DA}$ ou $\overline{DR}$ ou %V	< 1 veíc./h < 1% > 95%
δ	< 1%

Quadro IV.1 –Critérios de convergência

No modelo SATURN a convergência na tarefa de simulação também deve ser assegurada, recomendando-se que a sua monitorização seja realizada através do cálculo da diferença média de todos os histogramas que compõem o perfil de saída (“OUT”),

expressa em veículos hora, entre sucessivas iterações. Van Vuren (1997) recomenda que este valor seja inferior a 1 veíc./h, embora refira que este critério é difícil de cumprir em redes muito congestionadas, face à maior instabilidade.

3.4 O processo de codificação do modelo

Como qualquer modelo de afectação o modelo SATURN necessita da definição de uma rede e de uma matriz Origem-Destino. A rede pode ser definida com dois níveis de detalhe denominadas por zonas de simulação (*simulation*) e de atribuição (*buffer*), para além das zonas externas.

Na zona de simulação existe um maior detalhe e a codificação é realizada ao nível do nó, podendo ser expansível ao arco, enquanto que na zona de afectação a codificação é realizada apenas ao nível do arco. A finalidade desta última zona é a de permitir uma maior área de rede que de outra maneira não seria modelada, visto que a modelação desta parte da rede assim definida exige um menor esforço tanto ao nível de construção (codificação, calibração e validação) como ao nível de potência de cálculo.

A matriz Origem-Destino representa as viagens em que as zonas de origem se encontram nas linhas e as zonas de destino nas colunas. Observe-se que neste modelo não se exige qualquer obrigatoriedade quanto à numeração das zonas.

Os dados de entrada referentes à codificação da rede encontram-se divididos em onze registos, sendo os três primeiros obrigatórios e os restantes opcionais:

- i) especificações de opções;
- ii) título da rede;
- iii) especificações de parâmetros;
- iv) atributos da rede de simulação;
- v) conectores de centroides em simulação;
- vi) atributos da rede de atribuição;
- vii) restrições de movimentos;
- viii) coordenadas dos nós e dos centroides;
- ix) linhas de Transporte Público;
- x) secções de contagens;
- xi) custos generalizados.

O primeiro registo relaciona-se com as opções disponíveis para a inicialização da rede designadamente para a utilização ou de modelos já existentes ou para a afectação dinâmica (período modelado subdividido em períodos mais curtos).

A utilização do registo com a identificação da rede permite a distinção entre as várias corridas dos programas associados ao modelo necessárias quando se está no processo de calibração, bastante útil para a distinção das diversas “correções” efectuadas.

O registo relativo aos parâmetros define as variáveis do modelo não só necessárias para a interpretação da rede e da matriz, para as tarefas de afectação e de simulação, como também de formatação da entrada e da saída dos dados. Neste registo também se podem definir, por um lado, valores globais para as variáveis de funcionamento que o modelo interpreta como valores por defeito em caso de omissão e, por outro, os valores de controlo para os diversos atributos dos arcos e dos nós de modo a salvaguardar eventuais erros.

A lista de variáveis inerente a este registo é bastante extensa, podendo ser dividida em quatro tipos:

- 33 variáveis lógicas (verdadeiro ou falso);
- 30 variáveis inteiras (números inteiros);
- 27 variáveis reais (números reais);
- 7 variáveis de caracteres (lista de caracteres alfanuméricos).

No quarto registo, referente à descrição da rede de simulação, é necessário uma descrição pormenorizada dos nós, dos ramos de entrada, dos movimentos e, caso exista, da programação dos sinais luminosos.

Os atributos necessários para a caracterização de cada nó incluem:

- identificação do nó (número do nó);
- número de arcos que confluem no nó;
- tipo de nó, onde se pode seleccionar dentro das seguintes seis opções:
 - 1-externo (fronteira entre rede de simulação e de atribuição);
 - 2-prioritário;

- 3-giratório;
- 4-controlado por sinais luminosos;
- 5-fictício;
- 6-giratório em que são permitidos os movimentos em U;
- intervalo crítico para movimentos não prioritários (observe-se que não existe a distinção deste valor conforme o tipo de movimento);

Se o nó codificado for uma intersecção giratória são necessários os seguintes dados adicionais:

- tempo de circulação da placa central;
- capacidade máxima (volume máximo que pode circular na placa central considerando que o volume de entrada é nulo).

Para o caso de intersecções controladas por sinais luminosos ainda haverá que definir:

- ciclo
- número de fases;
- duração das fases;
- tempos interverdes (tempo de amarelo + tempo de tudo vermelho);
- identificação dos movimentos permitidos por fase;
- desfasamento no caso de existir coordenação entre as diferentes intersecções deste tipo.

Relativamente aos arcos que confluem nos nós os atributos necessários são:

- identificação do nó a montante;
- capacidade de stockagem;
- número de vias (observe-se que se o arco não for homogéneo no que se refere à sua geometria haverá a necessidade de se introduzir nós fictícios);
- tempo de percurso ou velocidade;
- comprimento;
- identificação dos movimentos permitidos;
- débitos de saturação dos movimentos;
- níveis de prioridade dos movimentos;
- afectação das vias aos movimentos;
- caracterização das relações volume-tempos de percurso ou volume-velocidade:

- tempos de percurso (t_0) ou velocidades em regime livre ($t_0 = V_0/L$);
- tempos de percurso (t_Q) ou velocidades em capacidade ($t_Q = V_Q/L$);
- capacidade do arco (Q);
- potência da curva (n);
- sendo o tempo de percurso correspondente ao volume V calculado por:

$$t(V) = t_0 + A \cdot V^n \dots\dots\dots(IV.20)$$

com

$$A = \frac{t_c - t_0}{Q^n} \dots\dots\dots(IV.21)$$

Neste ponto será de salientar que face ao volume de informação necessário e como já referido, quer utilização de fichas para o levantamento de dados quer o recurso a valores tabelados para a caracterização das variáveis de funcionamento, torna-se fundamental para a concretização do processo de codificação da rede.

No registo referente aos conectores de centróides são definidas as ligações das zonas de simulação à respectiva rede. Estas ligações são realizadas aos arcos devendo-se ter em atenção que as mesmas são unidireccionais, ou seja, as viagens “entram” e “saem” da rede no sentido em que a ligação é realizada. Deste modo, caso se esteja perante uma situação em que se pretenda realizar esta ligação nos dois sentidos do arco, necessita-se de utilizar dois conectores de centróides.

Estas ligações aos centróides são de importância fundamental conforme referido no Capítulo III, designadamente a possibilidade destas ligações terem influência na selecção de percursos (ver exemplo da Figura III.3), e à qual acresce este facto associado a no máximo o modelo SATURN admitir seis conectores de centroides por zona de simulação.

Por outro lado, convém referir que é habitual a utilização de capacidade “ilimitada” nestas ligações o que poderá originar erros na determinação do caminho mais curto. De facto, caso exista numa zona um conector de centroide localizado num arco caracterizado por uma melhor acessibilidade às outras zonas, o modelo SATURN irá afectar todas as viagens com origem ou destino nesta zona através deste conector

pelo que se deve ter especial atenção quando numa zona for necessário realizar a ligação do centroide a mais de que um arco.

Os dados relativos à rede de atribuição são identificados no sexto registo, sendo definida a estrutura e as propriedades desta parte da rede, observando-se que se deve ter sempre presente que nesta zona ao não serem tidos em consideração os atrasos nos nós, os mesmos se deverão reflectir nos atributos que caracterizam as condições de operação dos arcos.

Os dados necessários para a caracterização dos arcos são:

- identificação dos nós extremos;
- tempos de percurso ou velocidades em regime livre;
- tempos de percurso ou velocidades em capacidade;
- número de sentidos;
- comprimento
- potência da curva

Observe-se que nesta codificação também são definidos os conectores de centroides, através da inserção do caractere C na identificação dos nós, pelo que nesta parte da rede estas ligações são realizadas ao nível do nó e podem ter um ou os dois sentidos.

O sétimo registo destina-se à identificação dos arcos e movimentos cuja circulação pode ser restringida a certas classes de veículos, tais como vias BUS. Estas restrições também podem ser úteis para a penalização de certos movimentos na medida em que, por exemplo, os veículos pesados demoram mais tempo a realizar um dado movimento que os veículos ligeiros.

As coordenadas cartesianas associadas a cada nó e a cada centroide são definidas no oitavo registo, permitindo a representação gráfica da rede o que torna possível a visualização da rede.

O nono registo permite a descrição das linhas de transporte público, através da identificação dos nós ao longo da rede descrevendo os respectivos percursos e da sua frequência. O modelo com base nesta informação irá realizar uma “pré-afecção” destes veículos à rede antes de afectar a matriz das viagens.

Os volumes observados necessários à calibração e validação do modelo podem ser incorporados através da sua identificação no décimo registo. Esta informação é bastante útil não só porque permite uma visualização das diferenças como permite o cálculo de certos parâmetros de calibração/validação de um modo automático.

Por último, o décimo primeiro registo permite a definição de diferentes coeficientes de custo associados ao valor do tempo e da distância percorrida para o cálculo do custo generalizado referente a diversas classes de utilizadores. O custo generalizado para cada classe no modelo SATURN é definido pela expressão usual:

$$C_k = PPM_k \cdot T + PPK_k \cdot D \dots\dots\dots(IV.22)$$

com

- PPM [/min.]- custo por minuto (*Pence per minute*);
- T [min.] - tempo total de percurso;
- PPK [/km] - custo por quilómetro(*Pence per kilometre*);
- D [Km] – distância total percorrida

Observe-se que quando se utilizam as técnicas de afectação estocásticas a distribuição de custos nos arcos pode ser seleccionada entre as seguintes três formas:

- i) Distribuição rectangular em que existe uma igual probabilidade do custo no arco estar compreendido no intervalo $[C - C \cdot SUET^{20}; C + C \cdot SUET]$;
- ii) Distribuição normal com média igual a C e desvio padrão igual a C·SUET (SUET como coeficiente de variação);
- iii) Distribuição normal com média igual a C e variância igual a C.SUET (SUET como coeficiente de dispersão).

²⁰ SUET – variável cujo valor é definido no registo relativo à caracterização das variáveis

4 Estrutura das Análises de Sensibilidade para o Modelo de Referência

4.1. Erros ao nível da matriz

No que se refere à introdução de erros na matriz e tentando-se simular “incorecções” que têm probabilidade de ocorrer, como já referido anteriormente, esta foi efectuada fixando previamente uma dada amplitude de variação ($k \in [-\mu\%; +\mu\%]$) e considerando os seguintes casos:

- i) alteração global à matriz: factorização de todos os valores das células da Matriz Origem-Destino (t_{ij}):

$$t_{ij}^k = k \cdot t_{ij} \dots\dots\dots(IV.23)$$

com

$i, j = 1, \dots, Z;$
 Z – número de Zonas;

- ii) alteração das células admitindo a lei normal: substituição dos valores de todas as células considerando para cada uma a lei normal com média igual ao valor “correcto” da célula e desvio padrão em percentagem deste valor (todas as células com igual coeficiente de variação)

$$t_{ij}^k = t_{ij} + z \cdot \sigma \dots\dots\dots(IV.24)$$

com

z - variável normal reduzida

- iii) alteração aleatória a uma célula da matriz: adição de n viagens em função do número total de viagens da Matriz numa célula da Matriz O-D escolhida aleatoriamente:

$$t_{ab}^k = t_{ab} + k \cdot \sum_{i,j} t_{ij} \dots\dots\dots(IV.25)$$

com

a, b - variáveis geradas aleatoriamente no intervalo $[1, 2, \dots, Z];$

iv) alteração a todas as células por Origem: factorização das viagens com uma dada origem proporcionalmente ao total da zona e em função do número total das viagens da Matriz:

$$t_{oj}^k = \frac{t_{oj}}{\sum_j t_{oj}} \cdot k \cdot \sum_{i,j} t_{ij} \dots\dots\dots$$

(IV.26)

com
o – origem fixada (o = 1, 2, ..., Z);

v) alteração a todas as células por Destino: factorização das viagens com um dado destino proporcionalmente ao total da zona e em função do número total das viagens:

$$t_{id}^k = \frac{t_{id}}{\sum_i t_{id}} \cdot k \cdot \sum_{i,j} t_{ij} \dots\dots\dots$$

(IV.27)

com
d – destino fixado (d = 1, 2, ..., Z);

Resumidamente com a simulação destes cinco casos pretende-se testar a sensibilidade do modelo face a erros globais de sobre ou subestimação do número de viagens, a “erros” decorrentes da variabilidade temporal do comportamento da procura e face erros localizados de sobrestimação derivados da construção da Matriz Origem-Destino.

Saliente-se que a metodologia atrás preconizada para a realização das análises de sensibilidade no que concerne à procura podem ser generalizáveis a qualquer tipo de modelo que utilize o conceito de zonas.

4.2. Erros ao nível da oferta

Relativamente à modificação da oferta e face às especificações do modelo SATURN, nomeadamente dos dados necessários à sua codificação, o segundo tipo de

análises de sensibilidade propostas concentraram-se nas variáveis de funcionamento responsáveis pelas condições de funcionamento da rede, nomeadamente:

- i) alteração do intervalo crítico;
- ii) alteração das “capacidades” (débitos de saturação e/ou capacidades de viragens e/ou capacidades dos arcos), nas seguintes hipóteses:
 - em toda a rede;
 - na zona de simulação;
 - em todos os nós;
 - nos nós de simulação que representam cruzamentos prioritários;
 - nos nós de simulação que representam cruzamentos controlados por sinais luminosos;
 - na zona de atribuição;
- iii) alteração das velocidades em regime livre nas seguintes hipóteses:
 - em toda a rede;
 - na zona de simulação;
 - em todos os arcos;
 - em todos os arcos cujo nó a jusante representa um cruzamento prioritário;
 - em todos os arcos cujo nó a jusante representa um cruzamento controlado por sinais luminosos;
 - na zona de atribuição;

obs.: a diminuição da velocidade nos arcos de atribuição é limitada inferiormente pelo valor da velocidade em capacidade;
- iv) alteração das velocidades em regime de capacidade (obs.: alteração limitada superiormente pela velocidade em regime livre);
- v) alteração das velocidades em regime livre e de capacidade nas seguintes hipóteses:
 - em toda a rede;
 - na zona de atribuição;
- vi) alteração da potência da função volume-velocidade.

Sucintamente, com a realização destes testes pretendeu-se testar qual o impacto no modelo face a erros eventualmente cometidos na estimação dos valores de qualquer uma das variáveis de funcionamento.

4.3. Procedimentos semi-automáticos de análise

A realização das análises preconizadas pressupõe a realização de inúmeros cálculos que podem ser divididos em quatro etapas:

- i) geração de erros
- ii) introdução dos erros na codificação do modelo
- iii) Aplicação do modelo
- iv) Cálculo dos parâmetros

Assim, de modo a facilitar esta tarefa foram desenvolvidos vários programas de cálculo automático específicos, em linguagem Pascal, com capacidade para:

- gerar erros;
- interpretar e modificar os ficheiros de dados do programa SATURN de modo a introduzir-lhes o erro;
- extrair as variáveis de tráfego dos ficheiros de resultados do programa SATURN;
- calcular os parâmetros de aferição do desempenho.

Por outro lado, face à necessidade de se realizar um elevado número de corridas do programa SATURN, também houve a necessidade de nos programas de modificação de ficheiros de dados se criarem rotinas capazes de gerarem ficheiros de procedimentos que permitissem a automatização das corridas do modelo SATURN.

Após a obtenção dos ficheiros com os todos parâmetros em análise desenvolveram-se rotinas destinadas à exportação destes dados para folhas de cálculo (*Microsoft Excel*) e, com base em macros expressamente programadas para o efeito, proceder-se à representação gráfica destes resultados.

Deste modo, juntamente com os programas associados ao modelo SATURN, desenvolveu-se a estrutura de cálculo automático que se encontra esquematicamente apresentada na Figura IV.5.

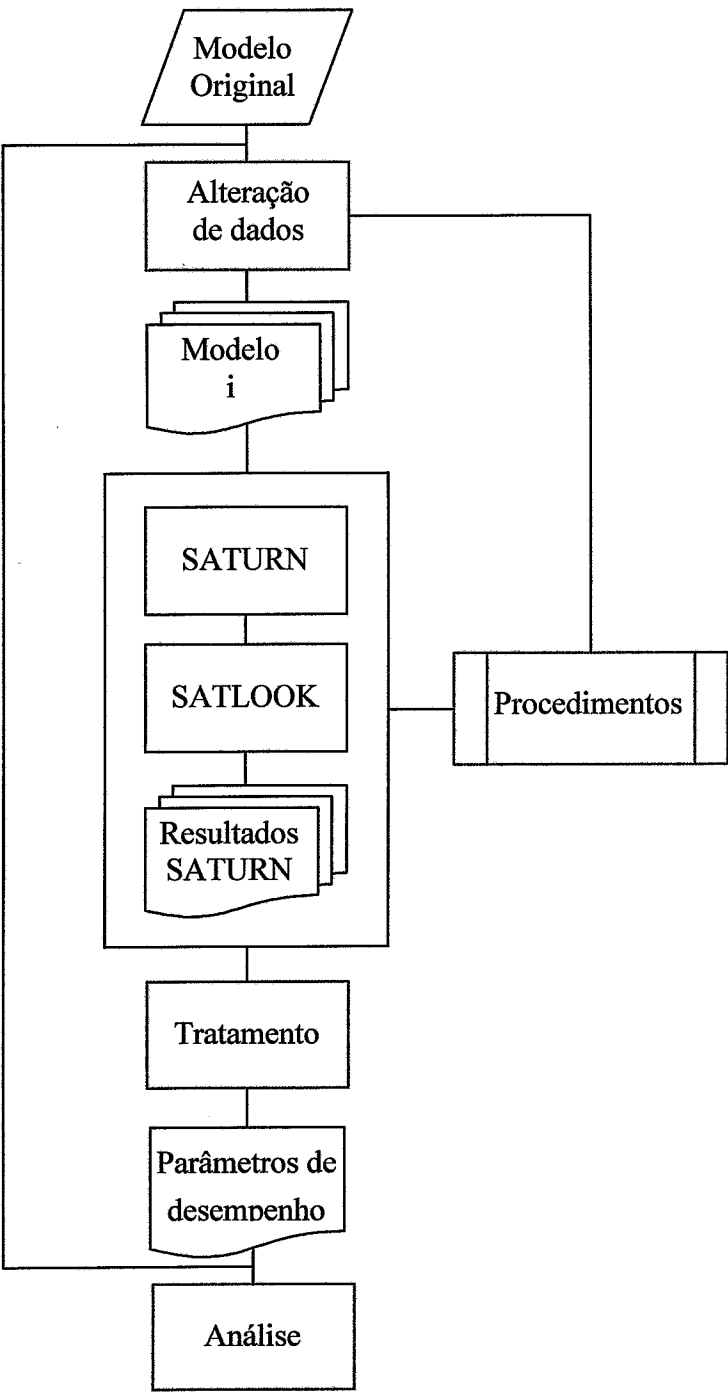


Figura IV.5 - Processamento dos dados para a análise de sensibilidade

V. AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE ERROS NO DESEMPENHO POTENCIAL DOS MODELOS

1. Preâmbulo

O desenvolvimento de modelos de redes reais urbanas é bastante delicado em virtude da complexidade de funcionamento deste tipo de redes, necessitando de inúmeros recursos face à quantidade e diversidade de dados, pelo que a utilização de metodologias que permitam uma optimização do processo de construção deste tipo de modelos assume particular relevância.

A aplicação da metodologia de análise definida no capítulo anterior, nomeadamente a realização de análises de sensibilidade às variáveis de um modelo com o objectivo de avaliar o impacto de erros no desempenho de um modelo, permite de algum modo ir de encontro a esta problemática pressupondo, no entanto, a existência prévia de um sistema modelado virtual como representativo da “realidade”.

Deste modo, o primeiro passo para a avaliação da metodologia apresentada consistiu no desenvolvimento de um modelo de afectação de tráfego que permitisse a realização de um vasto conjunto de análises.

Face a este campo de aplicação e à disponibilidade de dados adoptou-se como modelo de referência o modelo SATURN já desenvolvido para a rede rodoviária da cidade do Porto, cujo processo de construção se encontra descrito no ponto seguinte.

A aplicação da metodologia preconizada foi então efectuada com recurso a este modelo, tendo sido realizadas extensas e sistematizadas corridas do programa de afectação/simulação SATURN, simulando-se os diversos erros através da alteração de um modo estruturado dos valores quer das variáveis que caracterizam a procura,

representada pela matriz Origem-Destino, quer das variáveis de funcionamento responsáveis pela descrição das condições operacionais da oferta. De modo a avaliar os impactos das diversas fontes de erro no desempenho global do modelo foi previamente realizada uma “calibração” base da metodologia com o objectivo de seleccionar os parâmetros de aferição a utilizar.

2. Modelo SATURN da cidade do Porto

2.1 Preâmbulo

O modelo do Porto foi desenvolvido no âmbito do Projecto MUSIC (*Management of traffic USIng traffic flow Control*) financiado pelo Programa Transportes da Comunidade Europeia, e cujo objectivo consistia na optimização dos planos de regulação dos sinais luminosos tendo em conta a re-afecção dos veículos provocada pela implementação de determinadas políticas de transporte (MUSIC, 1999; Tavares, 1997).

Neste projecto de investigação foi prevista na cidade do Porto uma demonstração real utilizando os planos de regulação calculados pelo modelo MUSIC e cujos resultados da sua implementação foram previamente avaliados com recurso ao modelo SATURN, de modo a verificar se cumpriam determinados requisitos estabelecidos de acordo com os seguintes objectivos:

- redução do congestionamento no centro da cidade sem penalizar as áreas adjacentes;
- melhoria da segurança e comodidade dos peões;
- melhoria da eficiência dos transportes públicos.

A área abrangida por este estudo estava integralmente controlada pelo sistema centralizado de controlo de tráfego existente na cidade do Porto (SIGA-Sistema Inteligente de Gestão Automática baseado na filosofia GERTRUDE (*Gestion*

Electronique de Régulation du Trafic Routier Urbain Défiant les Embouteillages). A avaliação deste ensaio decorreu em locais criteriosamente escolhidos, tendo-se o cuidado de os ter seleccionado não apenas na zona de estudo, mas também numa zona de controlo de forma a se analisar a eventual existência de efeitos provocados pelas medidas introduzidas na área de demonstração.

Deste modo, foi definido que a área a modelar deveria incluir não só as zonas controladas pelo sistema centralizado de controlo de tráfego (Figura V.1), onde seriam implementados os novos planos de regulação, bem como a sua área de influência.

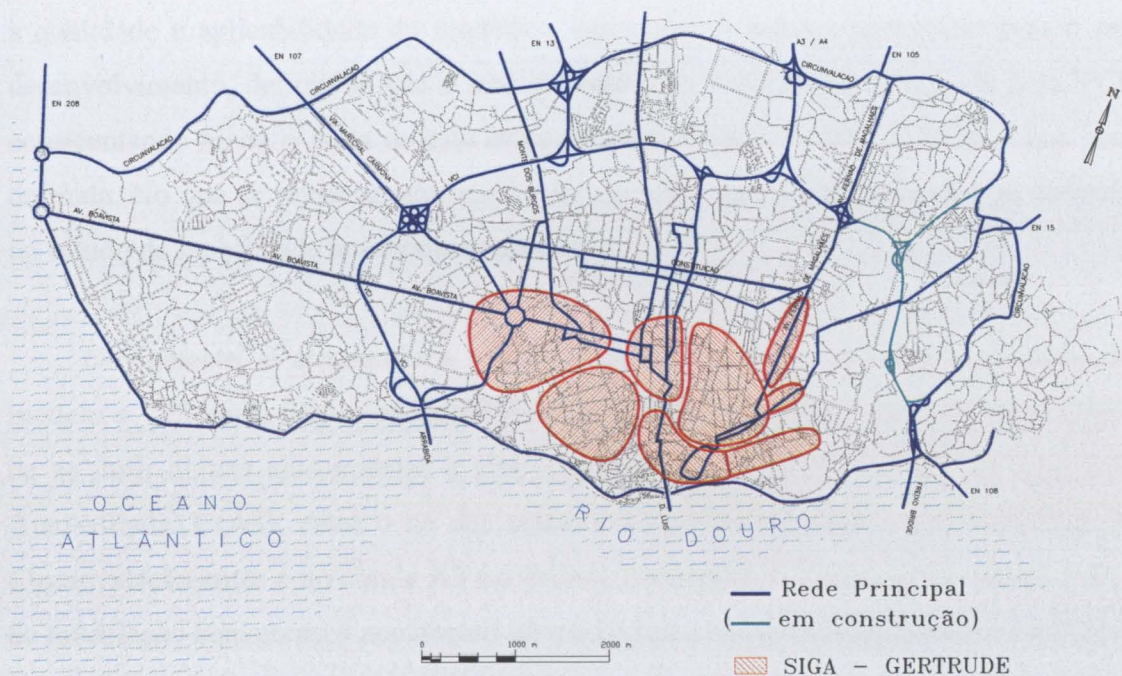


Figura V.1– Rede rodoviária da cidade do Porto

Por outro lado, as características da rede rodoviária também têm uma grande influência na definição dos arcos a modelar. Na cidade do Porto as infra-estruturas rodoviárias caracterizam-se por uma hierarquia muito pouco definida, principalmente no seu centro. Será ainda de referir que quando se iniciou o desenvolvimento do modelo a denominada Via de Cintura Interna (VCI) ainda não se encontrava finalizada, nomeadamente no que se refere ao troço entre o nó das Antas e a Ponte do Freixo.

Por último, será ainda de salientar que o zonamento a realizar também tem influência na definição do modelo. Neste ponto tendo presente que no ano de 1989 tinha sido realizado um Inquérito Geral à Mobilidade (STCP, 1991), optou-se por utilizar as zonas definidas nesse estudo, com ligeiras adaptações, uma vez que o trabalho inerente a esta tarefa, designadamente as tarefas relativas à caracterização e homogeneização da distribuição espacial das actividades económicas e das áreas residenciais, já se encontravam realizadas.

Conjugando todos estes factores, nomeadamente objectivos do projecto, tipo de rede e respectiva gestão, a distribuição das deslocações, e tendo em conta, por um lado, a qualidade e aplicabilidade do modelo e, por outro, o esforço necessário para o seu desenvolvimento, definiu-se que a área a modelar se encontraria delimitada pela VCI, acrescentando ainda o facto de esta infra-estrutura constituir uma fronteira física bem definida. No que se refere ao zonamento foi decidido que o mesmo seria o já definido no estudo de mobilidade anteriormente referido.

Obviamente, e atendendo a que na altura em que se iniciou a construção do modelo a VCI ainda não se encontrava completamente “fechada”, houve a necessidade de se fazer alguns ajustamentos a esta fronteira, delimitando esta parte da área pela Auto-estrada 3 (A3), entre o nó das Antas e o da Circunvalação, e pela Estrada da Circunvalação entre o nó com a A3 e o Freixo. Na Figura V.2 pode-se visualizar a área de modelação bem como o zonamento adoptado para a construção do modelo SATURN da cidade do Porto.

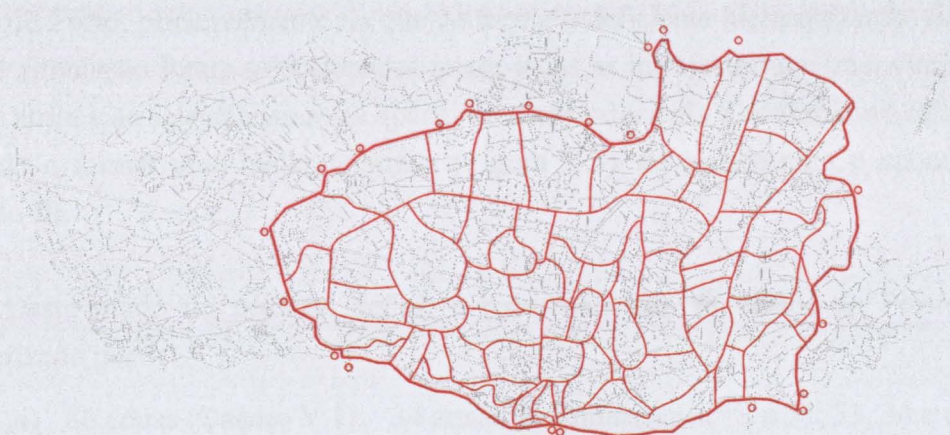


Figura V.2 - Área definida para o modelo SATURN-Porto e respectivo zonamento

2.2 Definição e codificação da rede

Após a área e o zonamento definidos o passo seguinte corresponde à selecção da rede rodoviária a modelar. Tendo por base a filosofia do modelo SATURN no que concerne à facilidade na divisão da área em simulação e atribuição, de maior e menor detalhe, respectivamente, para além das zonas exteriores, a área de estudo previamente fixada foi subdividida nestas duas zonas para limitar o esforço não só necessário para a recolha e processamento de dados bem como para a fase de calibração.

Deste modo, estas duas áreas foram definidas tendo não só em atenção o zonamento já fixado como os seguintes pressupostos:

- simulação: área da rede em que são esperados maiores impactos face às diferentes estratégias a testar e onde se verificam as maiores cargas sobre o sistema;
- atribuição: restante área.

Adicionalmente a estas duas áreas ainda houve que considerar as zonas externas que constituem as “portas” de entrada/saída das viagens cuja Origem e/ou Destino são exteriores à área em estudo.

Relativamente aos arcos seleccionados e face às características da rede viária da cidade do Porto, principalmente no que concerne à deficiente hierarquização viária, na área de simulação foram seleccionadas quase todas as infra-estruturas rodoviárias e na área de atribuição seleccionaram-se apenas os eixos principais e as vias entre estes eixos de modo a formar uma malha contínua (Figura V.3), de acordo com o apontado no Capítulo III.

Deste modo foi possível definir a rede modelada da cidade do Porto que é caracterizado por²¹:

- i) 86 zonas (Quadro V.1): 34 zonas de simulação (n^{os} 1 a 31, 33, 34 e 60);
31 zonas de atribuição (n^{os} 32, 35 a 59, e 61 a 65);
21 zonas externas (n^{os} 75 a 95);
- ii) 347 nós de simulação: 150 intersecções prioritárias;
119 intersecções com sinais luminosos;
41 nós fictícios;
35 nós de fronteira simulação/atribuição;
2 nós de fronteira simulação/externa;
- iii) 471 arcos de atribuição: 415 arcos de sentido único;
56 arcos de dois sentidos.

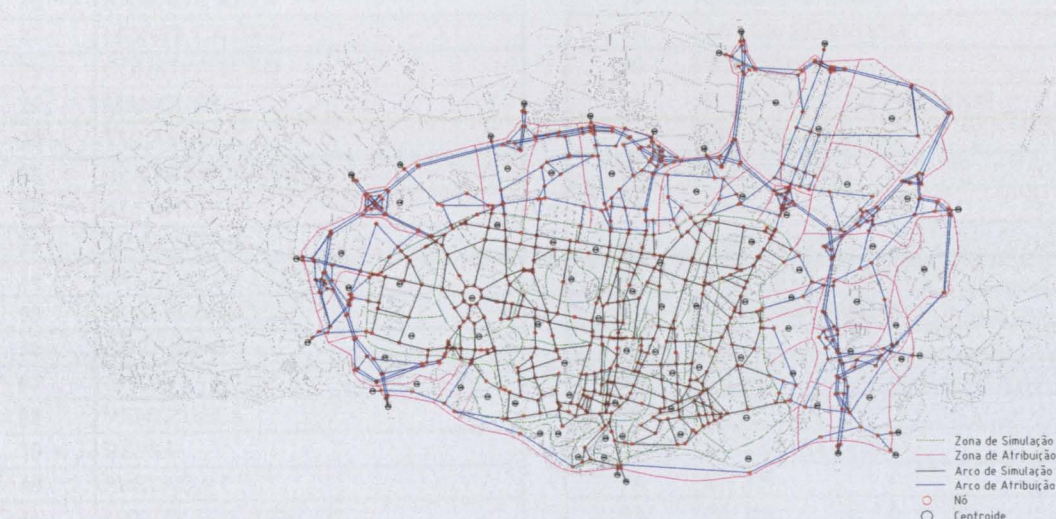


Figura V.3 - Rede rodoviária modelada (SATURN-Porto)

²¹ Será de notar que a rede final assim caracterizada foi obtida após o processo de verificação e de calibração do modelo visto que houve a necessidade de não só inserir como de remover nós e arcos.

Número	Identificação	Número	Identificação
1	RIBEIRA	44	COVÊLO
2	MOUZINHO DA SILVEIRA	45	COSTA CABRAL
3	CODEÇAIS	46	ANTAS
4	GUINDAIS	47	CONTUMIL
5	BATALHA	48	BELAVISTA
6	JÚLIO DINIS	49	MACEDA
7	CAMPO MÁRTIRES DA PÁTRIA	50	SÃO ROQUE
8	ALIADOS	51	GODIM
9	CEDOFEITA	52	CORUJEIRA
10	TRINDADE	53	CAMPANHÃ
11	BOLHÃO	54	BONJÓIA
12	D. JOÃO	55	MONTE DE CAMPANHÃ
13	24 DE AGOSTO	56	LAGARTEIRO
14	SOARES DOS REIS	57	NOEDA
15	GALIZA	58	FREIXO
16	CARVALHOSA	59	MONTE SEMINÁRIO
17	REPÚBLICA	60	FONTAINHAS
18	BONJARDIM	61	AREOSA
19	DOZE CASAS	62	FERNÃO MAGALHÃES
20	SANTOS POUSADA	63	CURRAIS
21	BONFIM	64	BAIRROS / SÃO ROQUE
22	CAMPO ALEGRE	65	CERCO DO PORTO
23	BOAVISTA ESTE	75	P. D. LUIS (INFERIOR)
24	ROTUNDA	76	P. DA ARRÁBIDA
25	QUINTA AMARELA	77	MARGINAL
26	RAMADA ALTA	78	CAMPO ALEGRE
27	MONTE CATIVO	79	AV. DA BOAVISTA
28	CONSTITUIÇÃO	80	VIA RÁPIDA
29	MARQUÊS	81	R. CENTRAL DE FRANCOS
30	VELASQUEZ	82	MONTES BURGOS
31	JOAQUIM URBANO	83	VIA NORTE
32	ALFÂNDEGA	84	AMEAL
33	MONCHIQUE	85	PARANHOS
34	PALÁCIO DE CRISTAL	86	MANUEL LARANJEIRO
35	DOM PEDRO V	87	CIRCUNVALAÇÃO
36	ARRÁBIDA	88	A3/A4
37	CDUP	89	EN 105
38	VENEZUELA	90	EN15
39	BESSA	91	RUA DE AZEVEDO
40	PRELADA	92	EN 209
41	MONTE DOS BURGOS	93	EN 108
42	CARVALHIDO	94	P. FREIXO
43	CAMPO LINDO	95	P. D. LUIS (SUPERIOR)

Quadro V.1 – Identificação das zonas utilizadas para o modelo SATURN-Porto

Para o levantamento da rede foi realizado um extenso trabalho de campo para a caracterização dos seus atributos físicos particularmente das suas intersecções, para o que se utilizou a folha de campo apresentada na Figura V.4, nomeadamente no que concerne a:

- tipo;
- nº de arcos;
- caracterização dos ramos de entrada:
 - nº de vias;
 - afectação de vias aos movimentos;
 - declives;
 - no caso de cruzamentos controlados por sinais luminosos houve a necessidade de se verificar a programação dos mesmos.

CONFIRMAÇÃO DA REDE DO PORTO - Março 1996

Zona de Simulação

Nº

Tipo de nó
(Assinalar com X, para os tipos)

Nº de arcos

Descrição dos Arcos

Arco / Cap. estacionamento (nº via), Nº de vias de entrada, Comprimento do arco (m), Tempo / Velocidade média (s ou km/h)	
Déb. Sat. do 1º mov. de virag. (verde) Déb. Sat. do 2º mov. de virag. (verde) Déb. Sat. do 3º mov. de virag. (verde) Déb. Sat. do 4º mov. de virag. (verde)	
(*) Tempo / Vel. Cond. Horar. Tempo / Vel. Saturação Capacidade (vech), Potência n. Índice de cap. (0-999)	

Arco / Cap. estacionamento (nº via), Nº de vias de entrada, Comprimento do arco (m), Tempo / Velocidade média (s ou km/h)	
Déb. Sat. do 1º mov. de virag. (verde) Déb. Sat. do 2º mov. de virag. (verde) Déb. Sat. do 3º mov. de virag. (verde) Déb. Sat. do 4º mov. de virag. (verde)	
(*) Tempo / Vel. Cond. Horar. Tempo / Vel. Saturação Capacidade (vech), Potência n. Índice de cap. (0-999)	

Arco / Cap. estacionamento (nº via), Nº de vias de entrada, Comprimento do arco (m), Tempo / Velocidade média (s ou km/h)	
Déb. Sat. do 1º mov. de virag. (verde) Déb. Sat. do 2º mov. de virag. (verde) Déb. Sat. do 3º mov. de virag. (verde) Déb. Sat. do 4º mov. de virag. (verde)	
(*) Tempo / Vel. Cond. Horar. Tempo / Vel. Saturação Capacidade (vech), Potência n. Índice de cap. (0-999)	

Arco / Cap. estacionamento (nº via), Nº de vias de entrada, Comprimento do arco (m), Tempo / Velocidade média (s ou km/h)	
Déb. Sat. do 1º mov. de virag. (verde) Déb. Sat. do 2º mov. de virag. (verde) Déb. Sat. do 3º mov. de virag. (verde) Déb. Sat. do 4º mov. de virag. (verde)	
(*) Tempo / Vel. Cond. Horar. Tempo / Vel. Saturação Capacidade (vech), Potência n. Índice de cap. (0-999)	

Arco / Cap. estacionamento (nº via), Nº de vias de entrada, Comprimento do arco (m), Tempo / Velocidade média (s ou km/h)	
Déb. Sat. do 1º mov. de virag. (verde) Déb. Sat. do 2º mov. de virag. (verde) Déb. Sat. do 3º mov. de virag. (verde) Déb. Sat. do 4º mov. de virag. (verde)	
(*) Tempo / Vel. Cond. Horar. Tempo / Vel. Saturação Capacidade (vech), Potência n. Índice de cap. (0-999)	

Programação Semafórica:

Ciclo Offset (s), Nº de fases

(tempo máximo)

1ª Fase: Tempo de verde (s), inter-verde (s) Mov. permitidos	
2ª Fase: Tempo de verde (s), inter-verde (s) Mov. permitidos	
3ª Fase: Tempo de verde (s), inter-verde (s) Mov. permitidos	
4ª Fase: Tempo de verde (s), inter-verde (s) Mov. permitidos	
5ª Fase: Tempo de verde (s), inter-verde (s) Mov. permitidos	

Retardos

Gap para perda de prioridade (s)

Tempo de circunvalação (s)

Máxima capacidade (vech)

Prioridades

Gap para perda de prioridade (s)

Gap para entrecruzamentos (s)

Figura V.4 – Ficha tipo para caracterização das intersecções

Paralelamente a este trabalho procedeu-se à digitalização da rede da cidade do Porto, de modo a ser possível obter alguma da informação necessária com um maior rigor e de um modo automático. Deste modo, foi necessário desenvolver-se alguns programas de cálculo automático que permitissem a extracção de certos atributos físicos, nomeadamente as coordenadas cartesianas dos nós e os comprimentos dos arcos.

Relativamente à capacidade de *stockagem* dos arcos, a mesma foi obtida considerando que o comprimento de cada veículo era de 5,00 m (parâmetro ALEX). No que concerne aos débitos de saturação recorreu-se à simplificação da fórmula resultante do método de Webster e Cobbe (ver Costa, 1987) e que se apresenta no Quadro V.2. Observe-se que o recurso a esta metodologia deveu-se, por lado, ao facto de a mesma já se encontrar devidamente testada e com inúmeras aplicações práticas e, por outro, à necessidade de sistematizar e simplificar o cálculo face à dimensão da tarefa.

Movimento	Valor Base	Correcções		
	w = 3,30 m	Largura (w)		Inclinação (i)
	i = 0%	w < 3,30 m	w > 3,30 m	
Em frente	1 900 u.v.l./h	$0,105w + 0,653$	$0,105w + 0,653$	$1 - \frac{2}{100}i$
À direita	1 500 u.v.l./h			
À esquerda	1 700 u.v.l./h			

Quadro V.2 – Expressões utilizadas para o cálculo dos débitos de saturação

A decisão seguinte foi a da fixação dos valores dos intervalos críticos (parâmetros GAP e GAPM para cruzamentos prioritários e movimentos de entrecruzamento, respectivamente). Face ao conhecimento disponível em aplicações de SATURN, embora noutros contextos, optou-se por fixar o valor desta variável em 3,5 segundos.

Após toda esta fase de levantamento de dados e posterior tratamento, a codificação da zona de simulação foi realizada com recurso a fichas elaboradas para o efeito (Figura V.5).

CODIFICAÇÃO DA REDE DO PORTO - Março 1996
Zona de Simulação

[illegible]

Figura V.5 – Ficha tipo para codificação das intersecções

Para a codificação dos arcos de atribuição procedeu-se ao preenchimento de fichas tipo, apresentadas na Figura V.6, tendo sido necessária a caracterização dos seguintes dados:

- nº de sentidos;
- comprimento;
- velocidade em condições livres;
- velocidade em capacidade;
- capacidade;
- potência.

Nesta fase de construção do modelo foram adoptados para as velocidades em regime livre os valores limite legais na zona de simulação, tendo-se corrigido estes valores na zona de atribuição em função do tipo de arco, do tipo de cruzamento e da prioridade a jusante. Em regime de capacidade adoptaram-se os valores de 15 km/h para as vias interiores à VCI e nesta adoptou-se o valor de 40 km/h (cf Capítulo III).

CODIFICAÇÃO DA REDE DO PORTO - Março de 1996

Zona de Atribuição

Arco ____/____, 1 / 2 sentidos de circulação, Comprimento do arco ____ (m),
Tempo / Vel. em cond. livres ____ (s ou Km/h) Tempo / Vel. em saturação ____ (s ou Km/h)
Capacidade por sentido ____ (uve/h) Potência n ____ Índice de capacidade ____ (0-999)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	
C	NO A				C	NO B				Tempo/Vel. cond. livres					Tempo/Vel. saturação					Capacidade por sentido					Potência n		Comprimento do arco					Potência n					Índice de capacidade								

Arce ____/____, 1 / 2 sentidos de circulação, Comprimento do arco ____ (m),
Tempo / Vel. em cond. livres ____ (s ou Km/h) Tempo / Vel. em saturação ____ (s ou Km/h)
Capacidade por sentido ____ (uve/h) Potência n ____ Índice de capacidade ____ (0-999)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	
C	NO A				C	NO B				Tempo/Vel. cond. livres					Tempo/Vel. saturação					Capacidade por sentido					Potência n		Comprimento do arco					Potência n					Índice de capacidade								

Figura V.6 – Ficha tipo para a caracterização e codificação dos arcos

No que concerne à capacidade fixou-se 1 400 e de 2000 veículos por hora e por via para as vias urbanas e vias rápidas, respectivamente, como valores de referência, sendo o primeiro valor corrigido em função não só do perfil transversal, designadamente no que se refere à largura e à existência de estacionamento à superfície, bem como do tipo de cruzamento e da prioridade a jusante.

Por último, no que concerne ao valor da potência, pelo facto de a informação disponível nesta fase ser escassa e de não existirem estudos neste âmbito para a cidade do Porto que permitissem a fixação destes valores, optou-se pela utilização do seu valor por defeito, ou seja, de 5,0.

2.3 Matriz Origem-Destino

A realização de inquéritos foi o método utilizado para a obtenção da matriz Origem-Destino na área em estudo. Adicionalmente e para se identificarem as viagens cuja Origem e Destino fossem exteriores à área de estudo foi utilizado o método do cruzamento das matrículas nas entradas da Via de Cintura Interna.

A matriz Origem-Destino resultou da adaptação do zonamento realizado previamente para a matriz Origem-Destino de 1989, que foi criada dentro da definição de uma política de transportes públicos e de um projecto de planeamento (STCP, 1991). A matriz adoptada é composta por 86 zonas (34 de simulação, 31 de atribuição e 21 externas) que foram definidas como resultado, por um lado, de pequenas adaptações do zonamento considerado na matriz inicial e, por outro, da definição da modelação de fronteiras descritas anteriormente (área de estudo e fronteiras das zonas de simulação e de atribuição).

Para a realização dos inquéritos foram definidos cordões com o objectivo de isolar zonas com características idênticas, acompanhando sempre que possível os limites das zonas, ao longo dos quais foram colocados os postos de observação de modo a possibilitar a detecção de todas as viagens de pares Origem-Destino entre cordões distintos.

Neste âmbito foram definidos um cordão exterior e três *screenlines*, ao longo dos quais foram fixados 53 postos de observação (Figura V.7), dividindo a cidade por sectores, nomeadamente Norte, Sul, Ocidental e Oriental da rede previamente definida. Observe-se que através da utilização destes postos o número total de inquéritos obtido foi de 9 360 de um total de 99 241 veículos.

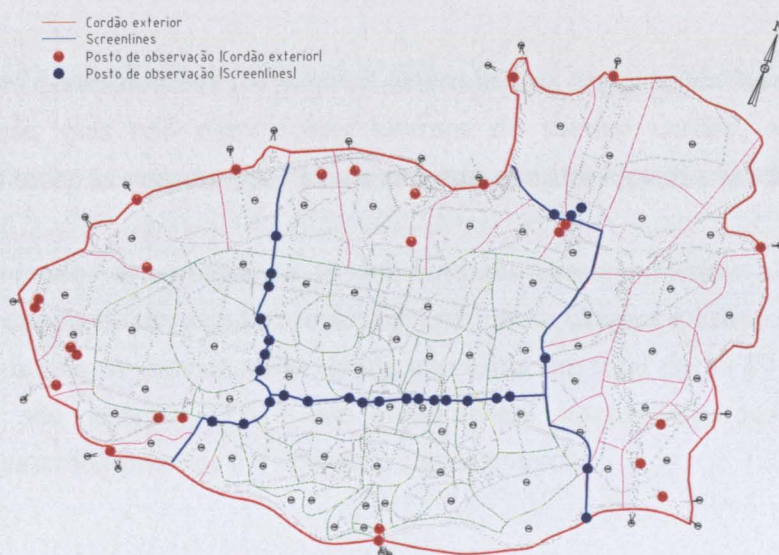


Figura V.7 - Identificação do cordão exterior, das *screenlines* e respectivos postos

Com base no zonamento, no cordão exterior e nas *screenlines* foram definidos 7 cordões fechados (Figura V.8) que possibilitaram a observação de todas as viagens entre pares Origem-Destino, pertencentes a diferentes cordões, com a preocupação de reduzir ao máximo as “fugas” e a duplicação de viagens. Os objectivos de cada um destes cordões foi:

- i) Cordão A: determinar todas as viagens com origem ou destino nas zonas 1 a 65 para as restantes (75 a 95 – zonas externas);
- ii) Cordão B: determinar todas as viagens com origem ou destino nas zonas 15, 22, 23, 24, 25, 36, 37, 38, 39, 40 e 41 para as restantes;
- iii) Cordão C: determinar todas as viagens com origem ou destino nas zonas 1 a 14, 21, 32, 33, 34, 35, 59 e 60 para as restantes;
- iv) Cordão D: determinar todas as viagens com origem ou destino nas zonas 15 a 20, 26 a 31 e 42 a 46 para as restantes;
- v) Cordão E: determinar todas as viagens com origem ou destino nas zonas 47 a 52, 54 a 58, 61 a 65 para as restantes;
- vi) Cordão F: determinar todas as células correspondentes a viagens com origem ou destino nas zonas 1 a 46, 53, 59 e 60 para as restantes zonas.
- vii) Cordão G: determinar todas as viagens com origem ou destino nas zonas 1 a 14, 16 a 21, 26 a 35 e 42 a 65 para as restantes.

Através destes cordões foi possível determinar as deslocações das zonas internas para as outras, mas não entre zonas internas do mesmo cordão, sendo também determinadas todas as viagens entre zonas externas que achessem a secção.

Deste modo, construíram-se as sub-matrizes correspondentes a cada um dos cordões que, depois de conjugadas, resultaram na matriz Origem-Destino global da hora de ponta da manhã. A matriz assim obtida apresenta um total de 39 194 viagens, das quais 7 312 são internas, 9 614 são movimentos internos-externos, 13 930 são movimentos externos-internos e 8 338 são viagens externas.

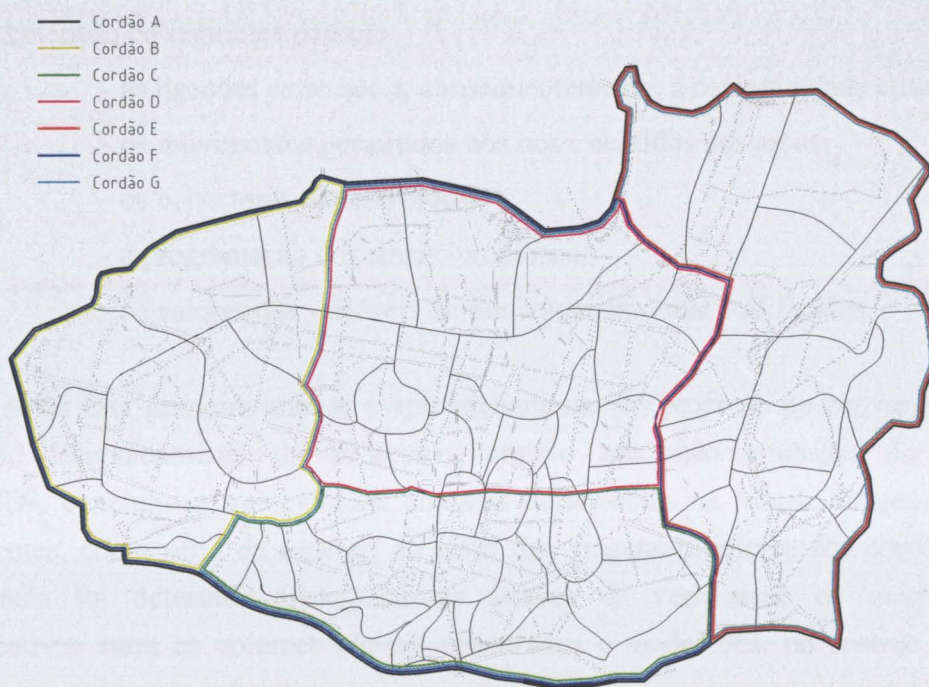


Figura V.8 – Identificação dos diferentes cordões adoptados

Por último, será de observar, como já referido, que face à metodologia utilizada não foi possível obter as viagens entre pares Origem-Destino no interior dos cordões fechados. Estas viagens foram posteriormente obtidas com a expansão da matriz através da utilização do método iterativo Afectação/Máxima Entropia, com recurso ao programa de cálculo automático ME2 associado ao modelo SATURN.

2.4 Verificação da rede

Após o processo inicial de codificação da rede, cada um dos elementos que a caracterizam foi cuidadosamente verificado. Todos os atributos físicos e variáveis de funcionamento dos nós e dos arcos, bem como a conectividade e integridade da rede foram verificados com recurso não só às “Mensagens de Aviso” (*Warning Messages*) do programa SATURN, como também à visualização gráfica da rede em “funcionamento”, designadamente as redes mínimas. Nesta fase as acções de correcção apenas consistiram na eliminação dos eventuais erros, quando tal se justificasse.

Deste modo, as acções de correcção foram efectuadas observando-se com especial atenção os seguintes pontos:

- as ligações entre nós e, consequentemente, a conectividade entre arcos;
- os movimentos permitidos nos nós e sentidos dos arcos;
- os conectores de centróides;
- a programação dos sinais luminosos;
- os valores das variáveis de funcionamento mal codificados.

Após esta primeira análise e aperfeiçoamento do processo de convergência do modelo, designadamente do processo iterativo afectação/simulação do modelo SATURN, concluiu-se que existiam algumas deficiências na Matriz Origem-Destino decorrentes, como seria de esperar, do nível das viagens interiores aos cordões. Esta deficiência foi detectada principalmente através da verificação de discrepâncias significativas entre os volumes globais observados e modelados, no sentido de estes últimos serem sempre inferiores.

Assim, foi necessário proceder-se à correcção/expansão da matriz de modo a serem ultrapassados os problemas ligados às limitações do método de inquéritos realizado. A matriz “actualizada” foi obtida utilizando-se o processo iterativo Afectação/Máxima Entropia, utilizando-se para o efeito não só todas as contagens de tráfego realizadas para os inquéritos como também 14 contagens adicionais realizadas na fronteira exterior do modelo (VCI e na Estrada Exterior da Circunvalação). Será de observar que o número total de viagens com origens e destinos entre cordões distintos foi fixado no valor observado.

Com este processo a matriz Origem-Destino foi expandida para um total de 64 845 viagens, correspondente a um aumento total de 65% relativamente à matriz inicial em que nem estavam contabilizadas as viagens internas aos cordões nem tido sido realizada a expansão da matriz com base nos volumes totais observados nos cordões. Do total de viagens, 15 237 (+108%) são internas, 12 821 (+33%) são movimentos internos-externos, 19 757 (+42%) são movimentos externos-internos e 17 030 (+104%) são viagens externas.

2.5 Calibração

A calibração do modelo SATURN do Porto foi realizada com recurso a metodologias tanto qualitativas como quantitativas. A primeira consistiu na avaliação lógica dos diferentes caminhos seleccionados pelo modelo entre os diversos pares Origem-Destino enquanto que a segunda foi realizada comparando-se os valores das variáveis modeladas com os valores reais observados, adoptando-se para o efeito os parâmetros e critérios recomendados no Reino Unido (Quadro V.3). Neste processo foram utilizados os volumes obtidos para 144 secções de contagem com uma distribuição geográfica homogénea.

Parâmetros	Critérios
$P85 = \%Arcos \text{ com } \begin{cases} V_m - V_o \leq 100 & \text{se } V_o \leq 700 \\ \frac{ V_m - V_o }{V_o} \leq 15\% & \text{se } 700 < V_o \leq 2\,700 \\ V_m - V_o \leq 400 & \text{se } V_o > 2\,700 \end{cases}$	$\geq 85\%$
$GEHM = \overline{GEH}^*$	≤ 2
$GEH5 = \%Arcos \text{ com } GEH \leq 5$	$\geq 85\%$
$TP = \%Percursos \frac{ tp^o - tp^m }{tp^o} \times 100 < 15\% \text{ ou } 1 \text{ minuto}$	$\geq 85\%$

* - Em 85% dos arcos: British Guidelines - Department of Transport (Van Vuren, 1996)

Quadro V.3 - Parâmetros e critérios adoptados para o modelo SATURN-Porto

Para a detecção de problemas recorreu-se aos programas associados ao modelo SATURN, nomeadamente ao programa SATLOOK, para o cálculo dos parâmetros de calibração fixados, e ao programa PIX que permite a visualização da rede em “funcionamento”. Tendo por base o conhecimento da rede e as secções de contagens, centrou-se a atenção nos seguintes aspectos:

- percursos utilizados entre pares Origem-Destino;
- nós/arcs saturados ou fluidos;

- velocidades anormalmente baixas ou elevadas;
- erros sistemáticos nos volumes.

O processo de calibração iniciou-se com a fixação dos coeficientes associados ao valor do tempo e da distância. Em virtude da não existência de estudos neste âmbito realizou-se uma análise comparativa, do tipo qualitativo, dos resultados associados a diferentes combinações destes coeficientes, tendo-se decidido, em função dos resultados obtidos, atribuir igual peso aos mesmos. Assim, os coeficientes para o cálculo do custo generalizado foram os seguintes:

- “Custo” por minuto: $PPM = 2.0$
- “Custo” por quilómetro: $PPK = 2.0$;

O passo seguinte consistiu numa análise mais pormenorizada dos valores da potência da curva volume-velocidade apenas na zona de atribuição uma vez que na zona de simulação, face à extensão dos arcos ser reduzida e à existência de um grau de saturação razoável, se poder afirmar que os atrasos são principalmente devidos aos nós e, consequentemente, esta variável poder ser omitida.

Após várias corridas em que foram testados vários valores da potência da curva para diferentes tipos de vias, os valores para esta variável, em função do conhecimento do funcionamento local da rede, foram fixados em:

- auto-estrada urbana: 5,5;
 - rampas de entrada: 2,0;
 - rampas de saída: 2,2;
- outras: 1,8.

Finalmente o trabalho de calibração concentrou-se no aspecto mais fino da modelação, ou seja, ao nível individual dos nós e dos arcos. Neste ponto, as variáveis de funcionamento que as caracterizam foram aferidas de modo a que, sem “forçar” o funcionamento do modelo, as condições operacionais modeladas reproduzissem o mais possível a “realidade”.

Terminada esta fase de aperfeiçoamento do modelo foi realizado o processo iterativo de afectação/Máxima Entropia de modo a se obter a matriz final e, finalmente, considerar-se o modelo calibrado, ou seja, cumprindo todos os critérios associados aos

parâmetros de calibração fixados inicialmente. Será de observar que caso o modelo não pudesse ser considerado calibrado, este processo retrocedia às fases anteriores (verificação e calibração) com a Matriz original.

Finalmente o modelo foi considerado calibrado sendo a nova matriz Origem-Destino composta por um total de 68 463 viagens, correspondendo a um aumento global de cerca de 6%, das quais 15 726 (+3%) são internas, 13 223 (+3%) são movimentos internos-externos, 21 516 (+9%) são movimentos externos-internos e 17 998 (+6%) são viagens externas. Os resultados finais da calibração no que concerne aos valores obtidos para os critérios dos parâmetros de aferição utilizados encontram-se apresentados no quadro seguinte.

Parâmetro	Objectivo	Atingido
P85	$\geq 85\%$	87%
GEHM	≤ 2	1,1
GEH5	$\geq 85\%$	85%
TP	$\geq 85\%$	não utilizado

Quadro V.4 – Resultados da calibração para o modelo SATURN-Porto

Por último, será de observar que para a análise da convergência foram utilizados os parâmetros de estabilidade e de proximidade enunciados no capítulo anterior, tendo sido fixado os seguintes limites para o número de iterações:

- afectação/simulação: MASL = 15;
- iteração na qual se vai utilizar os resultados anteriores: KOMBI = 3
- afectação: NITA = 70;
- simulação: NITS = 50.

Estes valores foram fixados uma vez que os resultados obtidos foram considerados válidos, como se pode constatar no Quadro V.5, sem ser necessário um esforço computacional muito significativo, o que seria indesejável durante o processo de calibração do modelo.

Como comentário final será de referir o esforço despendido para o desenvolvimento de todo este trabalho de modelação, apenas no que concerne aos recursos humanos, sem contabilizar os trabalhos de campo referentes à realização do inquérito Origem-Destino e das contagens, foi cerca de 12 “homens x mês”.

Parâmetro	Recomendado	Obtido
$\overline{DA}$ —ou—	< 1 veíc/h	2.89 veíc/h
$\overline{DR}$ —ou—	< 1%	7.89%
%V	> 95%	95.9%*
δ - afectação	< 1%	0.966%
δ - afectação/simulação	< 1%	0.103%

* Atingido para MASL = 11

Quadro V.5 – Resultados da avaliação da convergência para o modelo SATURN-Porto

2.6 Validação

A validação foi realizada pela comparação das diferenças entre as variáveis modeladas e observadas utilizando os mesmos parâmetros da calibração mas com recurso a 81 secções de contagem distintas das que serviram de base ao processo de calibração e de 15 tempos de percurso (8 na zona de simulação, 4 na de atribuição e 3 cruzando as duas áreas). Os resultados da validação assim realizada apresentam-se no quadro seguinte.

Parâmetro	Objectivo	Atingido
P85	$\geq 85\%$	78%
GEHM	≤ 2	2,67
GEH5	$\geq 85\%$	68%
TP	$\geq 85\%$	73%

Quadro V.6 – Resultados da calibração para o modelo SATURN-Porto

Como se pode constatar pela análise do Quadro V.6 verifica-se que os critérios apontados não foram plenamente atingidos. No entanto, no âmbito da aplicação do Projecto MUSIC (MUSIC, 1998) o modelo foi considerado validado uma vez que, no que se refere aos parâmetros relacionados com os volumes (P85, GEHM e GEH5), verificou-se que os arcos com maiores discrepâncias entre volumes observados e modelados encontravam-se maioritariamente localizados na zona de atribuição, ou seja, na zona mais externa e com menor influência no referido estudo. Por outro lado, verificou-se que os tempos de percurso modelados encontravam-se sempre dentro da amplitude de variação dos tempos observados.

No que concerne à aplicabilidade do modelo no presente trabalho de investigação considerou-se que o mesmo reunia as condições necessárias para a realização de uma grande variedade de análises. Note-se que, de facto, que o que se pretendia com esta fase de modelação era obter um modelo que, sem erros de quantificação, representasse uma “realidade” possível e que tal acontece com o presente modelo a representar uma rede semelhante à da cidade do Porto.

Será ainda de salientar que o modelo SATURN da cidade do Porto representa uma rede rodoviária não só bastante diversificada quer no que concerne à tipologia dos nós e arcos quer no que diz respeito aos graus de congestionamento presentes e geograficamente distribuídos, como também apresenta uma dimensão significativa. Pode-se ainda acrescentar que o presente modelo apresenta dois tipos de modelações distintas e das mais comuns, nomeadamente uma modelação micro e macro, associadas às zonas de simulação e atribuição, respectivamente.

3. Calibração Base da Metodologia de Análise

3.1 Selecção dos parâmetros de aferição

O primeiro passo para se proceder a uma análise dos impactos de erros no desempenho de um modelo consiste na selecção dos parâmetros de aferição. Neste âmbito apenas se procedeu ao estudo dos parâmetros que têm por base os “volumes de

tráfego”, observados e modelados. Saliente-se que esta variável de tráfego não só é a de mais simples observação como pode ser considerada a mais representativa, embora não única, do desempenho de um modelo, sendo ainda a variável mais recomendada na bibliografia consultada (Barton-Aschman Associates Inc. & Cambridge Systematics Inc. ,1997; HMSO, 1996; El-Mously, 1994; Taylor, 1979) no que respeita à aplicação de modelos de afectação em redes urbanas. Note-se ainda que quando, por exemplo, se escolhe a variável “tempos de percurso” haverá sempre que se proceder à selecção de percursos pelo que esta tarefa dependerá sempre do conhecimento do funcionamento da rede por parte do modelador.

Recorde-se que face ao volume de informação necessário, tanto no que concerne à caracterização dos volumes de tráfego como da procura, as campanhas de recolha de dados são normalmente realizadas em diferentes períodos pelo que quando se está a avaliar o desempenho do modelo este facto deve estar sempre presente. Deste modo, deve-se analisar qual o impacto nos valores dos parâmetros de aferição face à variação normal dos valores das variáveis, nomeadamente dos volumes de tráfego, que interferem no respectivo cálculo.

Relativamente aos parâmetros de aferição do desempenho de modelos, seleccionaram-se para esta análise todos os parâmetros referidos no Capítulo III e cujo cálculo tem por base apenas os volumes de tráfego. Estes parâmetros foram agrupados em quatro classes:

- i) Parâmetros “estatísticos” baseados em medidas estatísticas calculadas de forma a inferir o grau com que os volumes reais e modelados se encontram relacionadas:
 - teste t de Student;
 - Teste F - análise da variância;
 - r - coeficiente de correlação amostral;
 - r^2 - coeficiente de determinação;
 - s_{yr}^2 - variância residual;
 - a e b ($y = a + b \cdot x$) – parâmetros da regressão linear;
 - E – coeficiente de equivalência;
 - RMSE - *Root mean square error*;
 - AE - *Average Error*;

- DSD - *Difference Standard Deviation*;
 - CV - Covariation;
 - LR - Likelihood Ratio;
- ii) Parâmetros “absolutos” cuja base de cálculo assenta na diferença absoluta entre volumes reais e modelados:
- DA - diferença absoluta;
 - |DA| - valor absoluto da diferença;
- iii) Parâmetros “relativos” em que as diferenças entre volumes reais e observados são normalizadas por forma a remover os efeitos de escala:
- DR - diferença relativa;
 - |DR| - diferença relativa absoluta;
 - %RMSE - desvio do erro médio quadrático relativo;
 - PRMSE - *Percent Root Mean Square of the Error*;
- iv) Parâmetros “combinados” que incorporam tanto os erros absolutos como relativos:
- GEHM – valor médio da “estatística” GEH;
 - P85 - percentagem de arcos em que a diferença de volumes observados e modelados cumprem certos critérios;
 - GEH5 - percentagem de arcos em que a “estatística” GEH menor que 5.

Adicionalmente foram introduzidos dois novos parâmetros que pretendem ir de encontro às falhas apontadas para todos os parâmetros enunciados (cf Capítulo III, ponto 5.2), nomeadamente ao facto inerente à sobre ou subestimação de volumes que não é considerado no cálculo de qualquer um dos parâmetros referidos. Esta análise pode então ser realizada através da introdução de dois novos parâmetros a analisar conjuntamente, que resultam simplesmente na constituição de parâmetros que tenham em conta isoladamente as diferenças relativas positivas e negativas de forma a não se anularem, caso que nunca foi testado ou analisado na pesquisa efectuada. Estes dois novos parâmetros, apelidados por Erro Médio Relativo Positivo (EMRP) e Erro Médio Relativo Negativo (EMRN), são definidos por:

$$EMRP = \frac{\sum_k \Delta q}{\sum_k q_{o_k}} \text{ com } \begin{cases} \Delta q = q_{m_k} - q_{o_k} & \text{se } q_{m_k} - q_{o_k} \geq 0 \\ \Delta q = 0 & \text{se } q_{m_k} - q_{o_k} < 0 \end{cases} \dots\dots (V.1)$$

e

$$EMRN = \frac{\sum_k \Delta q}{\sum_k q_{o_k}} \text{ com } \begin{cases} \Delta q = q_{m_k} - q_{o_k} & \text{se } q_{m_k} - q_{o_k} < 0 \\ \Delta q = 0 & \text{se } q_{m_k} - q_{o_k} \geq 0 \end{cases} \dots\dots (V.2)$$

com

 q_{o_k} – volume observado no arco $\underline{k}$; q_{m_k} – volume modelado no arco $\underline{k}$.

3.2 Avaliação dos impactos das flutuações temporais do tráfego nos parâmetros

De modo a se simular o efeito das flutuações temporais do tráfego e testar todos os parâmetros referidos anteriormente, considerou-se os volumes horários modelados nos arcos da rede do Porto e admitiu-se que os volumes observados seguem uma lei Normal com média para cada arco igual ao volume modelado e com um coeficiente de variação igual a 10% (cf Capítulo IV).

O valor de 10% resulta de se ter considerado como válido um estudo realizado nos Estados Unidos (FHWA, 1980) em que se conclui que os volumes horários apresentam uma variação, de dia para dia, de cerca de $\pm 10\%$. Refira-se ainda a recomendação do TAM (HMSO, 1991), que apontam a variação de $\pm 15\%$ como limites do intervalo de confiança a 95% para os volumes horários das secções de contagem a serem incluídas na avaliação do desempenho de modelos.

A amostra considerada para estes testes foi fixada em 1 245 volumes nos arcos, de um total possível de 1 325 volumes uma vez que se excluíram todos os arcos em que o volume fosse menor que 10 veículos por hora.

Por forma a testar vários valores para os volumes horários com uma distribuição Normal, tendo presente o método baseado no Teorema do Limite Central (cf Capítulo

IV), foi criado um programa de cálculo automático para gerar n ($n=30$) valores u_i que seguem uma lei Uniforme $[0,1]$ e para o cálculo da variável normal reduzida dada por:

$$z = \frac{\sum_j u_j - \frac{n}{2}}{\sqrt{\frac{n}{12}}} \dots\dots\dots (V.3)$$

Obtendo-se assim o valor a considerar para o volume horário observado em cada arco:

$$Q_{o_i} = Q_{m_i} + z \cdot \sigma_Q \dots\dots\dots (V.4)$$

com

Q_{m_i} – volume horário modelado no arco i ;
 σ_Q – desvio padrão.

Para além deste método também foi criado um segundo programa para a geração de amostras aleatórias pelo Método de Box-Muller (cf Capítulo IV), para o qual ao se pretender que as observações sigam uma distribuição Normal $N(Q_m, \sigma^2_Q)$ apenas haverá que calcular a expressão:

$$Q_{o_i} = Q_{m_i} + \sigma_Q \cdot \sqrt{-2 \cdot \ln u_1} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot u_2) \dots\dots\dots (V.5)$$

com

u_1 e u_2 - variáveis aleatórias uniformemente distribuídas em $[0,1]$.

Com base nestes dois métodos foi possível gerar 30 amostras, para cada um dos métodos, consistindo cada uma em 1 325 volumes nos arcos da rede considerados. Saliente-se que a variação introduzida nos volumes em cada arco apenas seria inteiramente correcta ao se garantir a independência dos volumes. Obviamente, este pressuposto não é perfeitamente válido no caso de uma rede urbana em que existem fluxos de tráfego dependentes, pelo que as conclusões retiradas da presente análise deverão ser devidamente ponderadas.

Por outro lado, será ainda de observar que ao fixar o desvio padrão igual ao produto do coeficiente de variação pelo valor do volume ou em metade deste valor está-

se a admitir que em 32% ou em apenas 5% dos valores gerados, respectivamente, se pode esperar uma variação superior à percentagem fixada para o coeficiente de variação. Refira-se que a relevância deste facto está ligada ao tipo de rede em análise, nomeadamente no que concerne ao grau de congestionamento uma vez que quanto maior for o congestionamento da rede menor são as flutuações do tráfego de dia para dia.

Com base nas amostras geradas foi então possível calcular os vários valores para o conjunto de todos os parâmetros de aferição referidos e que se apresentam resumidamente nos dois quadros seguintes (Quadros V.7 e V.8), onde se pode visualizar para cada parâmetro não só o seu valor médio e respectivo intervalo de confiança a 95% como também os respectivos valores mínimo e máximo obtidos para cada conjunto de 30 amostras.

3.3 Análise dos resultados obtidos

Analisando os valores obtidos verifica-se que os testes estatísticos, designadamente o Teste t e o Teste F (teste da média e da variância, respectivamente), são algo inconclusivos face à elevada amplitude de variação que os valores para estes parâmetros apresentam. De facto, para todos os conjuntos de amostras geradas as conclusões que se poderiam retirar tanto podiam apontar no sentido da probabilidade dos volumes “modelados” e “observados” terem a mesma média ou de a variância não ser significativamente diferente, como também poderiam indicar que esta probabilidade era muito baixa ou mesmo nula.

Analisando os coeficientes de correlação (r) e de determinação (r^2) poder-se-ia dizer que os mesmos constituem bons indicadores uma vez que apresentam sempre valores superiores a 0,95 e 0,88, respectivamente, tal como preconizado nas metodologias consultadas. Observe-se que para o caso em que o desvio padrão é igual a metade do produto do coeficiente de variação pelo volume, estes coeficientes apresentam o valor unitário.

Parâmetro		$\sigma_Q = 0,10Q_{ml}$					$\sigma_Q = 0,05Q_{ml}$				
		Média	Intervalo Confiança (95%)		Mínimo	Máximo	Média	Intervalo Confiança (95%)		Mínimo	Máximo
			Limite Inferior	Limite Superior				Limite Inferior	Limite Superior		
"Estatísticos"	Teste t	0,39	0,29	0,50	0,00	0,91	0,56	0,47	0,65	0,17	0,96
	Teste F	0,17	0,10	0,24	0,00	0,70	0,39	0,28	0,50	0,02	0,91
	r	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	r ²	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	s ² _{yr}	2773	1165	4381	0	19167	4	0	9	0	57
	a	0,40	-4,84	5,65	-45,07	48,88	-0,02	-0,15	0,11	-1,43	1,10
	b	0,99	0,97	1,02	0,74	1,15	1,00	0,98	1,01	0,94	1,06
	E	0,99	0,99	1,00	0,93	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	RMSE	107,93	83,16	132,69	23,74	376,65	43,31	33,45	53,18	4,75	91,09
	AE	4,78	-21,92	31,48	-138,11	244,53	4,40	-7,55	16,35	-56,30	59,14
	DSD	4,80	-27,83	37,43	-161,75	286,39	5,13	-8,88	19,14	-65,96	69,25
	CV	2807,25	1184,09	4430,41	0,08	19030,70	4,28	-0,09	8,65	0,08	57,29
	LR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
"Absolutos"	DA	5951	-27293	39196	-171953	304436	5481	-9397	20360	-70099	73633
	DA	67,60	51,58	83,62	15,41	244,53	28,10	21,69	34,51	3,08	59,14
"Relativos"	DR	1%	-2%	4%	-13%	35%	1%	-1%	2%	-6%	7%
	DR	8%	5%	10%	2%	35%	3%	2%	4%	0%	7%
	%RMSE	12%	9%	15%	2%	54%	5%	4%	6%	1%	10%
	PRMSE	8%	6%	10%	2%	35%	3%	2%	4%	0%	7%
	EMRP	4%	2%	7%	0%	35%	2%	1%	3%	0%	7%
	EMRN	-3%	-4%	-2%	-13%	0%	-1%	-2%	-1%	-6%	0%
"Combinados"	GEHM	1,99	1,51	2,47	0,44	7,55	0,81	0,63	1,00	0,09	1,73
	P85	95%	91%	99%	31%	100%	100%	100%	100%	99%	100%
	GEH5	93%	88%	98%	27%	100%	100%	100%	100%	99%	100%

Quadro V.7 – Resultados obtidos para os parâmetros calculados com amostras geradas tendo por base o Teorema do Limite Central

Parâmetro		$\sigma_Q = 0,10Q_{mi}$					$\sigma_Q = 0,05Q_{mi}$				
		Média	Intervalo Confiança (95%)		Mínimo	Máximo	Média	Intervalo Confiança (95%)		Mínimo	Máximo
			Limite Inferior	Limite Superior				Limite Inferior	Limite Superior		
"Estatísticos"	Teste t	0,31	0,19	0,42	0,00	0,94	0,51	0,39	0,63	0,01	1,00
	Teste F	0,17	0,08	0,26	0,00	0,87	0,38	0,26	0,50	0,00	1,00
	r	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	r ²	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	s ² _{yr}	2645	775	4516	0	20972	0	0	0	0	0
	a	-3,94	-10,97	3,10	-75,46	48,63	0,00	-0,01	0,00	-0,05	0,03
	b	1,01	0,98	1,05	0,80	1,19	1,00	0,98	1,02	0,88	1,10
	E	0,99	0,99	0,99	0,96	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00
	RMSE	124,08	98,64	149,53	29,49	289,06	58,42	39,87	76,98	0,13	179,78
	AE	-6,85	-36,87	23,17	-142,27	187,66	3,85	-14,42	22,11	-98,25	116,71
	DSD	-13,83	-51,30	23,65	-221,07	219,80	4,50	-16,89	25,90	-115,08	136,71
	CV	2636,94	777,98	4495,90	0,07	20670,74	0,08	0,08	0,09	0,01	0,10
	LR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
"Absolutos"	DA	-8526	-45900	28847	-177120	233637	4790	-17951	27532	-122316	145302
	DA	77,80	62,06	93,54	19,14	187,66	37,92	25,88	49,97	0,02	116,71
"Relativos"	DR	0%	-3%	3%	-13%	25%	1%	-1%	3%	-9%	14%
	DR	8%	7%	10%	2%	25%	4%	3%	5%	0%	14%
	%RMSE	13%	10%	16%	3%	38%	6%	4%	8%	0%	22%
	PRMSE	9%	7%	11%	2%	25%	4%	3%	5%	0%	14%
	EMRP	4%	2%	6%	0%	25%	2%	1%	4%	0%	14%
	EMRN	-4%	-6%	-3%	-13%	0%	-2%	-3%	-1%	-9%	0%
"Combinados"	GEHM	2,26	1,82	2,71	0,55	5,70	1,10	0,75	1,45	0,00	3,47
	P85	93%	88%	98%	41%	100%	99%	99%	100%	95%	100%
	GEH5	91%	87%	95%	45%	100%	98%	97%	100%	86%	100%

Quadro V.8 - Resultados obtidos para os parâmetros calculados com amostras geradas através do Método de Box-Muller

No entanto, analisando o valor da variância residual (s_{yr}^2), ou seja a medida de variação da variável em torno da recta ajustada, verifica-se que, com excepção do último conjunto de amostras geradas (Método de Box-Muller e $\sigma_Q = 0,05 \cdot Q_{mi}$), este parâmetro apresenta uma grande variação o que indica a existência de desvios entre fluxos modelados e “observados” por defeito e excesso. Deste modo, pode-se concluir que os coeficientes de determinação ou de correlação, isoladamente, nunca podem ser a justificação para se considerar que o modelo está a representar adequadamente a realidade, uma vez que podem conduzir a conclusões erradas.

Quanto aos parâmetros estatísticos que têm em atenção a recta de regressão (parâmetros a e b), estes parecem ser, quando $\sigma_Q = 0,05 \cdot Q_{mi}$, os que isoladamente mais reflectem o observado, com especial enfoque para o parâmetro b. Observe-se que para o caso em que $\sigma_Q = 0,10 \cdot Q_{mi}$ o parâmetro a apresenta uma grande amplitude de variação o que pode originar conclusões erradas. Tendo em atenção o intervalo de confiança bilateral da regressão ([b] a 95%), verifica-se uma pequena amplitude, que pode dever-se não só ao tamanho da amostra como também à elevada gama de valores para os volumes.

Ainda dentro dos parâmetros “estatísticos” considerados, convém referir o parâmetro de eficiência (E) que, neste ponto de análise, tal como justificado pelo autor, reflecte o que lhe foi imputado, ou seja, quando o modelo está isento de erros sistemáticos, como é o caso da presente análise, a diferença para o coeficiente de correlação é mínima.

Deste modo, face à análise efectuada e também ao referido na bibliografia, poder-se-á dizer que estes parâmetros estatísticos puros isoladamente não permitem que se retirem grandes conclusões sobre o desempenho dos modelos, quando se analisam os volumes modelados *versus* observados. Este facto pode ser facilmente explicável pela grande gama de variabilidade natural dos valores dos volumes nos arcos, uma vez que numa rede urbana existem arcos de pequena, média e alta capacidade, sendo os volumes geralmente correspondentes a estas capacidades (no exemplo testado a gama de volumes varia entre um mínimo de 10 e um máximo de 7 749 veículos/hora).

Relativamente aos restantes parâmetros “estatísticos” analisados verifica-se que, de acordo com os cálculos efectuados e respectivos resultados, nomeadamente na amplitude de valores que estes parâmetros apresentam, alguns não parecem ter qualquer significado, nomeadamente;

- por um lado, o parâmetro RMSE apresenta uma grande variabilidade e, por outro, a decomposição do parâmetro RMSE, ($AE^2 + DSD^2 + CV^2$), sugerida na bibliografia, no seu conjunto ou pela análise individual de cada uma das componentes, não parece conduzir a nenhuma conclusão sobre a aproximação do modelo à realidade;
- o parâmetro LR (rácio da máxima verosimilhança), tal como definido, conduz sempre a valores muito próximos de zero o que pode ser explicado pelo facto de a amostra ter um tamanho significativo e o denominador neste indicador faz com que o mesmo tenda para zero.

Analisando os parâmetros que têm em conta apenas os valores absolutos das diferenças (DA e |DA|), verifica-se que os mesmos apresentam uma grande variabilidade, uma vez que também dependem da dimensão da rede, pelo que dificilmente será de fixar um valor mínimo universal que garanta a representatividade do modelo;

Tendo em atenção os valores para os parâmetros “relativos” pode-se concluir o seguinte:

- o parâmetro relativo “puro” (DR) tem tendência a anular os erros quando simultaneamente se está na presença de diferenças negativas e positivas, entre as variáveis modeladas e observadas;
- os parâmetros relativos |DR|, %RMSE e PRMSE têm a vantagem de ultrapassar o problema anterior mas os seus valores não fornecem qualquer indicação sobre se as “diferenças” encontradas entre a realidade e o modelo resultam da existência de erros por defeito ou por excesso na rede modelada;
- a introdução da análise conjunta dos dois parâmetros propostos, EMRP e EMRN, permite resolver os dois tipos de problemas atrás citados, identificando a direcção do erro no sentido de estes serem sistematicamente por excesso e/ou defeito;

- será ainda de referir que o critério proposto pelo FHWA para o parâmetro %RMSE ($\leq 3\%$) parece muito limitativo face aos valores médios obtidos para este parâmetro uma vez que o mínimo valor médio encontrado nas análises encontradas foi de 4,6%.

Por último, no que concerne aos parâmetros “combinados” (GEHM, P85 e GEH5) convém realçar que apenas estes têm em conta tanto as diferenças relativas como absolutas. No entanto, face aos valores obtidos nesta análise para estes parâmetros, é de parecer que os critérios estabelecidos ($P85 \geq 85\%$, $GEHM \leq 2$ e $GEH5 \geq 85\%$) são um pouco “exigentes” face aos valores médios e respectivos intervalos de confiança obtidos para os mesmos.

De facto, os valores obtidos para estes parâmetros, quando se considera uma variação dos valores médios igual a 10% do seu valor médio ($\sigma_Q = CV \cdot Q_m$) em termos médios os valores para estes parâmetros aproximam-se dos valores limites fixados. Esta constatação poderá indicar que apenas as normais flutuações temporais do tráfego podem ser responsáveis pela não validação de um modelo uma vez que nesta análise não se pretende simular outros tipos de erros inerentes ao desenvolvimento dos modelos.

Deste modo, e tendo por base as diferenças “simuladas” as principais conclusões retiradas quanto aos parâmetros analisados, são:

- A. A análise do desempenho do modelo com recurso a indicadores estatísticos deverá ser feita com algum cuidado, designadamente nunca utilizando apenas um indicador isolado, recomendando-se a utilização do coeficiente de correlação (r^2) conjuntamente com o coeficiente de eficiência (E) e do parâmetro da recta de regressão (b) associado ao respectivo intervalo de confiança.
- B. A análise com recurso aos parâmetros relativos deve ser realizada através da separação das diferenças positivas e negativas, aconselhando-se assim a utilização dos parâmetros propostos (EMRP e EMRN);
- C. Os parâmetros “combinados” (*Traffic Appraisal in Urban Areas* - HMSO, 1996), parecem ser dos propostos na bibliografia consultada os

que isoladamente melhor avaliam a qualidade do desempenho dos modelos;

- D.** Os critérios de cada parâmetro deverão ser fixados em função da rede modelada utilizando para tal a análise preconizada e verificando-se qual a amplitude de variação dos valores de cada um;

Por último, será de referir que a presente análise para os parâmetros e respectivos critérios a utilizar na calibração e validação de um modelo deveria ser realizada preferencialmente com base em valores reais dos volumes de tráfego. No entanto, face ao número de observações necessárias tal obrigaria a uma grande campanha de recolha de dados o que apenas se justifica quando em presença de um sistema de contagens automático presente nos Sistemas Centralizados de Gestão/Controlo de Tráfego.

4. Avaliação dos impactos de erros de quantificação

4.1. Introdução

As análises efectuadas incidiram tanto na análise da procura, com a realização de alterações sistemáticas e aleatórias à Matriz Origem-Destino, como na análise da oferta, através da introdução sistemática de diferentes erros nas variáveis de funcionamento responsáveis pelas condições operacionais.

O primeiro tipo de análise de sensibilidade realizada foi a denominada por tradicional, avaliando-se o impacto no desempenho do modelo em função da alteração controlada de apenas uma “variável”, permitindo deste modo determinar a relação entre cada tipo de erro e o respectivo efeito. Esta análise foi realizada não só com o modelo original da cidade do Porto como também para dois cenários adicionais desenvolvidos na tentativa de simular diferentes níveis de procura da rede e, consequentemente, diferentes graus de congestionamento.

O segundo tipo de análise de sensibilidade testada consistiu na introdução simultânea de erros em duas “variáveis” de modo a analisar qual a interacção entre as diversas fontes de erro.

O impacto dos erros introduzidos no desempenho global do modelo foi avaliado tendo por base os volumes de tráfego em todos os arcos que constituem a rede e com recurso ao cálculo não só dos parâmetros de calibração utilizados para o modelo da cidade do Porto como também do proposto no ponto anterior do presente capítulo, nomeadamente:

- i) GEHM: valor médio da estatística GEH;
- ii) P85: percentagem de arcos em que a diferença de volumes observados e modelados cumprem certos critérios;
- iii) GEH5: percentagem de arcos em que a estatística GEH é menor que 5;
- iv) EMRP e EMRN: erro médio relativo positivo e negativo, respectivamente.

Além da análise destes parâmetros também se recorreu à comparação de tempos de percurso. Para a aplicação deste parâmetro foi necessário definir *a priori* os percursos procurando-se, tendo por base o conhecimento local da rede, definir um leque variado de percursos. Deste modo, foram definidos 65 percursos percorrendo um total de 968 arcos (422 de simulação-65% e 546 de atribuição-81%) com uma distância total de cerca de 195 Km (113 Km de simulação-71% e 82 Km de atribuição-78%), apresentando-se no quadro seguinte uma breve estatística descritiva dos percursos fixados.

Variável	Média	Máximo	Mínimo	Mediana	Percentil 85
Comprimento (m)	3 007	10 819	858	2 218	4 400
Velocidade no tempo (Km/h)	29	113	11	24	39
Tempo de percurso (s)	453	2 456	65	338	728

Quadro V.9 – Indicadores estatísticos dos percursos seleccionados



De modo a facilitar os inúmeros cálculos a realizar foram, como já referido, desenvolvidos vários programas de cálculo automático específicos, em linguagem Pascal. Após a obtenção dos ficheiros com os resultados finais que consistiam numa listagem ordenada de todos os 6 parâmetros (GEHM, EMRN, EMRP, P85, GEH5 e TP), calculados com base na diferença entre volumes/tempos modelados resultantes da alteração da “variável” e volumes modelados/tempos do modelo original, procedeu-se à sua exportação para folhas de cálculo (*Microsoft Excel*) e, com base em macros expressamente programadas para o efeito, procedeu-se à representação gráfica destes resultados.

Na figura seguinte apresenta-se o gráfico tipo que permite uma mais fácil interpretação dos diversos gráficos a serem apresentados, identificando-se os critérios dos parâmetros adoptados segundo as recomendações inglesas (HMSO, 1996).

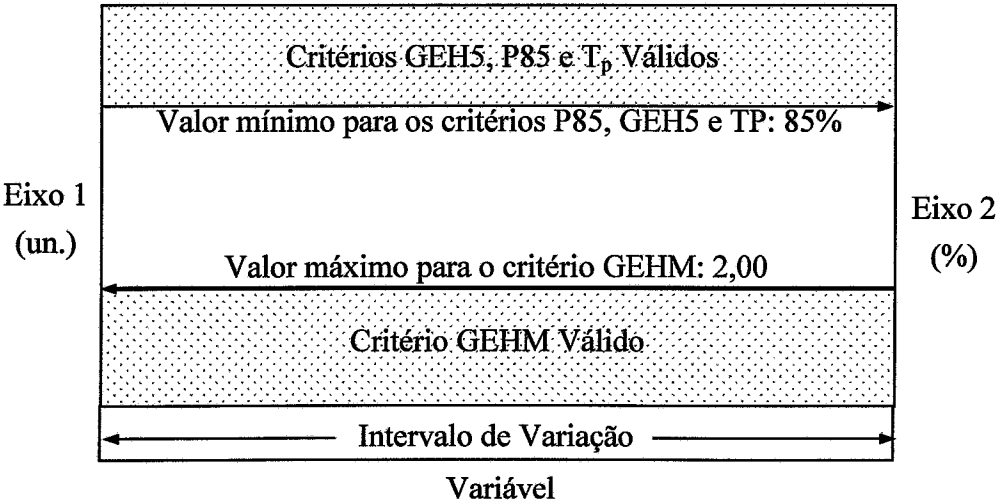


Figura V.9 – Gráfico tipo para interpretação dos resultados

Neste tipo de gráficos foram assim representados em ordenadas os valores para todos os parâmetros seleccionados (GEH no eixo 1 e restantes no eixo 2) em função do erro introduzido na variável representado em abcissas. Deste modo, é então possível visualizar a evolução dos impactos nos valores dos parâmetros em função do erro cometido e identificar os limites “máximos admissíveis” para o valor do erro simulado a partir da intersecção da “curva” da evolução de cada parâmetro com a “recta” horizontal que fixa o respectivo critério (GEH = 2,00 e GEH5 = P85 = TP = 85%). Observe-se que relativamente aos parâmetros propostos no presente trabalho de investigação não foram fixados quaisquer critérios.

4.2 Análise de sensibilidade face a diferentes erros na “variável” procura

Os primeiros tipos de análises de sensibilidade foram realizados ao nível da procura, tendo-se realizado alterações à Matriz Origem-Destino tal com preconizado no capítulo anterior, tendo-se procedido ao seguinte conjunto de análises:

- i) alteração percentual uniforme sobre todas as células da matriz de modo a analisar os impactos devidos a erros de sobre ou subestimação sistemática das viagens devida por exemplo no caso da subestimação, a uma desactualização da mesma;
- ii) alteração das células admitindo a lei normal de forma a simular nomeadamente os efeitos de variações temporais da procura e averiguar os respectivos impactos;
- iii) alteração a uma célula aleatória da matriz para se avaliar os impactos de erros pontuais na matriz decorrentes do normal processo de construção das mesmas, designadamente do recurso a métodos de actualização de matrizes aplicando o Método da Máxima Entropia ;
- iv) alteração a todas as células de uma dada Origem ou de um dado Destino de modo a se analisar a sensibilidade de cada zona.

Será de observar que nos testes realizados a amplitude dos valores simulados para os erros é algo “irreal”, ou seja, a probabilidade de, na prática, se cometerem erros com a ordem de grandeza dos valores limite das gamas de valores seleccionadas é praticamente nula. No entanto, estas análises também têm como objectivo a avaliação do “padrão” de variação dos valores dos parâmetros de aferição do desempenho de modelos em função dos erros cometidos, justificando deste modo a sua adopção.

4.2.1 Erros ao nível global da matriz

O primeiro teste consistiu na alteração global da matriz através da factorização de todas as células da Matriz Origem-Destino no intervalo compreendido entre 75% e 125% do total das viagens em degraus de 0,25%, tendo-se obtido os resultados apresentados graficamente na figura seguinte.

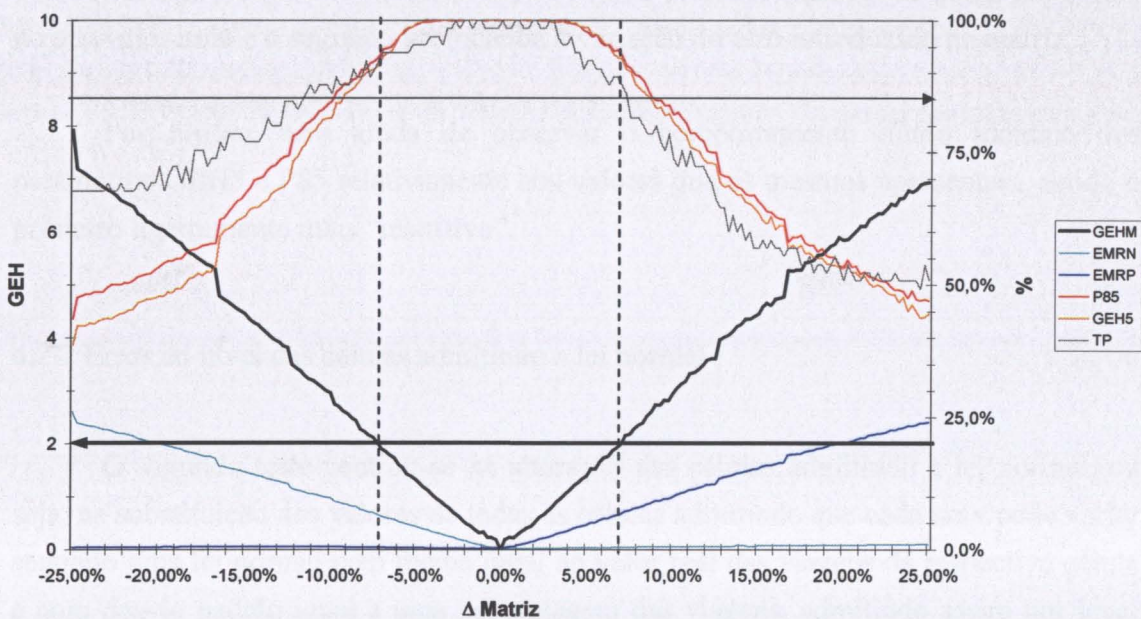


Figura V.10 – Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro percentual na matriz

Analisando os valores resultantes deste teste pode-se afirmar que o impacto de erros na Matriz no desempenho do modelo assume grande importância, como seria de esperar e que, caso se adoptem os critérios referidos, tal implicará que um erro global sistemático de apenas $\pm 7\%$ na matriz, apontado pelo parâmetro GEHM, pode ser responsável pela não validação de um modelo. Observe-se que este erro em termos absolutos corresponde a cerca de $\pm 4\,800$ viagens distribuídas por 1 266 células da matriz.

Os impactos do erro introduzido na matriz nos parâmetros globais reflectem-se de uma forma idêntica quer os mesmos sejam por excesso ou por defeito, com excepção, como seria de esperar, do parâmetro associado aos tempos de percurso (TP) e dos dois parâmetros relativos, Erro Médio Relativo Positivo e Negativo (EMRP e EMRN), propostos no presente trabalho.

Por outro lado, é de realçar o comportamento dos parâmetros EMRP e EMRN que, de uma forma geral, apontam para o erro introduzido na matriz. De facto, quando se simula um erro na matriz contido no intervalo $[-25\%; 0\%]$ o parâmetro EMRN assume praticamente a variação introduzida e o parâmetro EMRP permanece muito próximo do seu valor nulo e para o caso contrário (erro entre 0% e $+25\%$) estas

tendências dos parâmetros invertem-se, ou seja, o primeiro mantém-se quase inalterado no seu valor nulo e o segundo acompanha a variação do erro introduzido na matriz.

Por último, será ainda de observar o comportamento muito idêntico dos parâmetros GEH5 e P85 relativamente aos valores que os mesmos apresentam, sendo o primeiro ligeiramente mais “restritivo”.

4.2.2 Erros ao nível das células admitindo a lei normal

O segundo teste centrou-se na alteração das células admitindo a lei normal, ou seja, na substituição dos valores de todas as células admitindo que cada uma pode variar segundo uma lei normal com média igual ao valor real das viagens da respectiva célula e com desvio padrão igual a uma percentagem das viagens, admitindo assim um igual coeficiente de variação para todas as células ($\sigma_{ij} = CV \cdot M_{ij}$).

Para a realização deste teste, designadamente no que se refere à geração dos valores das células obedecendo à lei normal $N(M_{ij}, \sigma_{ij})$, recorreu-se à metodologia atrás apresentada, fazendo-se variar o coeficiente de variação no intervalo compreendido entre 0 e 50%, em degraus de 0,25%. Os resultados médios, obtidos a partir de 60 testes para cada nível médio de erro de modo a ter em consideração a variabilidade dos impactos, encontram-se graficamente apresentados na Figura V.11.

Pela análise deste gráfico constata-se que, em termos médios, a variação das células segundo uma lei Normal está limitada a um valor do coeficiente de variação de 10%, também apontado pelo parâmetro GEHM.

No entanto, se analisarmos detalhadamente a amplitude obtida para os valores dos parâmetros obtida nas diferentes corridas para cada nível de erro, apresentados graficamente na Figura V.12, na qual se representam além dos resultados médios os valores obtidos para os Percentis 15 e 85 (obs.: CV apenas entre 0 e 25%), pode-se constatar que o valor máximo “admissível” para o coeficiente de variação baixa para cerca de 5%²².

²² Note-se por outro lado que relativamente ao valor máximo “admissível” o mesmo aumenta para cerca de 18%

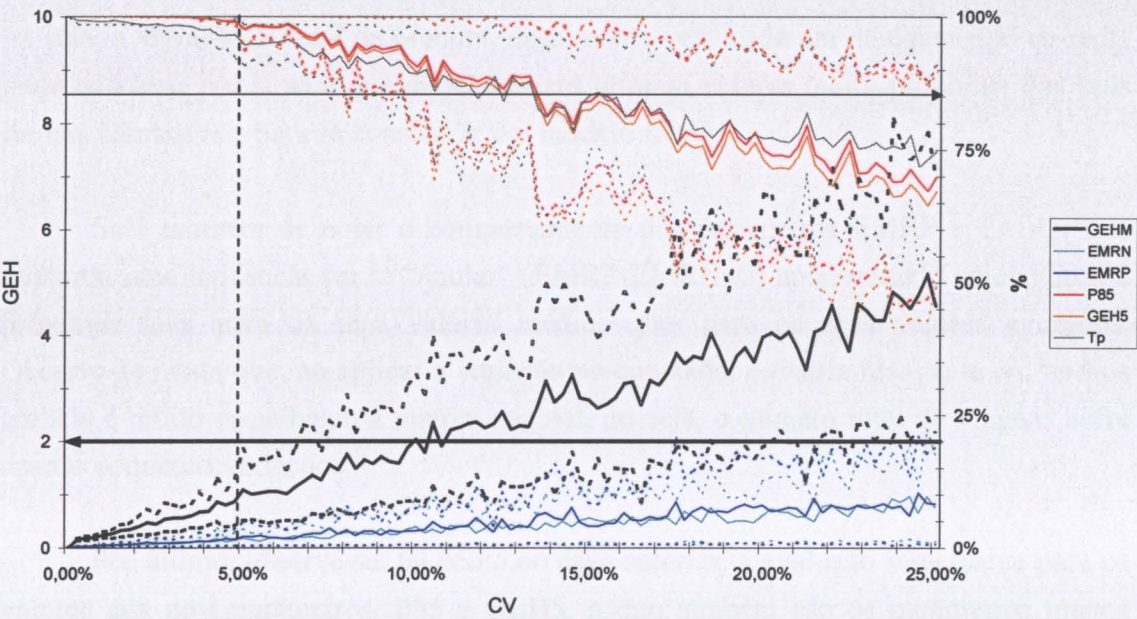


Figura V.11 – Impactos nos valores médios dos parâmetros em função do erro nas células

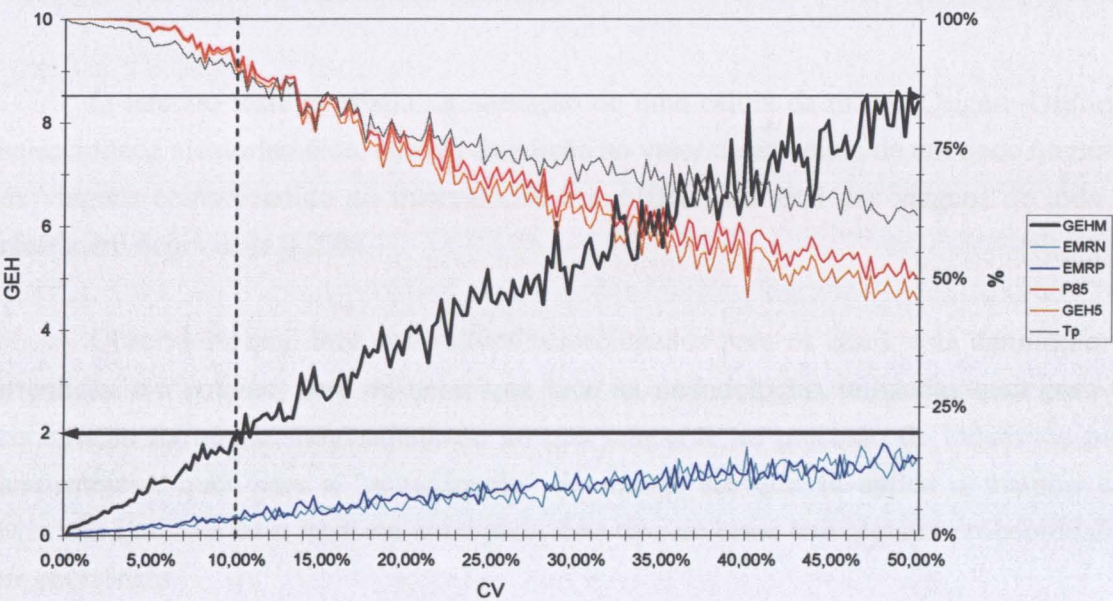


Figura V.12 – Impactos nos valores médios, percentis 15 e 85 dos parâmetros em função do erro nas células

Deste modo, considerando como normal uma flutuação de $\pm 10\%$ da procura e que 95% dos valores se encontram no intervalo de variação dado por $(\pm 5\% \cdot M_{ij})$, poder-

se-á dizer que o valor do critério associado ao parâmetro GEHM é um pouco restritivo, ou seja, a variação normal da procura, usualmente verificada em qualquer tipo de rede, pode conduzir por si só a que os parâmetros atinjam valores muito próximos dos seus limites admissíveis para se considerar um modelo fiável.

Será também de notar o comportamento dos parâmetros EMRP e EMRN que mostram uma tendência em se “anular” ($EMRP-EMRN \approx 0$) apresentando valores muito próximos quer para os seus valores médios quer para os seus valores extremos. Observe-se ainda que, ao aplicar a variação preconizada, a matriz resultante em termos globais é muito semelhante à matriz original, ou seja, o número total de viagens sofre apenas pequenas variações.

Por último, observe-se, tal como no caso anterior, a evolução semelhante para os valores dos dois parâmetros, P85 e GEH5, e que também são os parâmetros menos “restritivos”;

4.2.3 Erros ao nível de uma célula da matriz

O terceiro teste consistiu na alteração de uma célula da matriz Origem-Destino seleccionada aleatoriamente, através da adição ao valor dessa célula de um dado número de viagens compreendido no intervalo de 0 a +10%²³ do total das viagens de toda a matriz em degress de 0,25%.

Observe-se que, face aos valores seleccionados para os erros, esta simulação é irrealista. No entanto, será de notar que face às metodologias utilizadas quer para a construção da matriz, nomeadamente no que concerne ao processo de inquéritos por amostragem, quer para a “actualização” da matriz em que se aplica o método da Máxima Entropia com base em contagens, este tipo de erros tem alguma probabilidade de ocorrência.

²³ Neste tipo de análise não foram considerados erros por defeito uma vez que certas células não poderiam suportar as variações preconizadas pois conduziriam a valores negativos para o número de viagens.

Nesta análise foram realizados 150 testes apresentando-se no gráfico da Figura V.13 os valores médios obtidos para os parâmetros bem como a amplitude das variações, em termos dos valores mínimos e máximos obtidos.

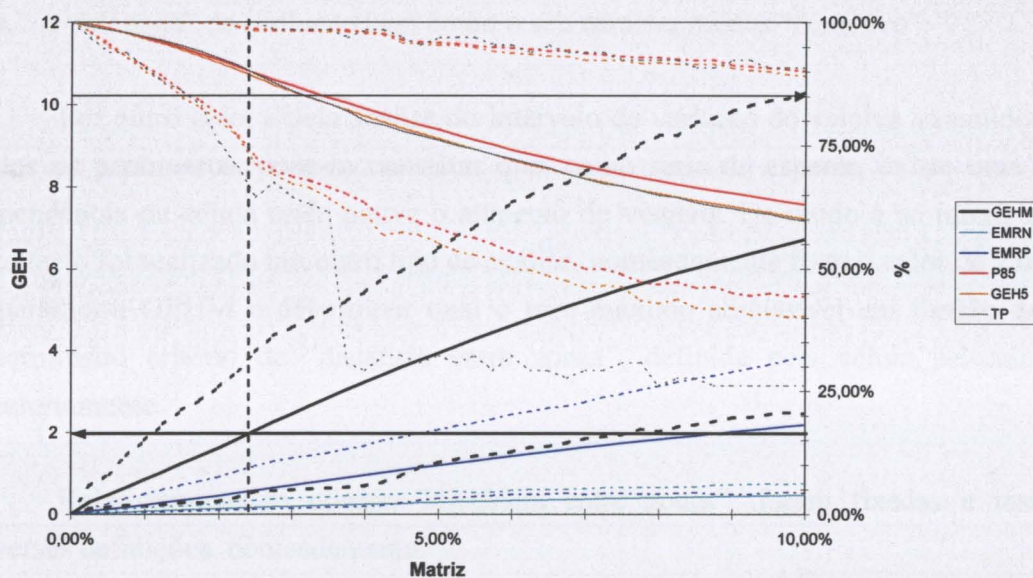


Figura V.13 – Impactos nos valores médios, máximos e mínimos dos parâmetros em função do erro numa célula

A primeira constatação pela análise dos valores aponta para que um erro na matriz concentrado numa célula tem um maior impacto no desempenho do modelo do que quando o mesmo erro se encontra disperso por toda a matriz. Em termos médios apenas seria admissível um erro de cerca de 2% do total das viagens (1 369 viagens), mais uma vez limitado pelo parâmetro GEHM, sendo de observar que quando o erro é afectado a determinadas células particularmente sensíveis este valor baixaria para cerca de 1% (685 viagens).

Assim, pode-se afirmar que este tipo de erros têm um grande impacto pelo que, quando se realiza a correcção/expansão da matriz, este processo deve ser realizado com grande cuidado de modo a que certas contagens, necessárias à aplicação do método da Máxima Entropia, não concentrem as viagens, ou seja, não as afectem a poucas células da matriz.

Focando-se agora a atenção nos parâmetros EMRP e EMRN, relativamente aos seus valores médios, denota-se que conjuntamente indicam o erro cometido na célula,

ou seja, a diferença entre estes dois parâmetros aponta para, aproximadamente, o valor do erro introduzido ($EMRP-EMRN \approx \% \text{ erro}$).

No que concerne aos parâmetros P85 e GEH5 verifica-se mais uma vez não só a sua “semelhança” de evolução bem como o seu carácter menos “restritivo”.

Por outro lado, e pela análise do intervalo de variação do valores assumidos por todos os parâmetros, pode-se constatar que, como seria de esperar, existe uma forte dependência da célula onde houve o aumento de viagens. De modo a se inferir sobre este facto foi realizado um outro tipo de análise, nomeadamente fixar o valor de 2,0 para o parâmetro GEHM e determinar qual o erro máximo admissível em função de um determinado critério de “distância entre zonas”, definida pela célula seleccionada aleatoriamente.

Relativamente ao critério “distância entre zonas”, foram fixadas e testadas diversas definições, nomeadamente:

- distância entre centróides;
- comprimento do caminho mais curto;
- tempo de percurso mínimo;
- número mínimo de arcos percorridos entre as várias alternativas de percurso;
- número mínimo de zonas transpostas entre as várias alternativas de percurso, incluindo a inicial e a final.

De entre todas estas definições, apresentam-se graficamente nas figuras V.14 e V.15 os resultados obtidos relativos à primeira e à última definição já que, embora todas tenham apontado para que quanto maior a “distância” maior a sensibilidade das células, estas duas definições apresentam um carácter mais físico que pode constituir uma ajuda relativamente, por exemplo, à definição de cordões e/ou *screenlines*.

Analisando os resultados apresentados graficamente pode-se então afirmar que caso se quisesse evitar erros com um impacto no desempenho do modelo definido por um valor do parâmetro GEHM superior a 2, devidos a erros de 2%²⁴ do total da procura

²⁴ Este valor adoptado resulta da constatação anterior de, em média, o erro máximo admissível numa célula ser de 2%

concentrado numa célula, dever-se-iam fixar cordões e/ou *screenlines* separados por distâncias inferiores a cerca de 1500 m (ver Figura V.14) e delimitando 4 zonas (ver Figura V.15).

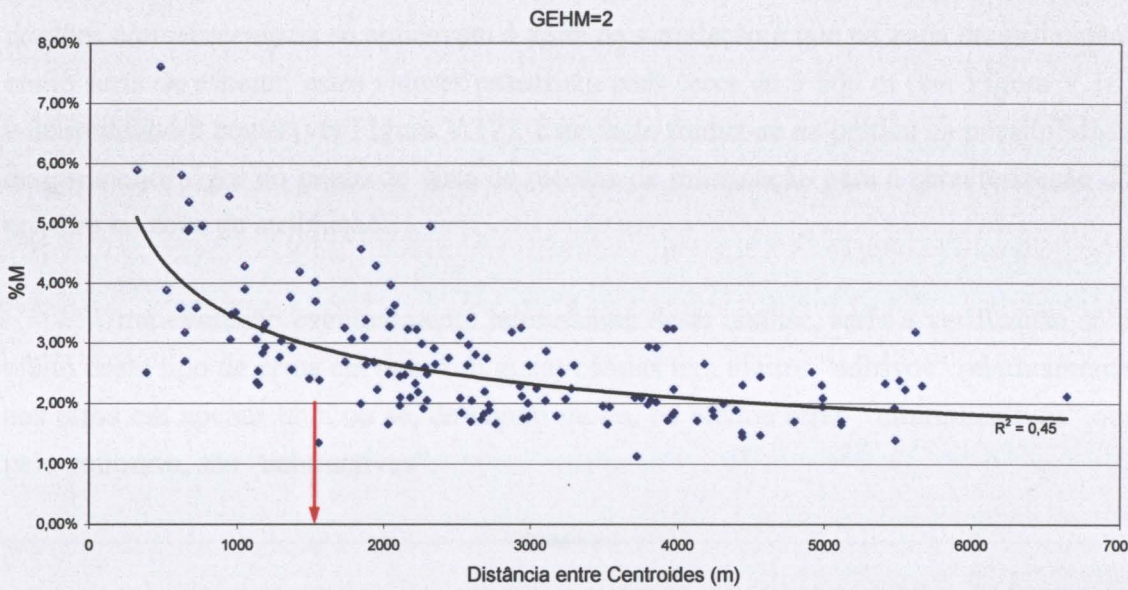


Figura V.14 - Erro máximo admissível nas células para GEHM = 2 em função da distância entre centróides

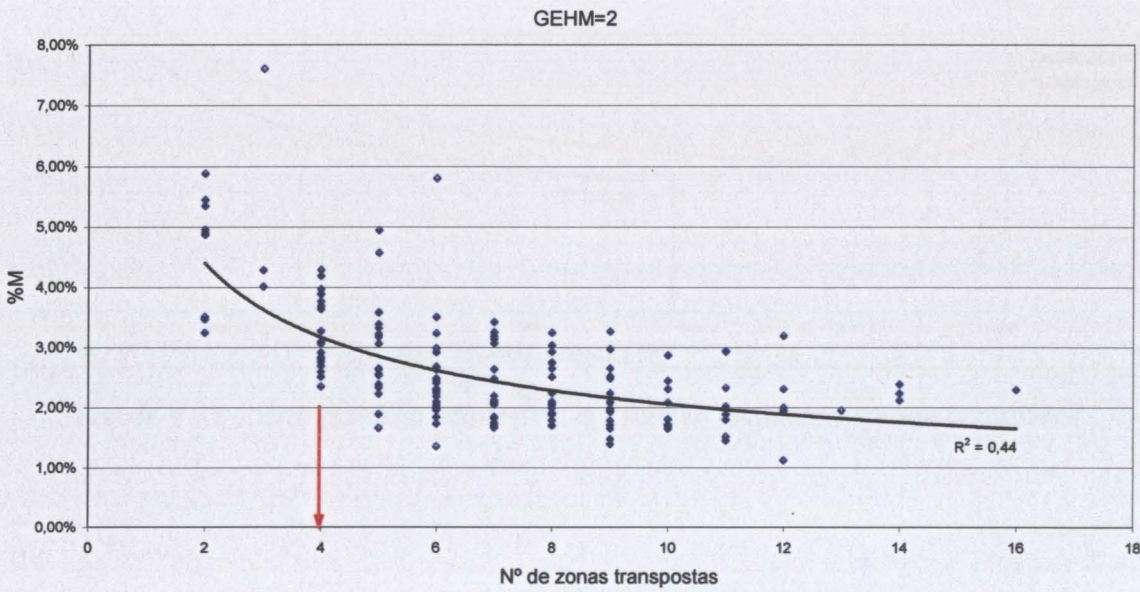


Figura V.15 - Erro máximo admissível nas células para GEHM = 2 em função do número de zonas transpostas

Se analisarmos estes mesmos erros mas separando as células que representam as viagens apenas entre zonas de simulação e apenas entre zonas de atribuição (figuras V.16 e V.17) poder-se-ia dizer que os critérios atrás enunciados para a definição de cordões e/ou *screenlines* se aplicavam à zona de simulação e que na zona de atribuição, como seria de esperar, estes valores passariam para cerca de 3 800 m (ver Figura V.16) e delimitando 8 zonas (ver Figura V.17). Este facto traduz-se na prática na possibilidade de um menor rigor do ponto de vista de recolha de informação para a caracterização da procura na zona de atribuição

Uma evolução eventualmente interessante desta análise, seria a verificação se o efeito deste tipo de erros em duas (ou mais) células terá efeitos “aditivos” relativamente aos erros em apenas uma ou se, de algum modo, os efeitos serão “multiplicativos” ou, pelo contrário, são “subtractivos”.

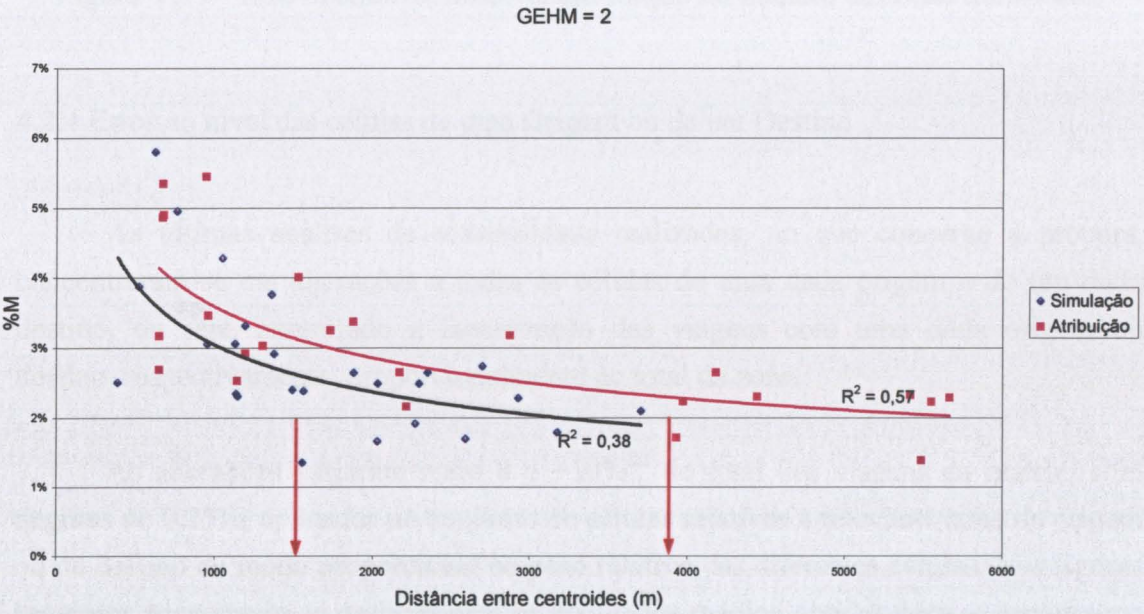


Figura V.16 - Erro máximo admissível em função da distância entre centróides

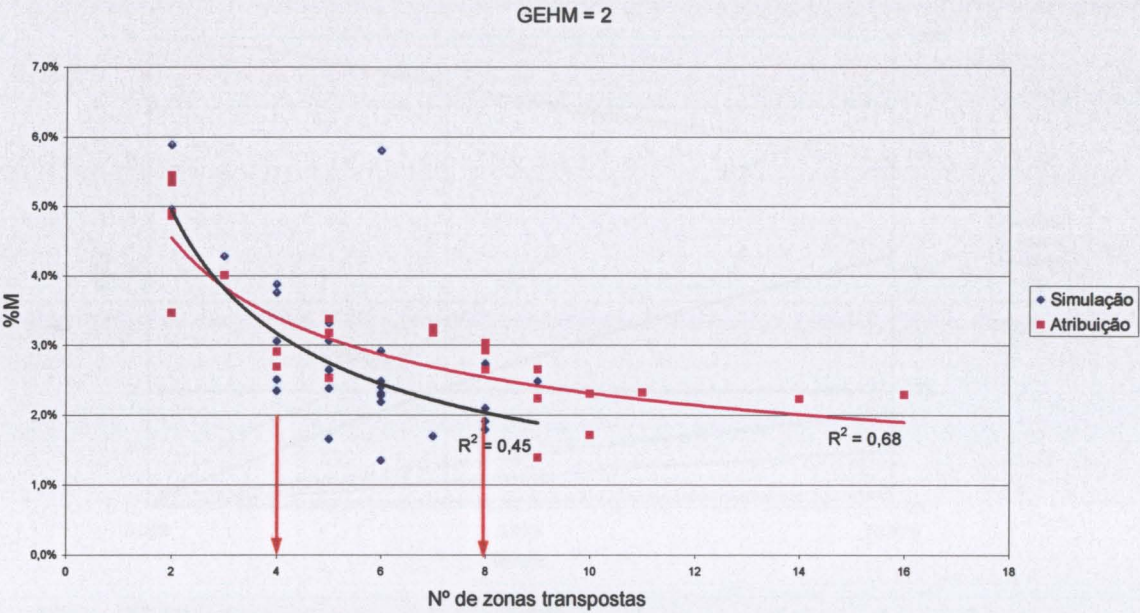


Figura V.17 - Erro máximo admissível em função do número de zonas transpostas

4.2.4 Erros ao nível das células de uma Origem ou de um Destino

As últimas análises de sensibilidade realizadas, no que concerne à procura, concentraram-se em alterações a todas as células de uma dada origem e de um dado destino, ou seja, assumindo a factorização das viagens com uma dada origem ou destino, respectivamente, proporcionalmente ao total da zona.

As alterações variaram entre 0 e +10%²⁵ do total das viagens da matriz, com degraus de 0,25%, aplicadas no conjunto de células relativas à relevante zona de origem ou de destino de modo proporcional ao peso relativo das diferentes células. Nas figuras seguintes apresentam-se graficamente os resultados médios obtidos para os parâmetros bem como os seus valores máximos e mínimos. Note-se que estes testes foram realizados aplicando o erro em todas as Origens e em todos os Destinos.

²⁵ Ver nota 23

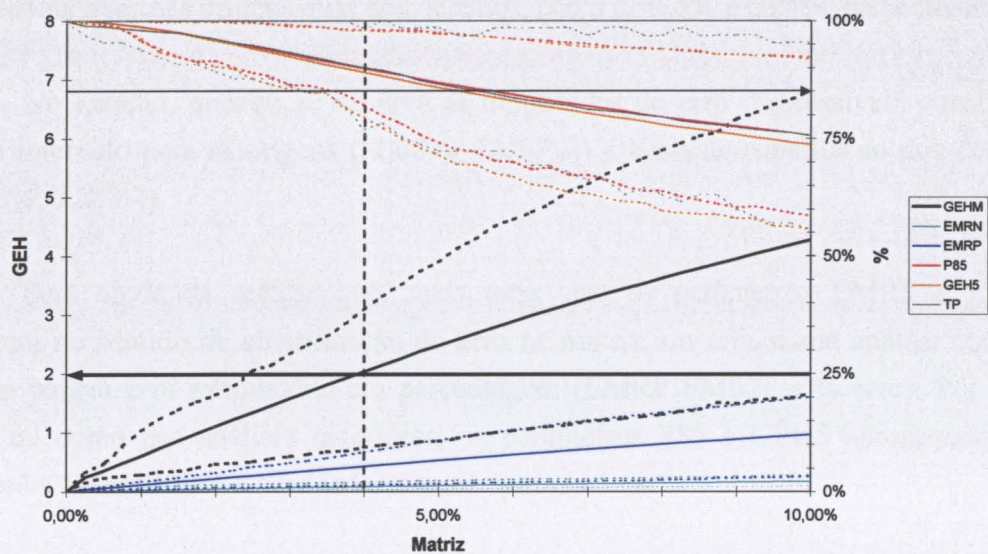


Figura V.18 – Impactos nos valores médios, máximos e mínimos dos parâmetros em função dos erros concentrados numa origem

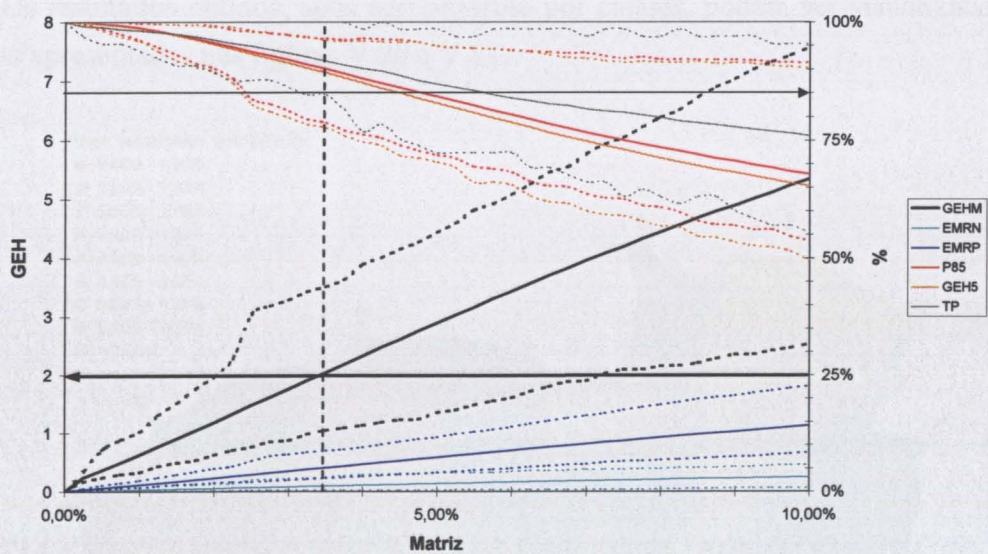


Figura V.19 - Impactos nos valores médios, máximos e mínimos dos parâmetros em função dos erros concentrados num destino

Analisando estes gráficos verifica-se que, como seria de esperar, um erro “concentrado” numa origem ou num destino tem um maior impacto que quando distribuído por toda a matriz mas menor do que quando concentrado numa célula. Tal

como nos casos anteriores, o erro “admissível” é definido pelo parâmetro GEHM sendo semelhante quer nas origens quer nos destinos, cerca de 3.5% e de 4%, respectivamente.

No entanto, quando se observa as amplitudes do erro “admissível” constata-se que o intervalo para as origens ([2,00%; 12,50%]) é bastante superior ao dos destinos ([2,00%; 7,25%]).

Será ainda de realçar que, mais uma vez, os parâmetros EMRP e EMRN apontam no sentido de identificação do erro na matriz, ou seja, a sua análise conjunta aponta para o erro introduzido em percentagem ($EMRP-EMRN \approx \% \text{ erro}$). Por outro lado, tal como nas análises anteriores, os parâmetros P85 e GEH5 apresentam uma evolução “semelhante” e com valores mais “permissivos”.

De modo a estudar as variações da sensibilidade relativas às diferentes zonas, tendo em atenção quer as origens quer os destinos, foi fixado o critério de 2,0 para o parâmetro GEHM e, para cada zona, quantificou-se o máximo valor “admissível” para o erro. Os resultados obtidos, após agrupamento por classes, podem ser visualizados nas plantas apresentadas nas figuras V.20 e V.21.

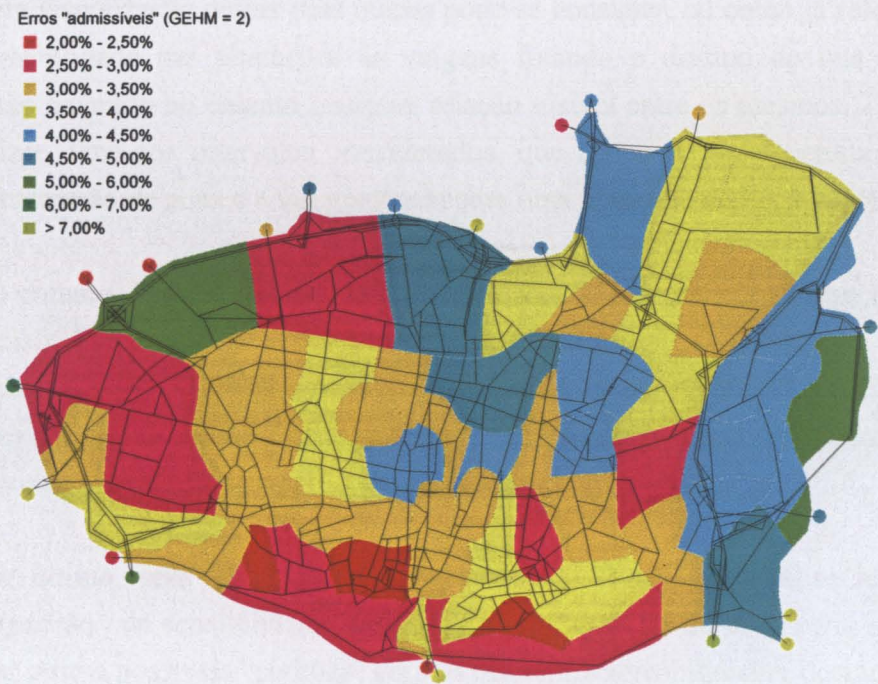


Figura V.20 - Distribuição espacial do erro “admissível” por Origens

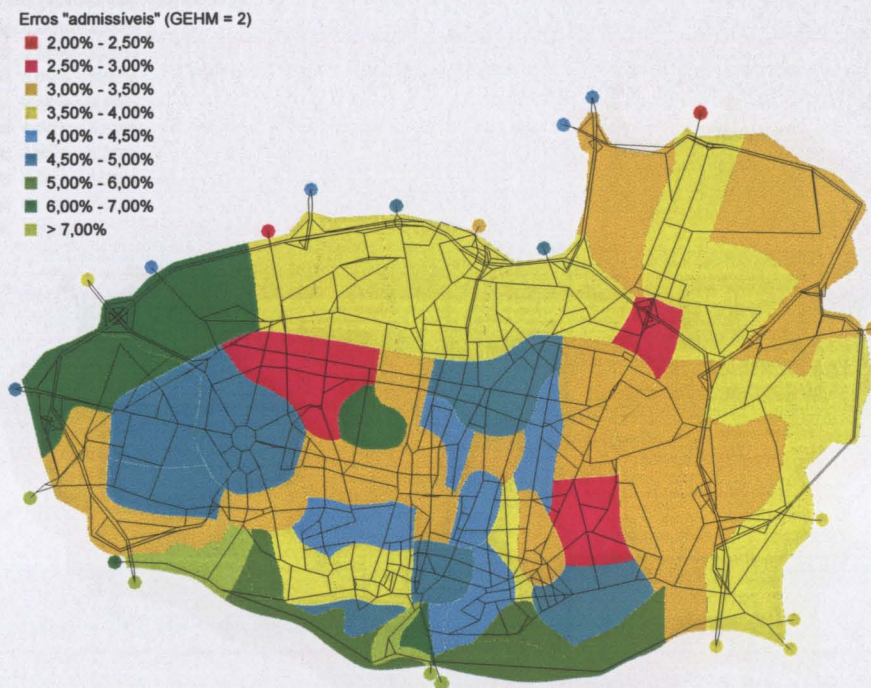


Figura V.21 - Distribuição espacial do erro "admissível" por Destinos

Pela visualização destes dois mapas pode-se constatar, tal como já referido, uma maior sensibilidade nas alterações às viagens fixando o destino do que fixando a origem, não havendo no entanto qualquer relação visível entre os mesmos. Também se poderá dizer, face aos intervalos considerados, que não é aparente nenhuma relação entre a localização da zona e a sua apetência para uma maior ou menor sensibilidade.

No entanto, juntando estes dois mapas e considerando entre a origem e o destino o mais sensível (Figura V.22) pode ser realizada uma visualização conjunta por zonas que também pode auxiliar à agregação das zonas para a definição de cordões/*screenlines* designadamente no aspecto de homogeneização de modo a evitar a união de zonas com sensibilidades muito díspares.

Por último, será ainda de observar que, não tendo esta análise identificado nenhum "padrão" de sensibilidade geográfica na localização do erro, seria importante equacionar outros possíveis "padrões" para as diferentes sensibilidades, designadamente em função, por exemplo, do grau de saturação ou da densidade de rede das zonas.

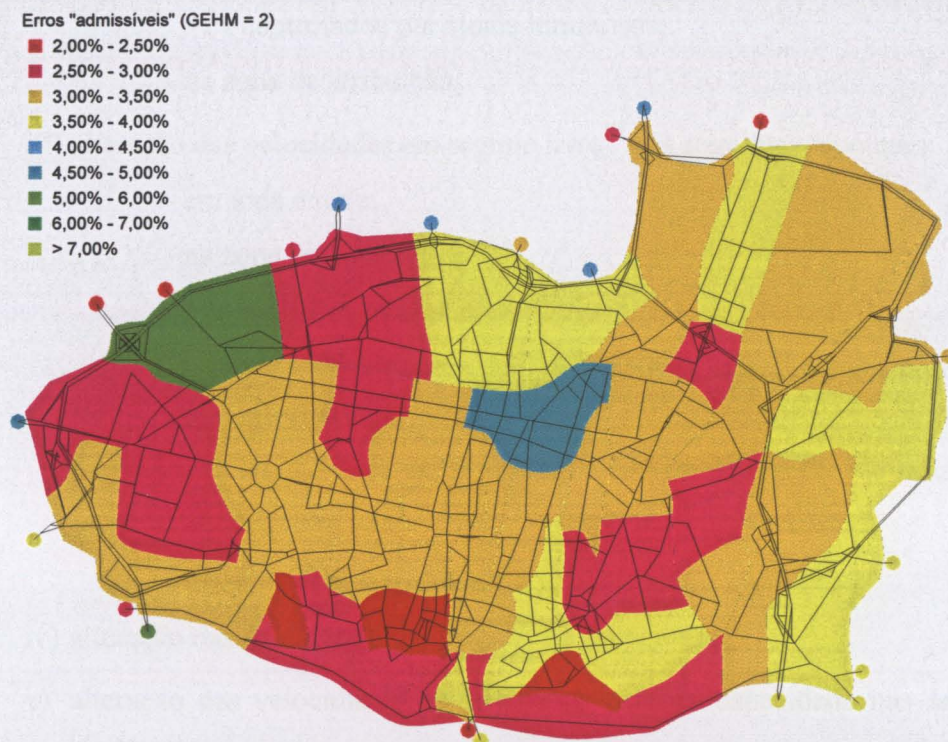


Figura V.22 - Distribuição espacial do erro "admissível" por zona

4.3. Análise de sensibilidade face a diferentes erros na "variável" oferta

O segundo tipo de análises de sensibilidade realizadas concentrou-se na oferta apenas simulando, como já referido, a ocorrência sistemática de diferentes erros, de modo a simular erros decorrentes da previsão dos valores das variáveis de funcionamento responsáveis pelas condições de funcionamento da rede, nomeadamente:

- i) alteração do intervalo crítico;
- ii) alteração das "capacidades" (débitos de saturação e/ou capacidades de viragens e/ou capacidades dos arcos), nas seguintes hipóteses:
 - em toda a rede;
 - na zona de simulação;
 - em todos os nós;
 - nos nós de simulação que representam cruzamentos prioritários;

- nos nós de simulação que representam cruzamentos controlados por sinais luminosos;
 - na zona de atribuição;
- iii) alteração das velocidades em regime livre²⁶ nas seguintes hipóteses:
- em toda a rede;
 - na zona de simulação;
 - em todos os arcos;
 - em todos os arcos cujo nó a jusante representa um cruzamento prioritário;
 - em todos os arcos cujo nó a jusante representa um cruzamento controlado por sinais luminosos;
 - na zona de atribuição;
- iv) alteração das velocidades em regime de capacidade²⁷;
- v) alteração das velocidades em regime livre e de capacidade nas seguintes hipóteses:
- em toda a rede;
 - na zona de atribuição;
- vi) alteração da potência da função volume-velocidade.

Observe-se mais uma vez que a amplitude de valores testada nos erros tem uma baixa probabilidade de, na prática, ocorrer. No entanto, recorde-se que estas análises também têm como objectivo a avaliação do “padrão” do comportamento dos parâmetros de aferição do desempenho de modelos em função dos erros cometidos, justificando deste esta opção.

4.3.1 Erros ao nível do intervalo crítico

A primeira alteração incidiu sobre o intervalo crítico em que foi modificado o valor base deste intervalo (3,5 segundos) entre 0,1 segundos e 7,0 segundos, em degraus

²⁶ Alteração limitada inferiormente pelo valor da velocidade em capacidade nos arcos de atribuição

²⁷ A alteração limitada superiormente pela velocidade em regime livre, sendo também de observar que esta variável é apenas definida na zona de atribuição

de 0,1 segundos, tendo sido obtidos os resultados que se apresentam graficamente na Figura V.23.

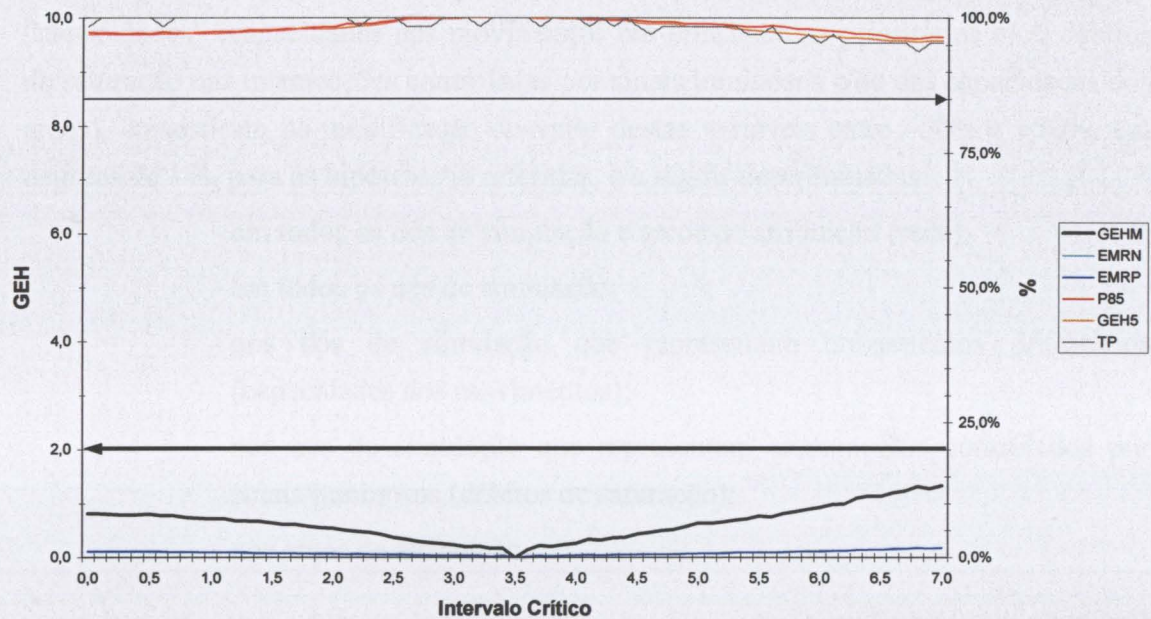


Figura V.23 – Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro no intervalo crítico

Da análise destes resultados pode-se afirmar que a importância desta variável é mínima. Tal facto pode ser justificável, por um lado, por nas intersecções saturadas em que as situações de fila são bastante comuns e, tal como na realidade, os veículos não prioritários “forçam” a sua entrada pelo que esta variável não é a mais relevante (observe-se que esta possibilidade está prevista pelo modelo SATURN através de um parâmetro global que define a capacidade mínima dos movimentos). Por outro lado, em situações fluidas não só os intervalos de tempo entre os veículos das correntes prioritárias podem ser bastante superiores ao valor do intervalo crítico, como também os fluxos dos movimentos não prioritários sendo pequenos fazem com que a variação do valor do intervalo crítico não tenha grandes impactos.

No entanto, dever-se-á observar que se estão a analisar os impactos com base nos parâmetros globais dum erro localizado (observe-se que este erro apenas afecta os movimentos não prioritários das intersecções modeladas na zona de simulação) pelo que os efeitos ao nível dos parâmetros de aferição calculados com base em toda a rede podem ser atenuados.

4.3.2 Erros ao nível das “capacidades”

Os testes realizados no que concerne à simulação de erros nos valores das “capacidades” (capacidades dos movimentos em cruzamentos prioritários e/ou débitos de saturação nas intersecções controladas por sinais luminosos e/ou das capacidades dos arcos), consistiram na modificação do valor destas variáveis entre -50% e $+50\%$, em degraus de 1% , para as hipóteses já referidas, e a seguir discriminadas:

- em todos os nós de simulação e arcos de atribuição (rede);
- em todos os nós de simulação;
- nos nós de simulação que representam cruzamentos prioritários (capacidades dos movimentos);
- nos nós de simulação que representam cruzamentos controlados por sinais luminosos (débitos de saturação);
- nos arcos de atribuição.

Nas figuras seguintes apresentam-se graficamente os resultados obtidos para cada uma das hipóteses atrás enunciadas.

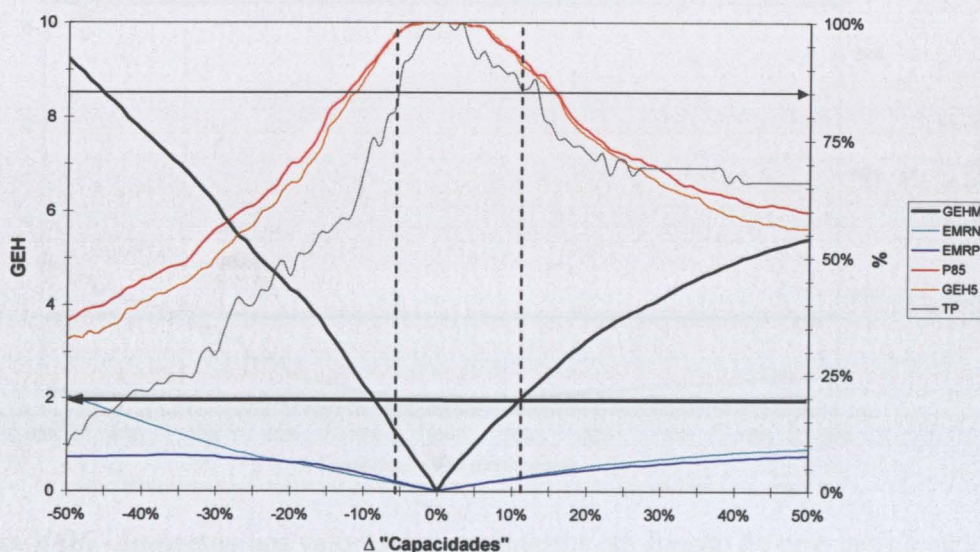


Figura V.24 – Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro nas “capacidades” em toda a rede

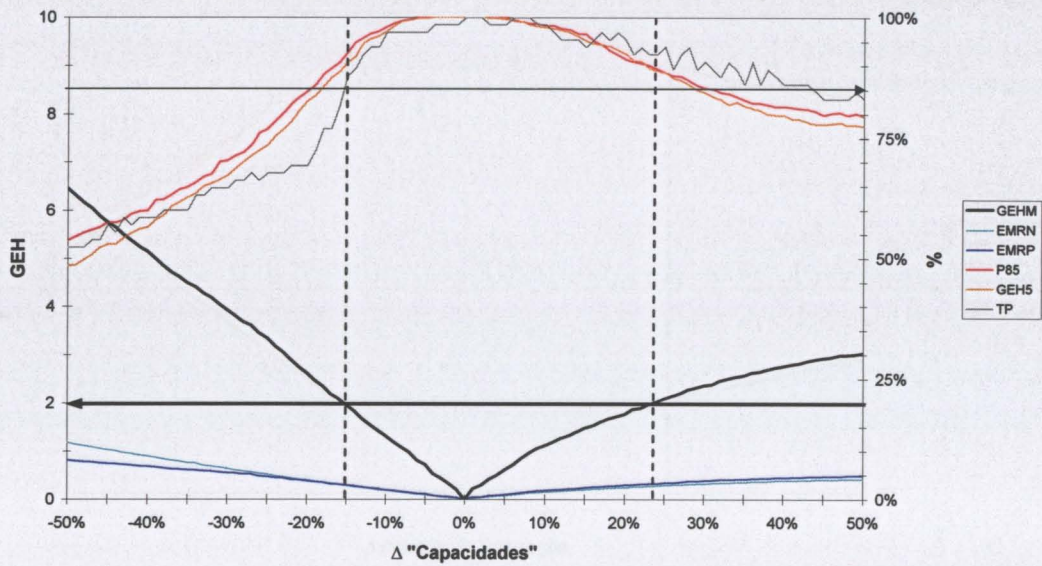


Figura V.25 - Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro nas “capacidades” dos nós de simulação

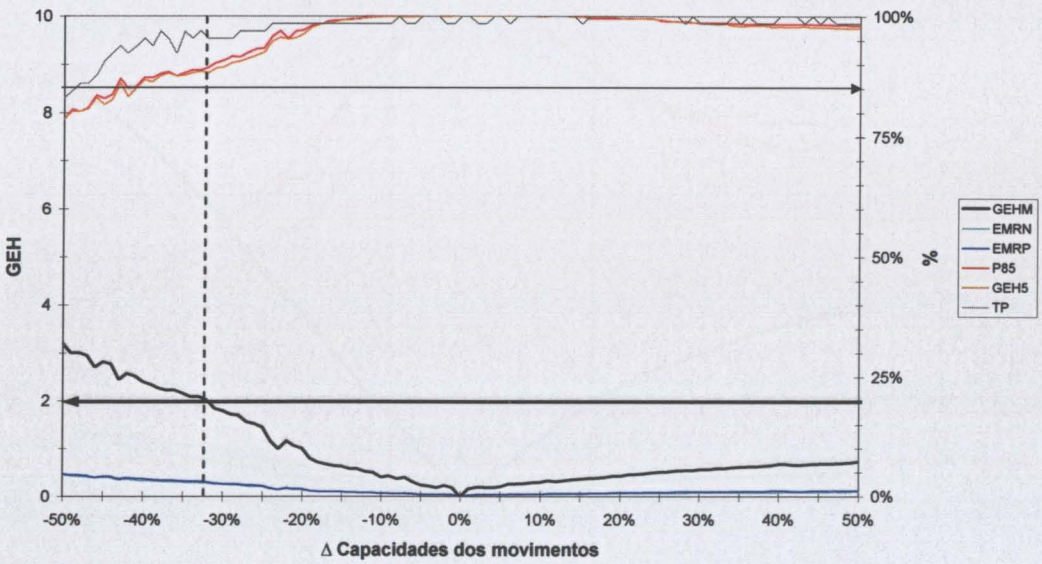


Figura V.26 - Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro nas capacidades dos movimentos em cruzamentos prioritários

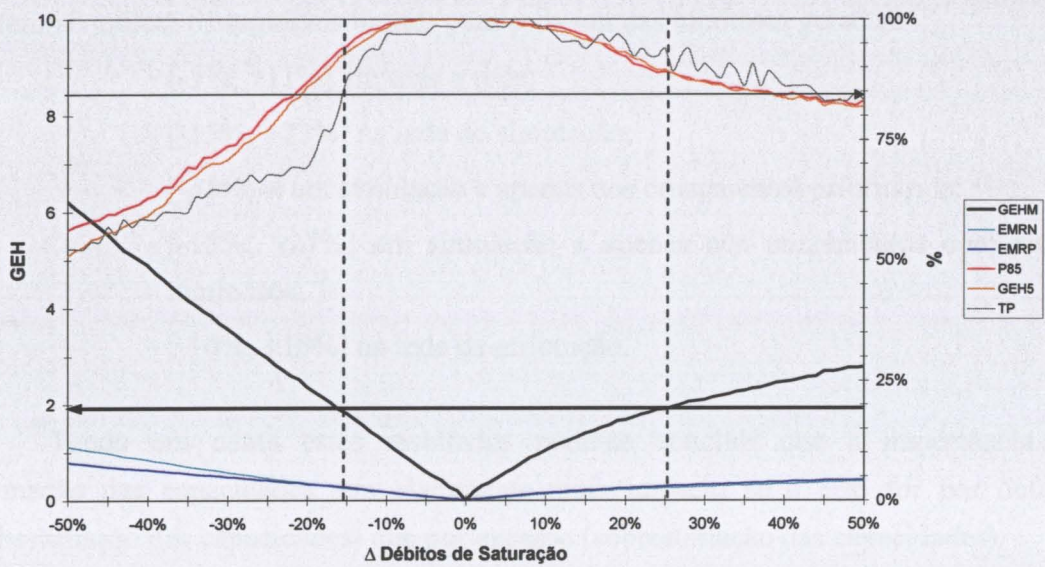


Figura V.27 - Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro nos débitos de saturação, em cruzamentos com sinais luminosos

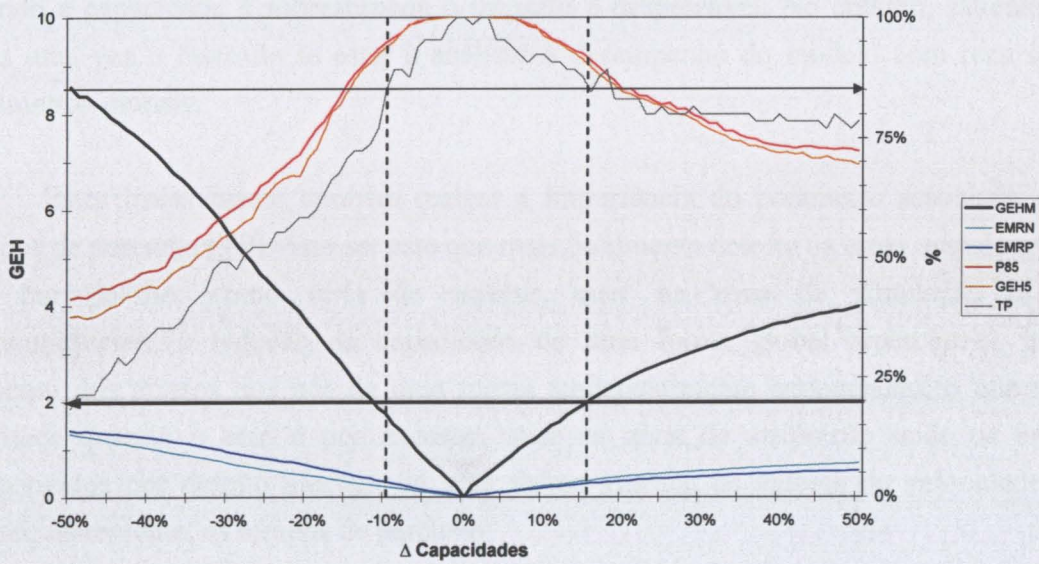


Figura V.28 - Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro nas capacidades nos arcos da zona de atribuição

Da análise destes gráficos pode-se constatar que em quase todos os testes a variação “admissível” das “capacidades” é limitada inferiormente pelo parâmetro associado aos tempos de percurso (TP) e superiormente pelo parâmetro GEHM. Tendo

em atenção que o número de erros impostos é distinto em cada um dos testes realizados, podem-se indicar os seguintes limites para cada um das hipóteses geradas:

- [-5%; +11%] em toda a rede;
- [-15%; +23%] na rede de simulação;
- [-31%; -] em simulação e apenas nos cruzamentos prioritários;
- [-15%; +27%] em simulação e apenas nos cruzamentos com sinais luminosos;
- [-10%; +15%] na rede de atribuição.

Tendo em conta estes resultados pode-se concluir que a importância da estimação das capacidades tem claramente mais impacto se o erro for por defeito (subestimação das capacidades) que por excesso (sobrestimação das capacidades).

Por outro lado, face às hipóteses testadas da variável “capacidades”, embora não seja possível comparar linearmente os valores, a que “admite” maiores erros é a relativa à capacidade dos movimentos nos cruzamentos prioritários, denotando-se mesmo que quando a capacidade é sobrestimada o impacto é desprezável. No entanto, saliente-se mais uma vez o facto de se estar a analisar o desempenho do modelo com recurso a parâmetros globais.

Estes testes fazem também realçar a importância do parâmetro associado aos tempos de percurso (TP) visto ser este que mais facilmente detecta os erros quando estes são por defeito, como seria de esperar, quer na zona de simulação onde, particularmente, a redução da capacidade de uma forma global repercute-se num aumento dos atrasos nos nós de uma forma tendencialmente exponencial, o que não acontece quando o erro é por excesso, quer na zona de atribuição onde os erros introduzidos por defeito afectam de uma forma vincada os valores da velocidade e, consequentemente, os tempos de percurso.

Ainda no que se refere à análise de sensibilidade da variável “capacidade”, será de salientar a evolução dos parâmetros EMRP e EMRN, que quando analisados conjuntamente os mesmos tendem a anular-se ($EMRP-EMRN \approx 0$), indicando a existência de erros de modelação da rede tendo presente que não existem erros na matriz. Embora este efeito deixe de se notar quando a redução das “capacidades” é significativo, tal facto é justificável uma vez que a partir de um certo valor da

capacidade, os veículos não conseguem “entrar” na rede passando o parâmetro EMRN a ter um valor superior ao parâmetro EMRP, como seria de esperar.

Por último, tal como nos resultados obtidos nas análises realizadas ao nível da simulação de erros nas variáveis que caracterizam a “oferta”, é de observar não só a evolução “semelhante” dos parâmetros P85 e GEH5, como também o seu carácter menos “restritivo”.

4.3.3 Erros ao nível das velocidades

Os testes realizados no que se refere à variação das velocidades consistiram na alteração dos valores desta variável entre -50% e +50%, em degraus de 1%, face ao seu valor de referência e, tendo em atenção o “tipo” de velocidade, foram testadas as seguintes hipóteses

i) velocidade em regime livre²⁸

- em toda a rede;
- na rede de simulação;
- em simulação e apenas nos arcos com cruzamentos prioritários;
- em simulação e apenas nos arcos com cruzamentos de sinais luminosos;
- na rede de atribuição.

ii) velocidade em regime livre e de capacidade

- em toda a rede²⁹;
- na rede de atribuição;

iii) velocidade em regime de capacidade³⁰

- na rede de atribuição;

Os resultados obtidos da aplicação da análise de sensibilidade podem ser visualizados nos gráficos apresentados nas figuras seguintes.

²⁸ A alteração desta velocidade nos arcos de atribuição é limitada inferiormente pelo valor da variável velocidade em capacidade

²⁹ Nos arcos de simulação apenas é definida a velocidade em regime livre

³⁰ A alteração desta velocidade nos arcos de atribuição é limitada superiormente pelo valor da variável velocidade em regime livre

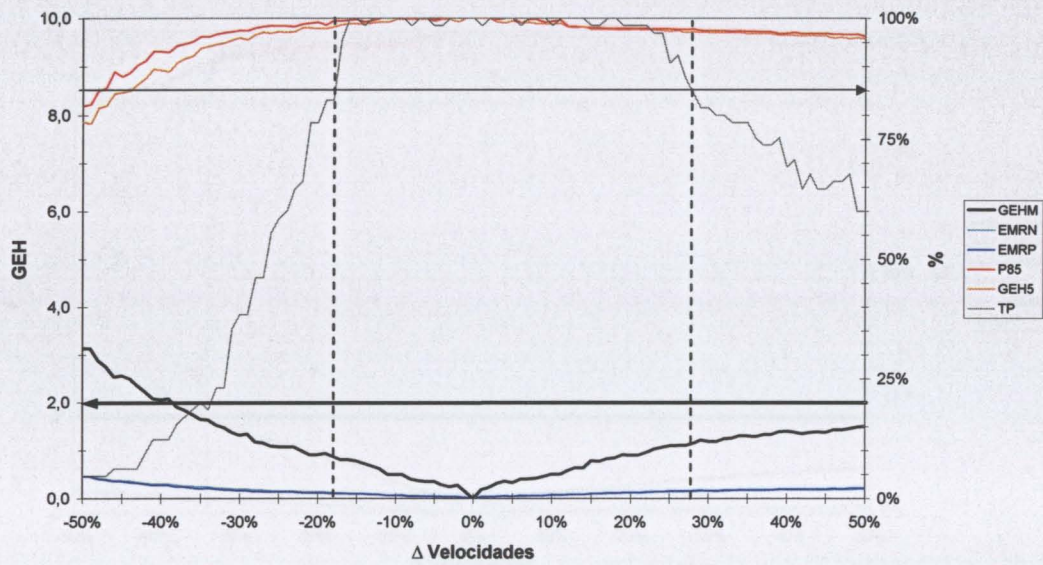


Figura V.29 - Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro nas velocidades em regime livre na rede

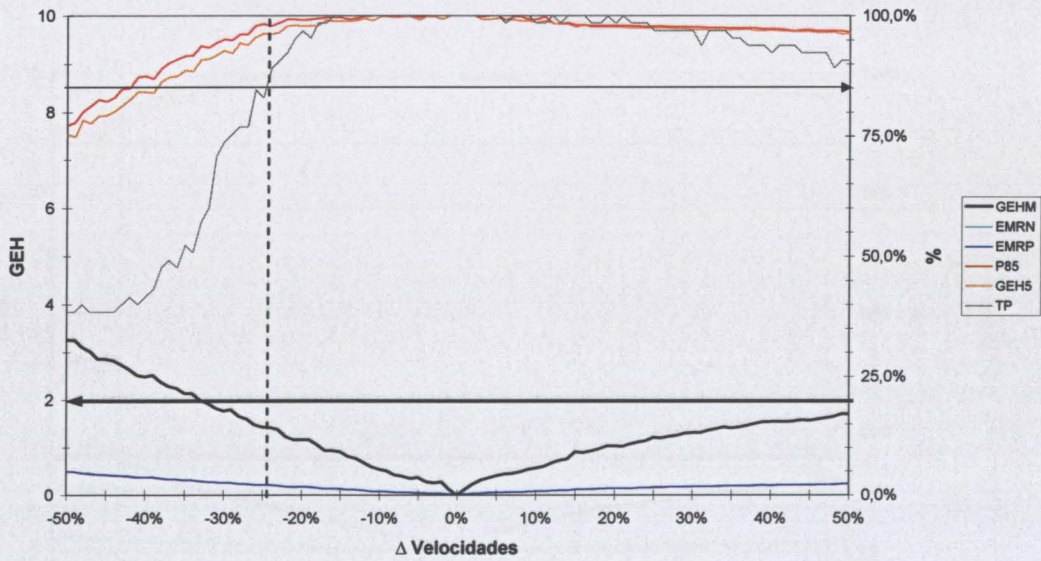


Figura V.30 - Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro nas velocidades em regime livre na zona de simulação

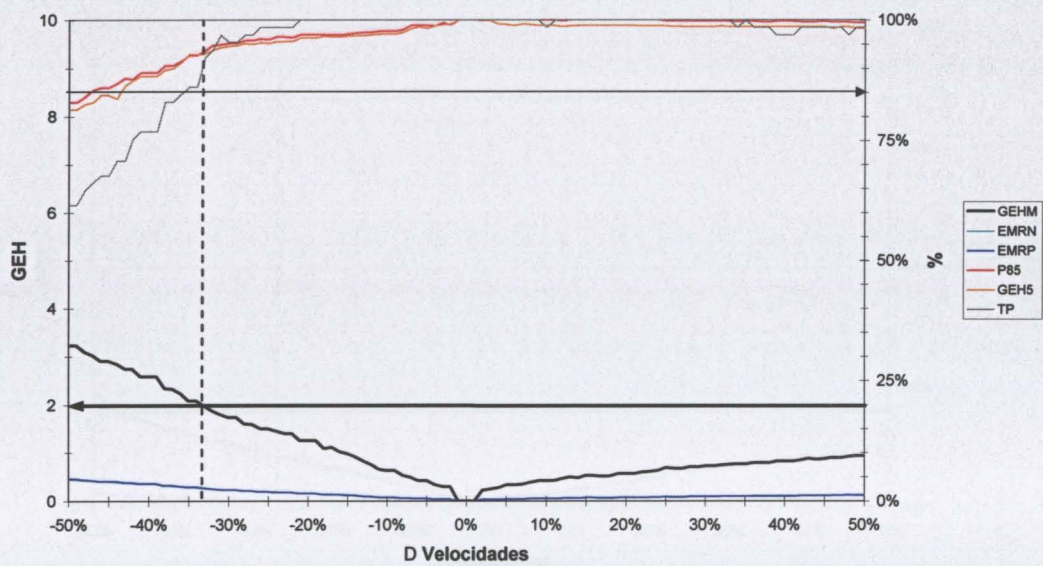


Figura V.31 - Resultados da variação das velocidades em regime livre nos arcos com cruzamentos prioritários a jusante

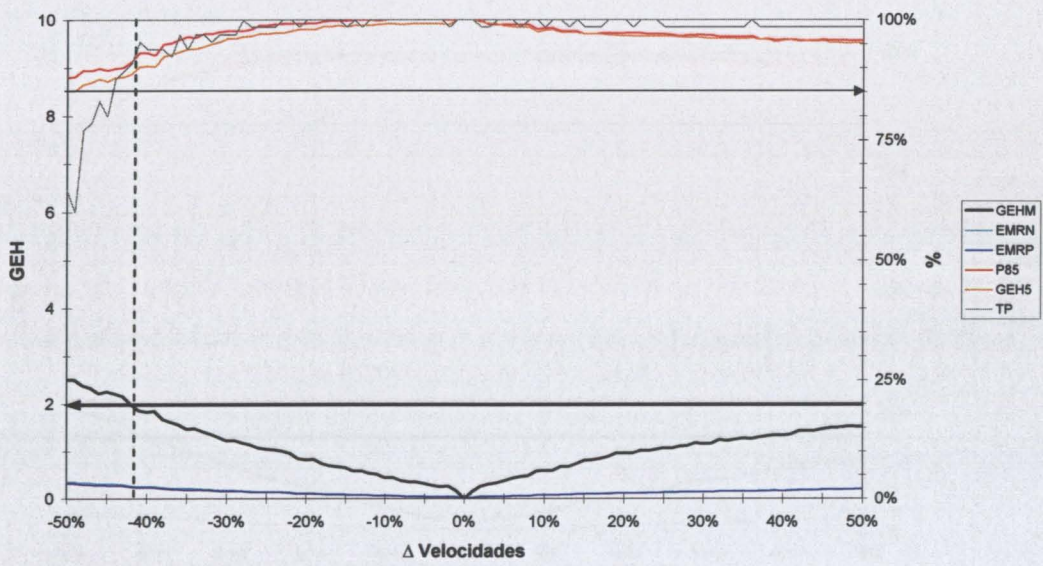


Figura V.32 - Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro nas velocidades em regime livre nos arcos com cruzamentos de sinais luminosos a jusante

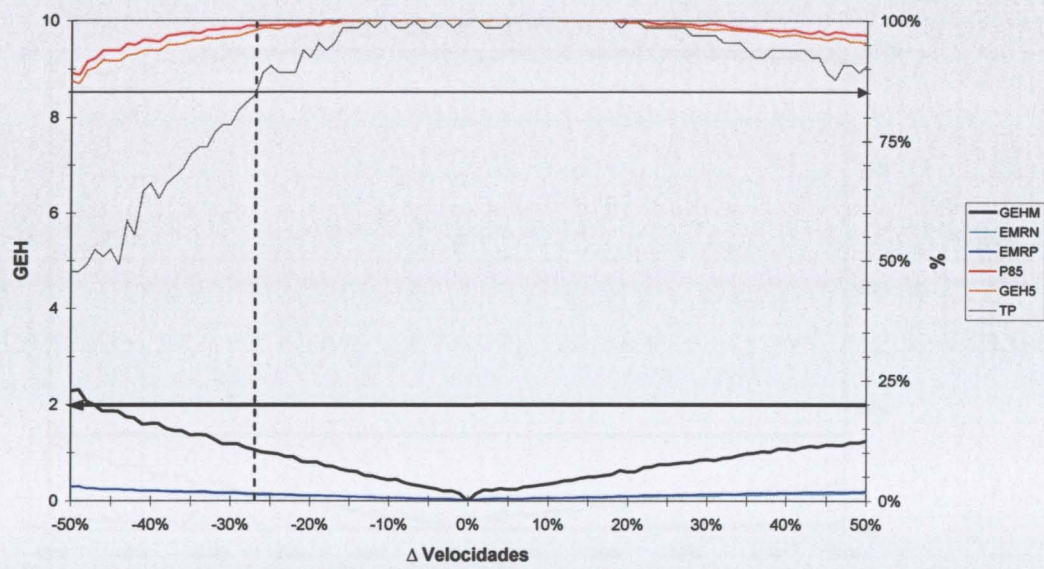


Figura V.33 - Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro nas velocidades em regime livre na zona de atribuição

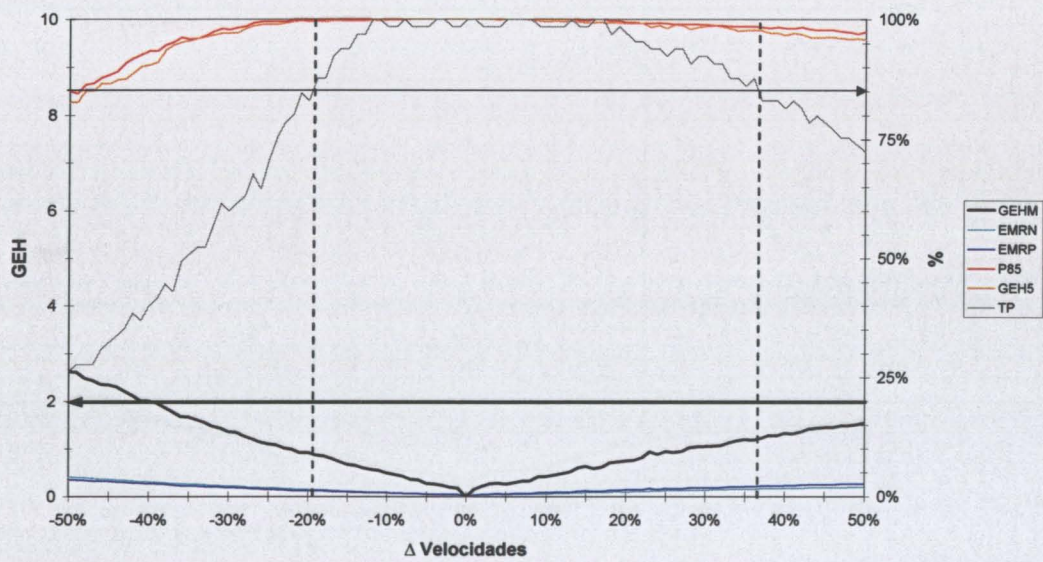


Figura V.34 - Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro nas velocidades em regime livre e em capacidade em toda a rede

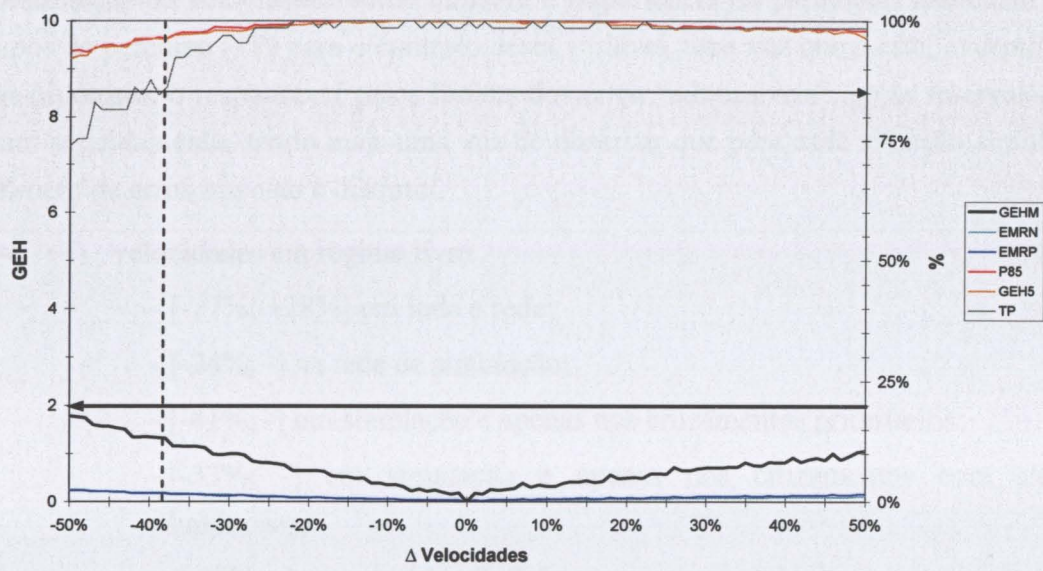


Figura V.35 - Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro nas velocidades em regime livre e capacidade na zona de atribuição

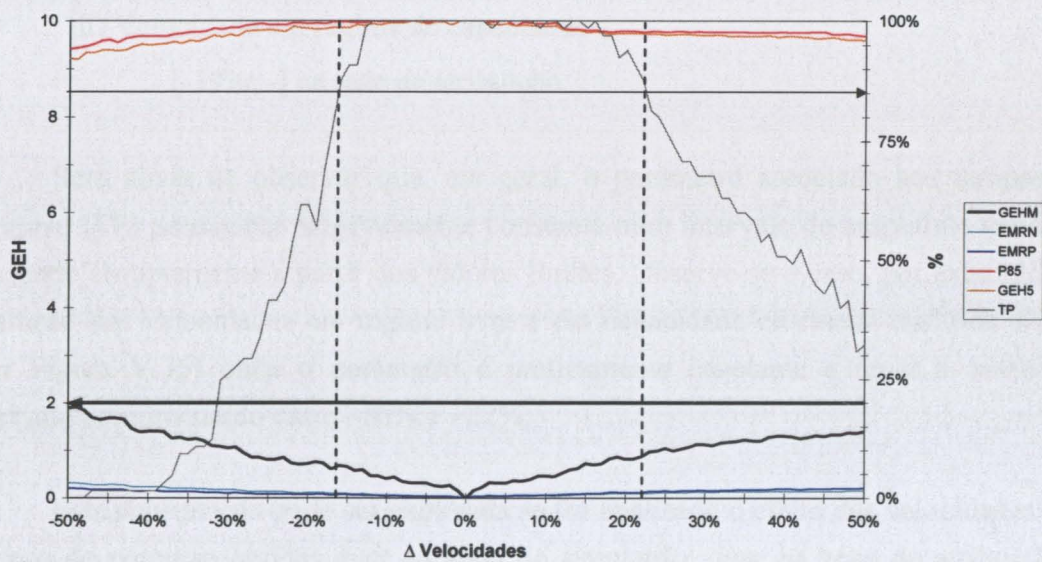


Figura V.36 - Impactos nos valores dos parâmetros em função do erro nas velocidades em regime de capacidade na zona de atribuição

Analisando os resultados obtidos verifica-se mais uma vez não só que a estimação das velocidades tem claramente um impacto maior se o erro aponta para uma subestimação das velocidades como também a importância do parâmetro associado aos tempos de percurso (TP) para o controlo desta variável, uma vez que é este, excepto em duas hipóteses, o responsável pelos limites dos erros “admissíveis”, cujos intervalos se listam seguidamente, sendo mais uma vez de observar que para cada situação simulada o número de erros imposto é distinto:

i) velocidades em regime livre

- [-17%; +28%] em toda a rede;
- [-24%; -] na rede de simulação;
- [-41%; -] em simulação e apenas nos cruzamentos prioritários;
- [-33%; -] em simulação e apenas nos cruzamentos com sinais luminosos;
- [-27%; -] na rede de atribuição.

ii) velocidades em regime livre e de capacidade

- [-16%; +22%] em toda a rede;
- [-19%; +37%] na rede de atribuição.

iii) Velocidade em regime de capacidade

- [-39%; -] na rede de atribuição.

Será ainda de observar que, em geral, o parâmetro associado aos tempos de percurso (TP) permanece sensivelmente constante num intervalo de amplitude variável, descendo abruptamente a partir dos valores limites. Observe-se o caso, por exemplo, da alteração das velocidades em regime livre e em capacidade efectuada em toda a rede (ver Figura V.35) onde o parâmetro é praticamente constante e igual a 100% no intervalo compreendido entre -16% e +22%.

Esta constatação pode ser explicada se for analisado o efeito das velocidades nos tempos de percurso obtidas quer na zona de simulação, quer na zona de atribuição e recordando que parâmetro associado aos tempos de percurso admitir uma variação de $\pm 15\%$ nos valores dos tempos de percurso de referência. Assim, por um lado, tendo em conta que a variação das velocidades em zona de atribuição corresponde aproximadamente à mesma variação com sinal contrário para os tempos de percurso, é

razoável admitir-se que neste caso todos os percursos respeitam a variação limite admissível para variações das velocidades da ordem dos 15%. Por outro lado, em zona de simulação o tempo de percurso é afectado de forma significativa pelos atrasos nos nós, pelo que será necessário efectuar maiores variações nas velocidades para produzir o mesmo efeito nos tempos de percurso. Uma vez que os percursos estão definidos nas duas zonas não é de estranhar os resultados obtidos para os intervalos de variação das velocidades.

Relativamente aos parâmetros relacionados com a comparação dos volumes, observados e modelados, os mesmos apresentam nas análises efectuadas “pequenas” variações, comparativamente com as outras análises, que poderão ser justificados pelo facto de ao se realizar uma alteração ao nível global dos valores das velocidades os percursos adoptados entre os diversos pares Origem-Destino permanecem mais ou menos semelhantes.

Tendo em atenção os limites dos intervalos pode-se dizer que a importância desta variável, velocidade, na zona de simulação também não é das mais relevantes o que, mais uma vez, é justificável face ao facto de na rede de simulação os atrasos devidos às intersecções serem preponderantes e os arcos serem de comprimento “reduzido”. No entanto, esta não relevância associada às velocidades deverá talvez ser confirmada (ou não) através de uma análise em que os parâmetros fossem desagregados, ou seja, calculados independentemente para cada uma das duas zonas, simulação e atribuição, principalmente pelo facto de a velocidade nos arcos ter um maior impacto na zona de atribuição e os parâmetros calculados globalmente atenuarem este efeito.

Relativamente aos parâmetros propostos EMRN e EMRP realce-se o seu comportamento face às alterações efectuadas apresentando apenas pequenas variações que, tal como na variável “capacidade”, tendem a se “anular”, apontando deste modo para erros de modelação.

Por último, refira-se que as considerações anteriores relativas à evolução e comportamento dos parâmetros P85 e GEH5 se mantêm.

4.3.4 Erros ao nível do valor da potência da função volume-velocidade

O último teste realizado incidiu na alteração da potência da função volume-velocidade entre o valor nulo (-100%) e o dobro do seu valor (+100%), em degraus de 1%, nos arcos de atribuição, apresentando-se na figura seguinte os resultados obtidos.

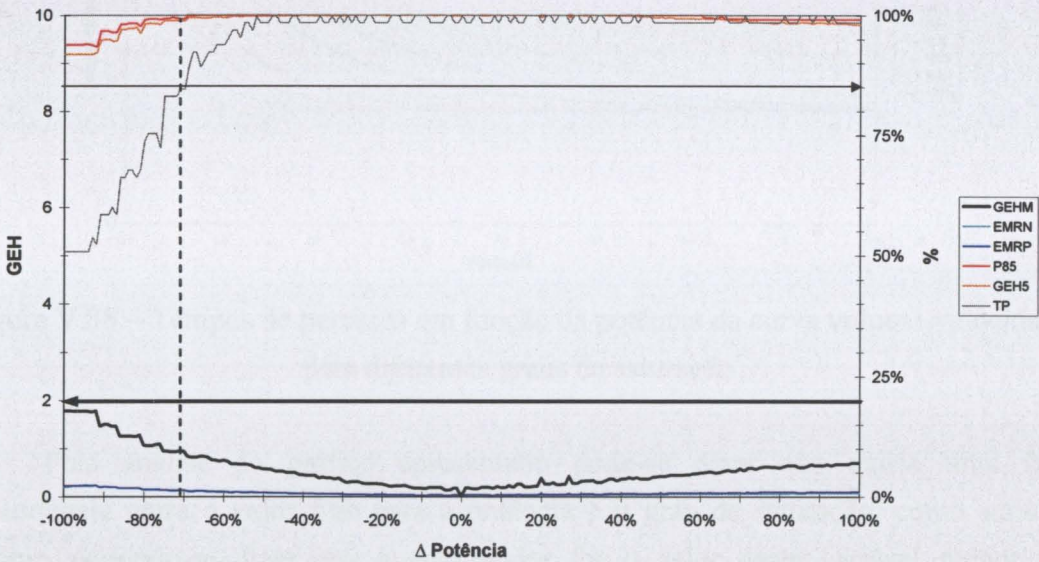


Figura V.37 - Resultados da variação da potência na rede de atribuição

Analisando este gráfico poder-se-ia concluir que a importância desta variável era mínima uma vez que o comportamento dos parâmetros é pouco alterado. Note-se que apenas para valores de variação da potência na ordem dos -50% é que existiria algum impacto, sendo o erro admissível detectado para uma variação de cerca 71% e apontado pelo parâmetro ligado ao tempo de percurso.

De modo a melhor analisar esta questão, nomeadamente a importância do valor da potência na função volume-velocidade, foram calculados os tempos de percurso em função do valor da potência e para diferentes graus de saturação. Considerando uma diferença de tempos de cerca de 10,5 segundos/quilómetro (correspondente a uma diferença de velocidades de 35 Km/h, com base no pressuposto de velocidade em regime livre igual a 50 Km/h e velocidade em capacidade igual a 15 Km/h) obtiveram-se os diferentes valores para os tempos de percurso em função do valor da

potência da curva volume-velocidade e do grau de saturação (razão volume/velocidade), graficamente apresentados na Figura V.38.

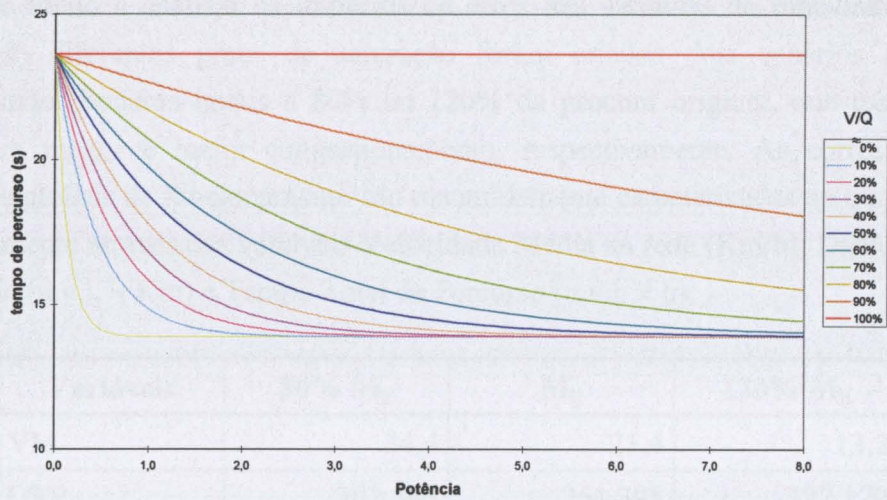


Figura V.38 – Tempos de percurso em função da potência da curva volume-velocidade para diferentes graus de saturação

Pela análise do gráfico apresentado pode-se dizer que existe uma forte dependência entre o valor fixo para a potência e o grau de saturação, como seria de esperar, podendo-se dizer que quanto maior for o valor desta variável menor é a variação das velocidades em função do grau de saturação, podendo-se mesmo afirmar que, no limite, qualquer que fosse o volume do arco a velocidade seria sempre a velocidade livre.

O facto atrás enunciado explica que quando se aumenta o valor da potência o impacto é mínimo, principalmente nos arcos cujo grau de saturação é inferior a 70% ou quando se está em regime de capacidade. No caso contrário, ou seja, quando se diminui o valor da potência face à definição do parâmetro TP (diferença entre observado e modelado menor que 15% ou 1 minuto) e à evolução dos tempos de percursos face ao valor da potência o “erro” só é detectado para uma grande diminuição desta variável.

Por último, refira-se mais uma vez a questão dos parâmetros de aferição serem calculados com base nas observações em toda a rede e a presente variável em análise se apenas reflectir na zona de atribuição.

4.4. Análise de sensibilidade para diferentes graus de congestionamento da rede

De modo a analisar os impactos de erros nas variáveis de funcionamento em redes com diferentes graus de saturação foram criados dois cenários adicionais considerando procuras iguais a 80% ou 120% da procura original, que resultam em redes com menor e maior congestionamento, respectivamente. As correspondentes condições globais de funcionamento são resumidamente caracterizadas no quadro V.10, nomeadamente através das variáveis Velocidade Média na rede (Km/h); Distância Total Percorrida (u.v.l. × Km) e Tempo Total de Percurso (u.v.l. × h).

Variáveis	80% M _{ij}	M _{ij}	120% M _{ij}
VM	34,4	21,4	13,2
DTP	202 543	251 398	327 170
TTP	5 892	11 745	24 868

Quadro V.10 – Caracterização do funcionamento das diferentes “redes”

Para analisar a ligação entre grau de saturação de uma rede e o impacto resultante de erros de quantificação foram realizados os seguintes testes:

- i) variação do intervalo crítico em que foi modificado o valor deste intervalo (3,5 segundos) entre 0,1 segundos e 7,0 segundos, em degraus de 0,1 segundos;
- ii) variação das “capacidades” entre –50% e +50%, em degraus de 1%, em todos os nós de simulação e arcos de atribuição;
- iii) variação das velocidades em regime livre e de capacidade entre –50% e +50%, em degraus de 1%, em toda a rede;
- iv) variação do valor da potência da função volume-velocidade entre o valor nulo (–100%) e o dobro do seu valor (+100%), em degraus de 1%, nos arcos de atribuição;

Os resultados destes testes encontram-se graficamente apresentados nas figuras seguintes (Figura V.39 a V.42), sendo de observar que, por uma questão de legibilidade, não são apresentados os resultados obtidos para a matriz base (ver figuras V.23, V.24, V.35 e V.37. No entanto, verificou-se que os valores obtidos dos diferentes parâmetros

nos testes realizados com a Matriz base se encontravam entre as “curvas” dos parâmetros obtidas para as situações de menor e maior congestionamento, apresentando uma certa linearidade entre as três situações de circulação simuladas.

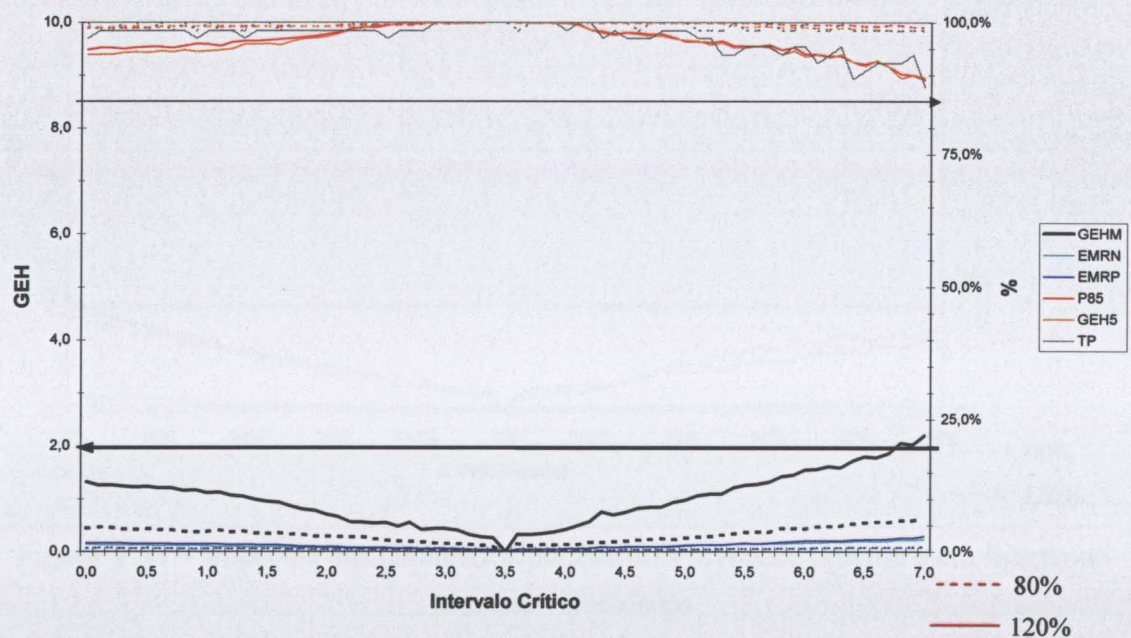


Figura V.39 – Impactos nos parâmetros para os dois níveis de procura e em função do erro no intervalo crítico

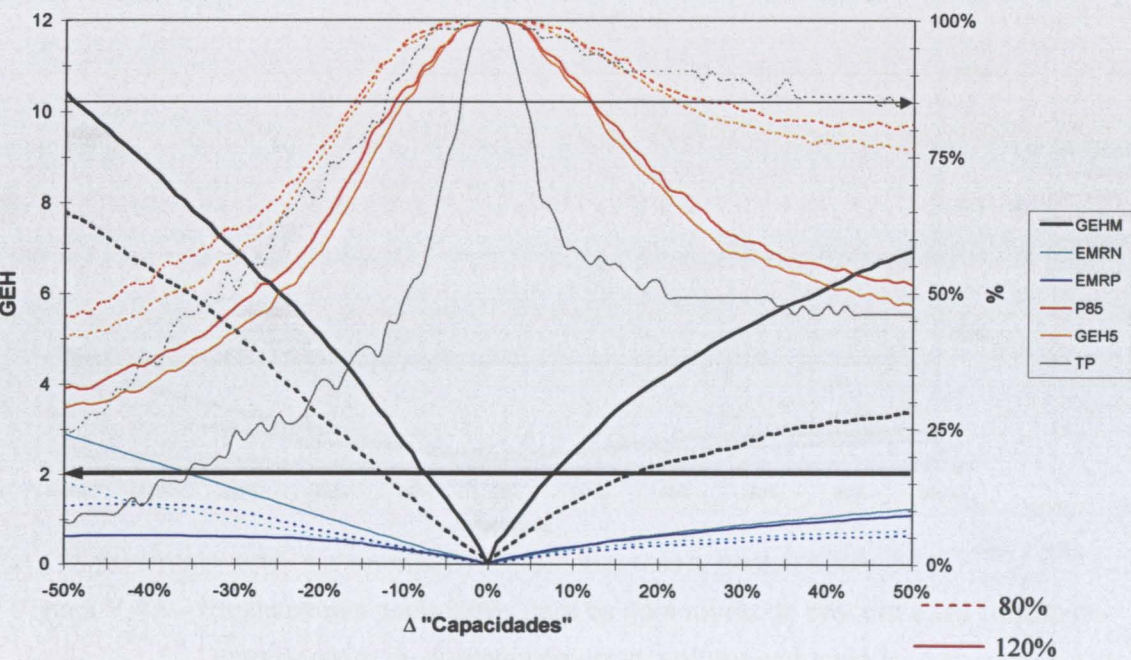


Figura V.40 – Impactos nos parâmetros para os dois níveis de procura e em função do erro nas capacidades

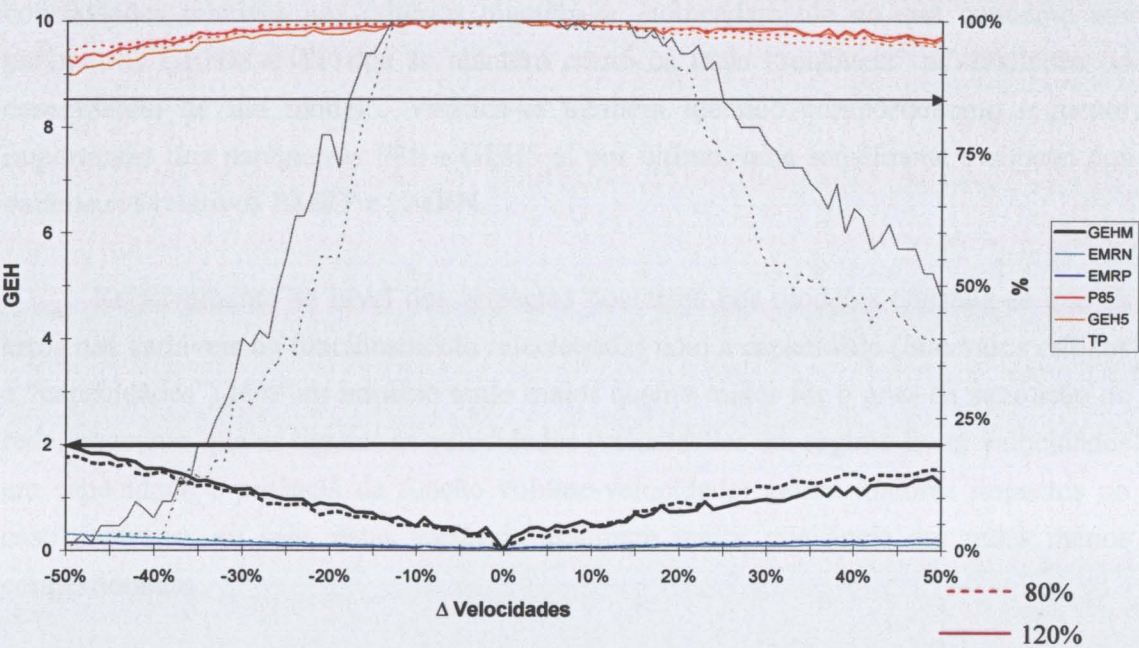


Figura V.41 – Impactos nos parâmetros para os dois níveis de procura e em função do erro nas velocidades

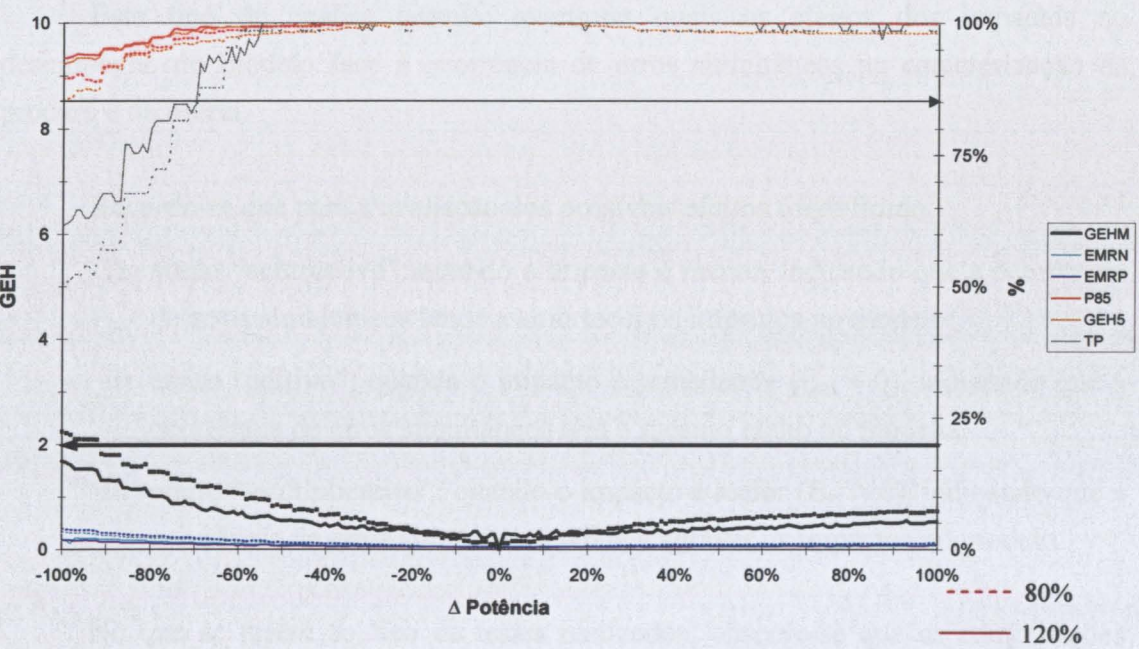


Figura V.42 – Impactos nos parâmetros para os dois níveis de procura e em função do erro no valor da potência da curva volume-velocidade

Pela análise dos gráficos constata-se que para os “modelos” testados as constatações relativas aos critérios mantêm-se, nomeadamente no que concerne aos parâmetros GEHM e TP que se mantêm como os mais “sensíveis” na avaliação do desempenho de um modelo. Verifica-se também idêntico comportamento e menor importância dos parâmetros P85 e GEH5 e, por último, uma semelhante evolução dos parâmetros relativos EMRP e EMRN.

Relativamente ao nível dos impactos dos erros nos modelos constata-se que os erros nas variáveis de funcionamento relacionadas com a capacidade (intervalos críticos e “capacidades”) têm um impacto tanto maior quanto maior for o grau de saturação da rede, enquanto que as ligadas às velocidades (velocidades em regime livre, velocidades em capacidade e potência da função volume-velocidade) geram maiores impactos no caso contrário, ou seja, estas variáveis assumem maior relevância em redes menos congestionadas.

4.5. Análise de sensibilidade face à ocorrência de erros simultâneos

Este tipo de análise permite averiguar quais os efeitos dos impactos no desempenho do modelo face à ocorrência de erros simultâneos na caracterização da procura e da oferta.

Recorde-se que para a avaliação dos possíveis efeitos foi definido:

- i) efeito “subtrativo”: quando o impacto é menor, indicando que a ocorrência de erros simultâneos tende a amortecer os impactos no modelo;
- ii) efeito “aditivo”: quando o impacto é semelhante ($E_{es} \approx 0$), indicando que a ocorrência de erros simultâneos têm o mesmo efeito no modelo;
- iii) efeito “multiplicativo”: quando o impacto é maior ($E_{es} > 0$), indicando que a ocorrência de erros simultâneos tende a agravar os impactos no modelo.

No que se refere ao tipo de testes realizados, observe-se que as combinações possíveis de erros são inúmeras pelo que se optou por apenas analisar os impactos decorrentes de erros globais da matriz conjuntamente com erros de ocorrência sistemática na estimação dos valores para as variáveis de funcionamento que têm maior

impacto, nomeadamente nos valores das “capacidades” ou das velocidades em toda a rede. Assim, foram fixados os seguintes testes:

- i) variação global da matriz de $\pm 5\%$ e alteração das “capacidades” entre -50% e $+50\%$, em degraus de 1% , em todos os nós de simulação e arcos de atribuição;
- ii) variação global da matriz de $\pm 5\%$ e alteração das velocidades em regime livre e de capacidade entre -50% e $+50\%$, em degraus de 1% , em toda a rede.

Os resultados obtidos para estes testes encontram-se graficamente apresentados nas Figuras V.43 e V.44, isolando e identificando a variação em cada um parâmetros de aferição em função do erro introduzido na matriz a nível global e na variável de funcionamento (capacidades ou velocidades).

Analisando os impactos nos parâmetros de aferição verificam-se efeitos idênticos nos parâmetros GEHM e TP, no sentido de os efeitos serem sempre do tipo subtrativo, e nos parâmetros P85 e GEH5 que no caso em que um dos erros é o introduzido na capacidade os efeitos são do tipo subtrativo, quando simultaneamente a capacidade e a procura são subestimadas ou sobrestimadas, e efeitos multiplicativos nos restantes casos testados.

No que concerne aos impactos nos parâmetros EMRP e EMRN verifica-se que os efeitos são “ligeiramente” subtrativos quando existem erros simultâneos na matriz e nas capacidades e aditivos quando a simultaneidade de erros ocorre na matriz e nas velocidades. Observe-se no entanto que quando se faz uma análise conjunta deste dois parâmetros ($|EMRP-EMRN|$) os efeitos são sempre aditivos. Adicionalmente, estes parâmetros analisados conjuntamente permitem de algum modo identificar quer os erros na matriz uma vez que o módulo da sua diferença é muito semelhante ao erro introduzido na matriz ($|EMRP-EMRN| \approx 5\%$)³¹, quer os erros de modelação visto que ambos apresentam valores superiores a zero.

³¹ Observe-se que esta diferença não ocorre a partir de um certo ponto da redução da capacidade, sendo explicável pelo facto de a partir de um determinado valor da capacidade os veículos não serem carregados na rede, passando a diferença entre EMRN e EMRP a ter um valor superior a 5% , como seria de esperar.

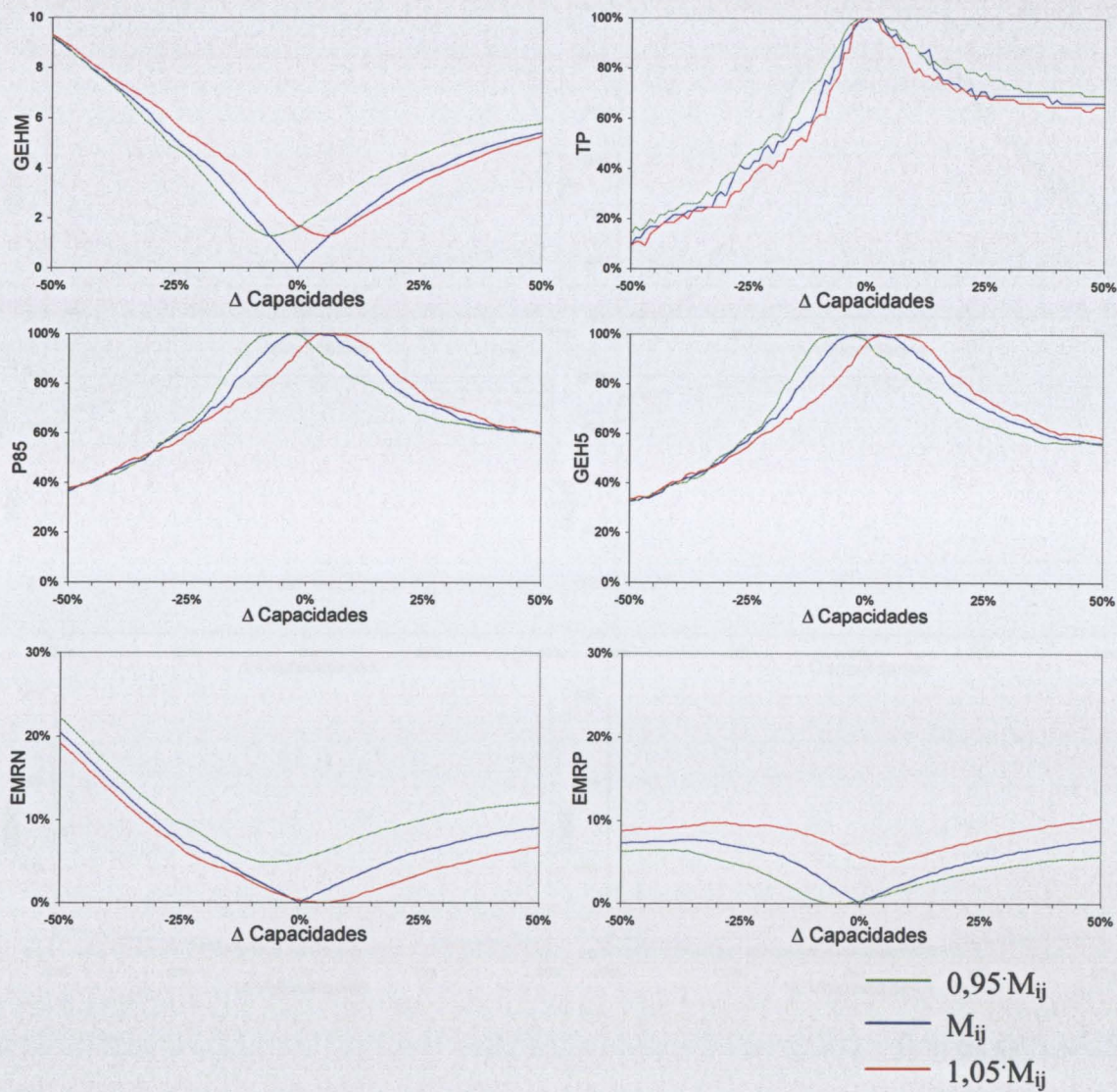


Figura V.43 – Impactos nos valores dos parâmetros em função da ocorrência de erros simultâneos na matriz e nas capacidades

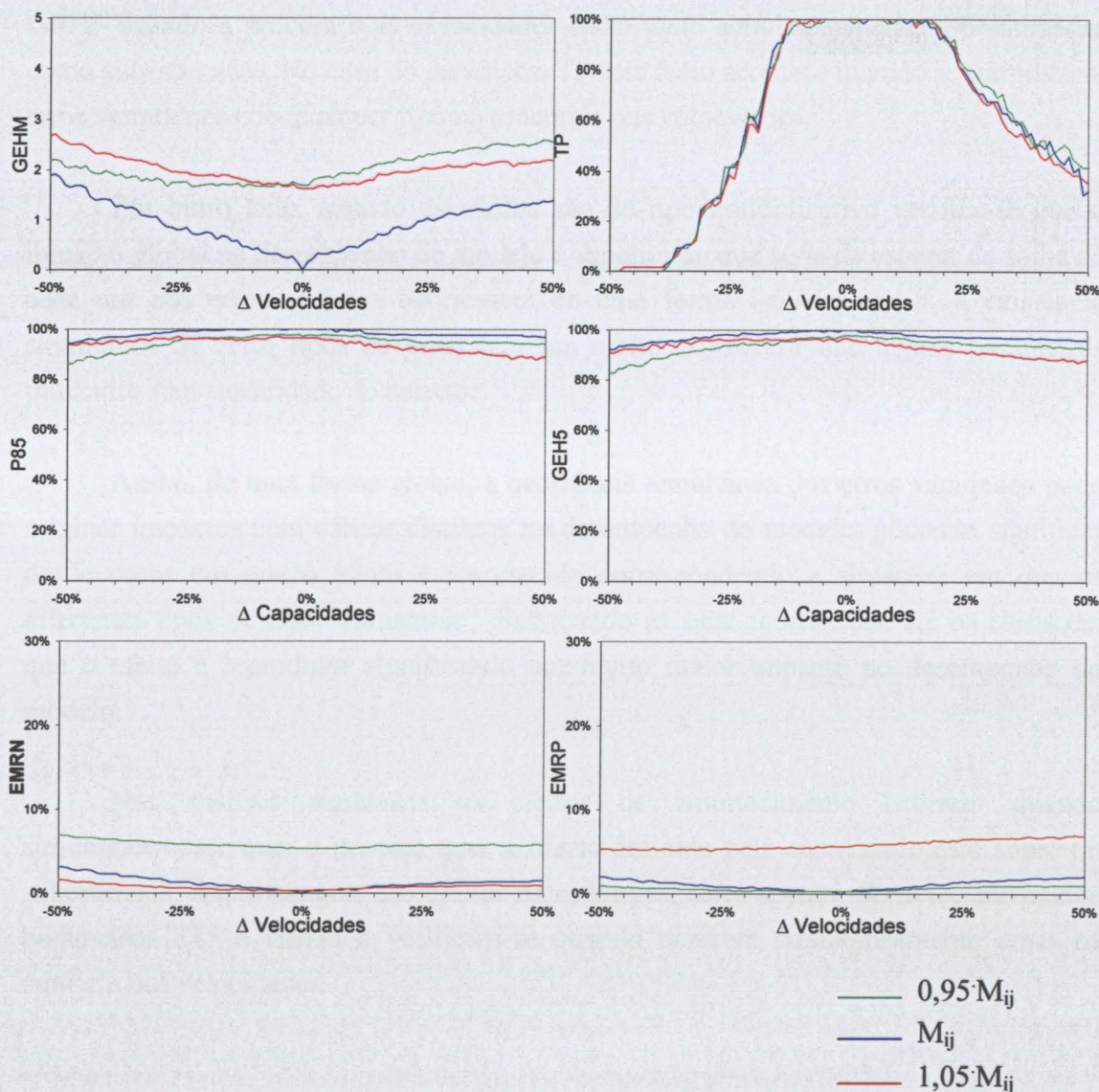


Figura V.44 - Impactos nos valores dos parâmetros em função da ocorrência de erros simultâneos na matriz e nas velocidades

Neste ponto convém salientar que quando ocorrem efeitos subtrativos os mesmos podem resultar num amortecimento do impacto global dos erros no sentido de a simultaneidade da ocorrência de diversos erros implicar um menor impacto no desempenho do modelo do que se só ocorresse um tipo de erro. Assim, nestes casos, existe um “disfarce” do erro, pelo que é necessário ter especial atenção de modo a não se retirarem conclusões erradas sobre o desempenho do modelo.

Este efeito de amortecimento é verificado para os parâmetros GEHM, P85 e GEH5 quando a procura e as capacidades estão tanto simultaneamente sobrestimadas como subestimadas. No caso do parâmetro TP este facto acontece quando se introduzem erros simultâneos de qualquer tipo na procura e nas velocidades.

Por outro lado, quando os efeitos são do tipo multiplicativo verifica-se que o impacto global no desempenho do modelo é superior ao que seria de esperar da soma de cada um dos erros se estes ocorressem de uma forma isolada, isto é, a existência simultânea de certos tipos de erros tem um efeito reprodutor que alguns parâmetros utilizados têm capacidade de detectar.

Assim, de uma forma global, a ocorrência simultânea dos erros simulados pode originar impactos com efeitos distintos no desempenho do modelo, podendo significar desde casos em que o efeito é amortecido correspondendo a situações em que os diferentes tipos de erro “anulam-se” disfarçando as suas ocorrências, até os casos em que o efeito é reprodutor significando um muito maior impacto no desempenho do modelo.

Nas análises simuladas os efeitos de amortecimento ocorrem quando simultaneamente quer a procura quer a oferta definida pela capacidade está sobre ou subestimada. Relativamente aos efeitos reprodutores, estes apenas são detectados pelos parâmetros P85 e GEH5 e verificam-se quando ocorrem simultaneamente erros na matriz e nas velocidades.

5. Principais conclusões da análise de sensibilidade

A aplicação da análise de sensibilidade permite a realização de inúmeras simulações controladas do funcionamento de modelos de afectação, o que permite gerar um vasto conjunto de resultados com o objectivo de se analisar os impactos dos erros no desempenho dos modelos.

Face aos testes efectuados no presente trabalho as conclusões retiradas podem ser agregadas em dois grupos:

- i) conclusões específicas: inerentes ao modelo em causa (modelo SATURN-Porto) mas em que a metodologia preconizada quando realizada *a priori* pode constituir um importante auxiliar na fase de calibração de um qualquer modelo de afectação;
- ii) conclusões globais: passíveis de serem aplicadas a outros modelos, sendo no entanto necessário a validação das mesmas com recurso a outros modelos de redes.

Assim, o primeiro tipo de conclusões apontou fundamentalmente para:

- A. Considerando como válidos os parâmetros e respectivos critérios, verificou-se que uma sobre ou subestimação da procura de apenas 5% conduz a um impacto no desempenho do modelo com consequências na apreciação do funcionamento do modelo, tendo-se constatado que os erros na Matriz quando “localizados” têm um maior impacto. Deste modo, pode-se afirmar que a caracterização da procura é uma tarefa que assume especial relevância no modelo;
- B. Por outro lado, face aos resultados obtidos para os parâmetros de aferição nos testes realizados, em que se pretendeu simular a normal variação temporal da procura, constatou-se que para a rede em causa os critérios de calibração são exigentes, ou seja, apenas a variação da procura de dia para dia pode implicar que os parâmetros atinjam valores muito próximos dos seus limites de calibração.
- C. Será ainda de salientar que a análise efectuada ao nível dos erros localizados quando realizada *a priori* pode constituir um importante auxiliar no processo de construção de uma Matriz Origem-Destino, nomeadamente no que concerne à definição de cordões e *screenlines*.
- D. No que concerne aos resultados apurados ao nível da caracterização das variáveis que condicionam o nível operacional do modelo verificou-se em termos gerais que, se o erro ocorrer de uma forma sistemática em todos os

elementos da rede, a subestimação dos valores destas variáveis tem claramente um maior impacto.

- E. Relativamente à sensibilidade das variáveis, ou seja, aquelas em que o erro provoca um maior impacto no desempenho final do modelo, verificou-se que a variável mais sensível era a “capacidade”. Pelo contrário, também se verificaram impactos mínimos no modelo face a erros na definição quer do valor para o intervalo crítico quer no valor do valor da potência da curva volume-velocidade.
- F. Será ainda de referir a dependência dos valores das variáveis de funcionamento em função do congestionamento da rede, tendo-se constatado uma maior sensibilidade das variáveis relacionadas com a capacidade para as redes com um “maior” congestionamento e das variáveis ligadas à velocidade em redes com “maior” fluidez.
- G. A conjugação de erros tem efeitos distintos, devendo-se ter especial atenção aos efeitos substractivos que se podem repercutir num amortecimento nos impactos do modelo e, conseqüentemente, conduzir a julgamentos errados sobre o seu desempenho global.
- H. Por último saliente-se que face aos resultados obtidos para os diferentes erros simulados a resposta do modelo foi de encontro às expectativas, podendo-se então afirmar sob uma perspectiva racionalista que o modelo utilizado apresenta um bom desempenho.

Deste modo, e generalizando, pode-se concluir que a aplicação de análises de sensibilidades *a priori* constitui uma preciosa ajuda, não só no que concerne à caracterização da procura e da oferta como também do próprio funcionamento do modelo.

No que concerne às conclusões de ordem global, pode-se dizer que são as seguintes:

- A. Os critérios mais restritivos parecem ser os relativos aos parâmetros GEH médio (GEHM) e ao Tempo de percurso (TP), visto que são os valores

destes dois parâmetros que, para todas as alterações realizadas, fixaram os limites de erros “admissíveis”.

Por outro lado, os valores dos parâmetros das diferenças absolutas/relativas entre valores observados e modelados (P85) e da percentagem de arcos com a estatística GEH menor ou igual a cinco (GEH5) são muito semelhantes, sendo o do P85 sempre superior. De um modo geral quando os erros ocorrem nas capacidades ou nas velocidades os parâmetros críticos tendem a ser o GEHM ou o TP, respectivamente.

No entanto, os únicos parâmetros a detectar o efeito multiplicativo de erros simultâneos, em certos casos, são o P85 ou o GEH5.

⇒ Assim, poder-se-á questionar a utilização destes dois parâmetros, P85 e GEH5, na avaliação global do desempenho do modelo, mas embora a sua índole menos restritiva recomenda-se a utilização do GEH5 pelo facto de identificar os efeitos reprodutores de erros simultâneos.

B. Analisando conjuntamente os parâmetros relativos às diferenças totais relativas negativas (EMRN) e positivas (EMRP), entre valores observados e modelados, poder-se-á dizer que os mesmos se “anulam” quando a alteração é realizada nas variáveis de funcionamento³². Tal não se verifica quando as alterações são realizadas na Matriz, onde estes têm um comportamento semelhante ao erro introduzido, ou seja, se o número de viagens decresce o parâmetro EMRN aumenta mantendo-se o parâmetro EMRP próximo de zero, acontecendo o inverso quando se adicionam viagens à Matriz, nomeadamente o parâmetro EMRP aumenta e o parâmetro EMRN também se mantém próximo do valor nulo.

Por outro lado, realce-se o comportamento destes dois parâmetros quando se simulou a ocorrência de erros simultâneos em duas “variáveis” em que os presentes parâmetros foram os únicos que, não só em todos os casos testados apontaram o efeito “aditivo” dos erros, como constituíam uma bom indicador no sentido de apontarem a existência quer de erros na descrição da procura quer da caracterização da oferta

³² Será de observar que nos testes realizados para as alterações de capacidades, quando a redução da capacidade é significativa estes parâmetros não apresentam valores idênticos. No entanto este facto pode ser explicável por haver uma maior retenção de veículos a “montante” face aos mesmos não conseguirem “entrar” na rede.

⇒ Face ao exposto, a análise conjunta destes dois parâmetros constitui um importante auxiliar no sentido de identificar erros inerentes à Matriz, ou seja, permite de algum modo concluir que o erro, caso exista, se encontra na caracterização da procura e/ou da oferta. Assim, é de parecer que a utilização destes dois parâmetros na avaliação do desempenho de um modelo traz aspectos inovadores no sentido de apontar o “erro” pelo que a sua utilização é recomendada.

C. Quando se realizam alterações a partes específicas da rede os erros “admissíveis” são francamente superiores. No entanto, tal pode ser função do nível de importância da variável ou de os impactos serem atenuados em virtude de o cálculo dos parâmetros ser calculado em termos globais.

⇒ Deste modo, pode-se confirmar que o cálculo dos parâmetros deve ser desagregado por zonas tipo, por áreas geográficas e por tipos de vias.

VI. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

1. Síntese Geral e Principais Conclusões

Os modelos de afectação de tráfego são, actualmente, fundamentais no planeamento, projecto e gestão de redes rodoviárias urbanas, podendo-se dizer que, cada vez mais, irão constituir uma ferramenta indispensável, face às suas capacidades de previsão, na denominada Gestão Integrada de Transportes.

A relevância destes modelos também pode ser reforçada pelo facto de constituírem uma importante ajuda no processo de tomada de decisão, na medida em que conseguem fornecer bastante informação de uma forma sistemática e reproduzível, o que permite a comparação *a priori* de diversos cenários alternativos sem ser necessário implementá-los.

Deste modo, a aplicação de modelos de afectação de tráfego traz significantes vantagens como uma ferramenta de avaliação, embora não se possa esquecer algumas das suas desvantagens. Entre as principais vantagens destacam-se as seguintes:

- fornece um meio para a abordagem de problemas complexos decorrentes das muitas inter-relações existentes e da variabilidade de um sistema rodoviário;
- permite a análise de problemas específicos em condições de “experiência” controlada;
- promove a livre experimentação sem a necessidade de implementação;
- evita eventuais riscos inerentes a uma falha implícita a qualquer experiência real, incluindo em particular a geração de condições operacionais ineficientes e/ou inseguras;
- permite análises mais rápidas, mais flexíveis e de menor custo.

No que se refere às desvantagens, importa salientar os seguintes aspectos:

- qualquer que seja o modelo utilizado, por mais complexo que seja, o mesmo é, essencialmente, uma simplificação do sistema real;
- o desenvolvimento de um modelo (construção, calibração e validação) é um processo bastante complexo, necessitando, para além dos critérios objectivos, de alguma subjectividade com base no conhecimento local do funcionamento de uma rede;
- envolve um grande número de variáveis que é necessário estimar;
- a aplicação de modelos necessita de um envolvimento significativo de meios, materiais e humanos, designadamente de técnicos especializados para serem utilizados com rigor adequado

Assim, justifica-se que o processo de desenvolvimento de modelos necessita de um maior dispêndio de esforço, principalmente na fases de calibração, após a qual passa a ser possível definir de uma forma clara a aplicabilidade do modelo no que concerne à sua capacidade em reproduzir a realidade, bem como a determinação das estimativas das variáveis de tráfego fornecidas pelo modelo para a definição de soluções no âmbito da Engenharia de Tráfego.

Por outro lado, face à complexidade das redes urbanas não só no que se refere à sua dimensão como à grande interacção existente entre as muitas variáveis deste sistema, necessárias para o representar, torna-se fundamental o conhecimento da importância de cada uma de forma a otimizar o processo de construção e calibração do modelo.

Face ao exposto a principal linha de investigação consistiu na definição de uma metodologia que permita, de uma forma sistemática e controlada, simular diversos tipos de erros e aferir os respectivos impactos no desempenho de um modelo, com o objectivo de “otimizar” a fase de calibração, nomeadamente no que concerne à identificação dos parâmetros de aferição do desempenho como também à qualidade dos valores das variáveis necessárias para a aplicação do modelo.

A metodologia desenvolvida e aplicada assenta na realização de análises de sensibilidade às diversas variáveis do modelo, tanto das que descrevem a procura como as que caracterizam a oferta, análises estas que se pretende incluir no processo de

desenvolvimento de modelos, nomeadamente na fase de calibração, tal como se representa no diagrama da figura seguinte.

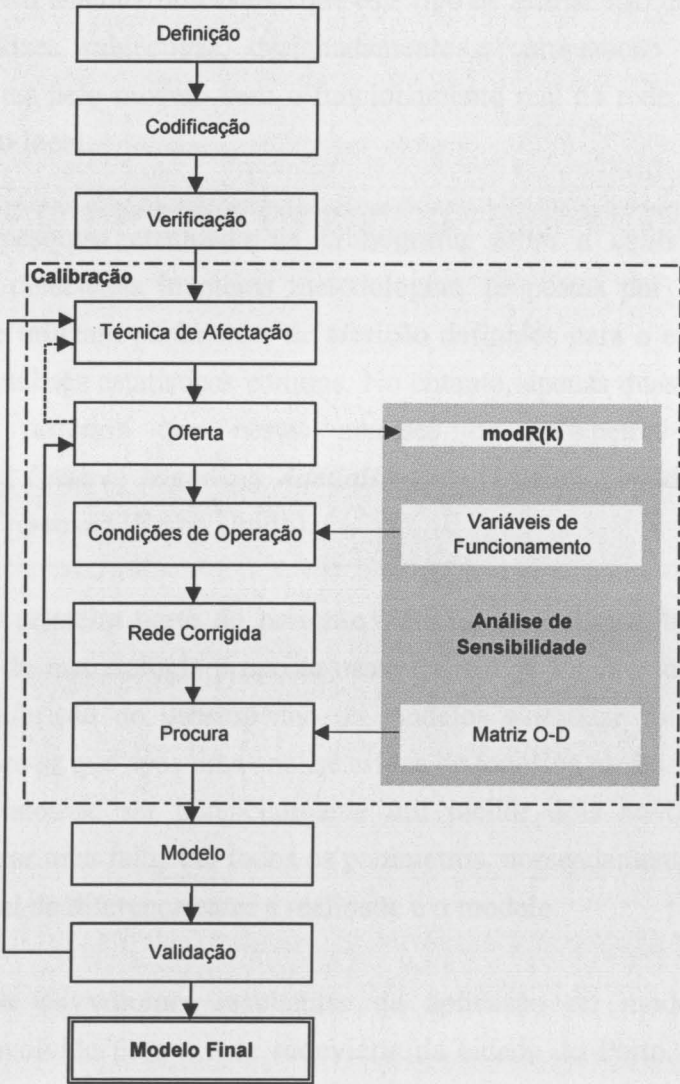


Figura VI.1 – Análise de sensibilidade no processo de calibração

A avaliação dos impactos no desempenho dos modelos face aos diversos tipos de erros parte do pressuposto da existência de um modelo de referência que caracteriza de forma rigorosa um estado particular de um sistema virtual representativo da “realidade”. Com base neste pressuposto é então possível introduzir-se de forma sistemática e estruturada um conjunto de erros no modelo gerando-se novos modelos e respectivos conjuntos de resultados sendo, com base no sistema virtual, possível avaliar o impacto destes erros no desempenho dos modelos, através do cálculo dos diferentes parâmetros de aferição do desempenho.

Refira-se que estes parâmetros assumem um papel fundamental na medida em que, ao se estabelecerem critérios para os mesmos, procura-se que esta análise se torne mais objectiva. No entanto, observe-se que este tipo de análise não deve comprometer o recurso às análises subjectivas, designadamente a comparação das condições de operação previstas pelo modelo com o funcionamento real da rede, conhecido através do conhecimento local.

Face à pesquisa efectuada na bibliografia sobre a calibração/validação de modelos foram detectadas inúmeras metodologias, propostas por diversos autores e instituições, que utilizam parâmetros de aferição definidos para o efeito ou através da realização das análises estatísticas comuns. No entanto, apenas duas instituições fazem referência aos critérios que nestas análises os parâmetros devem cumprir, nomeadamente a *Federal Highways Administration* (Estados Unidos da América) e o *Department of Transport* (Reino Unido).

Assim, a primeira parte do presente trabalho teve como objectivo principal a calibração base da metodologia proposta neste trabalho e incidiu sobre a selecção dos parâmetros de aferição do desempenho de modelos a utilizar para a avaliação dos impactos. Saliente-se que após uma análise crítica de todos os parâmetros correntemente utilizados, constatou-se ser potencialmente útil incluir dois novos parâmetros que permitem colmatar uma falha em todos os parâmetros, nomeadamente a questão da não indicação do sinal da diferença entre a realidade e o modelo.

Utilizando os volumes resultantes da aplicação do modelo de referência SATURN desenvolvido para a rede rodoviária da cidade do Porto, foi realizada uma análise de todos os parâmetros de aferição com base em volumes gerados nos arcos da rede tentando simular as normais flutuações temporárias da procura. Este tipo de análise permite calcular um conjunto de valores para os diferentes parâmetros, simulando assim uma possível amplitude de variação e, conseqüentemente, realizar quer uma análise crítica dos parâmetros quer uma validação dos valores fixados para os respectivos critérios.

Com base nesta análise foi possível concluir que a utilização isolada das análises estatísticas preconizadas em diversos estudos pode conduzir a conclusões pouco rigorosas sobre a fiabilidade do modelo. De igual modo, pode-se também afirmar que

alguns parâmetros apresentam problemas na fixação de critérios universais, face à alta gama de variação detectada (arcos de baixa *versus* alta capacidade), e que os valores de certos critérios deverão eventualmente ser relaxados, na medida em que as normais variações de tráfego de dia para dia são suficientes para que o valor limite do critério seja ultrapassado.

Por outro lado, verificou-se que os parâmetros recomendados pelo Departamento de Transporte do Reino Unido (GEHM, P85 e GEH5) parecem ser entre os propostos na bibliografia consultada os que isoladamente melhor avaliam a qualidade do desempenho dos modelos. Igualmente se verificou que a análise com recurso aos parâmetros relativos deve ser preferencialmente realizada através da separação das diferenças positivas e negativas, de modo a identificar o sinal do erro, pelo que a utilização dos parâmetros propostos no presente trabalho (EMRP e EMRN) pode trazer inúmeras vantagens na avaliação do desempenho de modelos.

No entanto, considera-se que a identificação totalmente conclusiva dos parâmetros mais relevantes necessita de uma análise mais exaustiva, designadamente através da separação e agregação dos arcos por classes e por áreas geográficas, bem como através do recurso a valores observados reais, hoje em dia de mais fácil obtenção face à existência de postos de contagem automática presentes em qualquer Sistema Centralizado de Controlo de Tráfego.

Após esta primeira análise preliminar e de forma a não apenas testar a aplicabilidade da metodologia desenvolvida, mas também identificar alguns dos principais “padrões” de susceptibilidade dos modelos de afectação aos erros de quantificação, foram analisados os impactos não só dos diferentes tipos de erros que podem ocorrer na definição da matriz Origem-Destino bem como a imprecisão na quantificação das variáveis de funcionamento que descrevem as condições de operação de uma rede. Esta análise foi aplicada na rede real modelada da cidade do Porto, com recurso ao programa SATURN, tendo sido realizadas um elevado número de corridas de uma forma sistemática.

Deste processo, obtiveram-se inúmeros resultados que, de algum modo, validam a utilidade da metodologia para o desenvolvimento de modelos de afectação de tráfego, designadamente na fase de calibração. Por outro lado, os resultados obtidos nas análises efectuadas também apontam para o bom desempenho dos parâmetros de aferição

propostos bem como indicam que alguns dos parâmetros propostos e testados não têm qualquer contribuição.

Finalmente, foi identificado um conjunto de “padrões” de impactos dos erros de quantificação. Em função dos resultados obtidos, observando-se que as análises efectuadas não esgotaram todas as hipóteses de erros que podem ocorrer, salientam-se os seguintes pontos:

- a caracterização da procura é uma tarefa com especial relevância no modelo uma vez que uma variação global de 7% na matriz tem impactos no modelo que conduzem à sua não aceitabilidade, tornando-se este facto mais sensível se o erro for concentrado;
- confirmou-se que a rigidez dos critérios de calibração não acompanha as flutuações de tráfego ocorridas de dia para dia;
- de um modo geral os erros por defeito na caracterização operacional da rede têm um maior impacto no desempenho do modelo comparativamente aos erros por excesso;
- entre os erros de ocorrência sistemática simulados das variáveis que fixam as condições operacionais da rede, identificou-se ser a “capacidade” a variável mais sensível seguida das “velocidades”, admitindo erros de variação compreendidos nos intervalos [-5%; +11%] e [-16%; +22%], respectivamente;
- pelo contrário, os erros relativos ao intervalo crítico e ao valor da potência são os que se apresentam com menor impacto, tendo-se mesmo denotado a sua não influência na aceitabilidade de um modelo;
- os erros na “oferta” quando localizados têm menores impactos, como seria de esperar, uma vez que apenas se realizou uma avaliação ao nível do desempenho global do modelo;
- verificou-se ainda que em redes saturadas são as variáveis relacionadas com a capacidade que têm uma maior sensibilidade aos volumes de tráfego presentes, enquanto que nas redes fluídas esta sensibilidade é mais forte para as variáveis ligadas à velocidade;
- a consideração simultânea de erros pode ter impactos de diferente natureza, umas vezes anulando-se os seus efeitos, camuflando as

suas existências, ou, pelo contrário, apresentando um efeito reprodutivo em que o todo é maior que a soma das partes.

Deste modo, face aos resultados apurados nas diversas análises realizadas destacam-se dois tipos de conclusões. As do primeiro tipo são específicas, ou seja, inerentes ao modelo de referência utilizado (modelo SATURN-Porto) sendo de realçar que as mesmas comprovam os benefícios da metodologia preconizada no sentido de quando realizada *a priori* e integrada no processo de construção de um modelo, poder constituir um importante auxiliar. Assim, a realização de análises de sensibilidade não só permite sustentar e definir acções a desenvolver na fase de calibração de um qualquer modelo de afectação, no que concerne à caracterização da procura e da oferta, como também constitui um importante suporte para a avaliação do desempenho do modelo. Dentro destes aspectos e face aos resultados apurados destaca-se:

A. Procura

- ⇒ Identificação das diferentes sensibilidades das zonas;
- ⇒ Definição de cordões e/ou *screenlines* nomeadamente no que se refere à agregação de zonas;

B. Oferta

- ⇒ Identificação das variáveis de funcionamento que mais influenciam o nível de desempenho do modelo
- ⇒ Identificação da sensibilidade dos valores das variáveis de funcionamento em função do congestionamento da rede

C. Modelo

- ⇒ Identificação das relações entre erros e desempenho do modelo
- ⇒ Validação dos critérios dos parâmetros de aferição do desempenho do modelo
- ⇒ Análise crítica do funcionamento do modelo de afectação em função dos erros introduzidos.

As conclusões do segundo tipo foram definidas como globais no sentido de serem generalizáveis a outros modelos. Estas conclusões resumem-se a:

- A.** De um modo geral quando os erros ocorrem nas capacidades ou nas velocidades os parâmetros críticos tendem a ser o GEHM ou o TP, respectivamente.

- B. Os parâmetros P85 e GEH5 têm comportamentos muito idênticos, podendo questionar-se a sua utilização conjunta na avaliação global do desempenho do modelo.
- C. A análise conjunta dos parâmetros relativos às diferenças totais relativas negativas (EMRN) e positivas (EMRP) permite identificar e isolar os erros relativos à Matriz, ou seja, concluir-se que o erro, caso exista, se encontra na caracterização da procura e/ou da oferta.
- D. O cálculo dos parâmetros deve ser desagregado por zonas tipo ou áreas geográficas ou tipos de vias de forma a que o efeito dos erros não seja atenuado.
- E. Embora apenas se tenha efectuada uma breve abordagem, a análise realizada realçou que as estimativas dos parâmetros calculados com base nas amostras geradas são dependentes do grau de erro do modelo, designadamente erros maiores na procura provocam uma maior dispersão nas estimativas do parâmetro GEHM para iguais tamanhos de amostras, sendo no entanto interessante o facto de se ter denotado que o coeficiente de variação tende a manter-se inalterado.

No entanto, salienta-se que estes resultados devem também ser sustentados com base em outras redes e modelos. Tal facto não foi possível no presente trabalho de investigação devido, por um lado, à dimensão da tarefa em construir um novo modelo e, por outro, às dificuldades na obtenção de uma rede real já modelada.

2. Desenvolvimentos do Estudo

O primeiro passo para contribuir para a fundamentação do presente trabalho deverá ser no sentido da validação dos resultados obtidos não só no que se refere a diferentes tipos de modelos como também a diferentes tipos de redes quer no concerne à procura, com diferentes graus de congestionamento, quer no tipo de estrutura viária (por exemplo, redes hierarquizadas *versus* não hierarquizadas, redes com muitas opções de percursos *versus* algumas ou poucas).

Por outro lado, deverão ser desenvolvidos outros tipos de análises no sentido de avaliar os impactos de erros que não foram testados no presente trabalho, designadamente a ocorrência de erros aleatórios da definição dos valores das variáveis de funcionamento. Igualmente, deverão também ser simuladas e analisadas outras combinações de erros simultâneos.

Relativamente à avaliação dos impactos das diversas fontes de erro deverá também ser realizada uma análise desagregando o cálculo dos diversos parâmetros de aferição, designadamente por classes de vias e por zonas geográficas, bem como investigado o fenómeno de “amortecimento” nos impactos devido à ocorrência de erros “localizados” estudando o fenómeno da sua degradação.

No decorrer do desenvolvimento deste estudo foi detectado um hiato com grande importância na avaliação do desempenho de modelos ligado à aferição do comportamento da rede através da análise de amostras com as quais se pretende caracterizar a rede modelada. Neste campo existe uma grande ambiguidade na definição de amostras a utilizar tanto no que se refere à sua dimensão como na sua caracterização.

De facto, no processo de avaliação de um modelo nada é referido quanto ao número e tipo de secções reais a incluir para o cálculo dos diversos parâmetros relacionados com os volumes de tráfego, nem existe nenhuma referência quanto ao número, tipo e extensão dos percursos a definir para a determinação dos parâmetros associados aos tempos de percurso.

Deste modo, futuras investigações deverão ir ao encontro deste problema. Neste campo, foi já desenvolvido algum trabalho, mas que deverá ser bastante aprofundado, em que se aplicou a metodologia preconizada mas como o intuito de geração de distintos cenários do desempenho de uma rede virtual. Com base nestes cenários foi possível gerar vários conjuntos, com uma dada dimensão, contendo os valores dos volumes de tráfego para os diferentes “locais de observação” seleccionados aleatoriamente³³.

³³ Será de observar que a selecção dos “locais de observação” não deve ser totalmente aleatória mas deve obedecer a certas regras principalmente para se ter uma representatividade global da rede e não se correr o risco de se concentrar estes locais numa dada zona ou em vias de um certo tipo.



REFERÊNCIAS

- Aitken, A. P. (1973); *Assessing systematic errors in rainfall-runoff models*, Journal of Hydrology, Vol. 20, pp 121-136
- Allsop, R. E. (1974); *Some possibilities for using traffic control to influence trip distribution and Route Choice*, Proceedings of the 6th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Sydney, pp 345-372
- APAS (1996); *Modelling of urban transport*, APAS Urban 2 Modelling Project, The Transport Directorate (DGVII) of the European Commission
- Banks, J., Carson II, J. S., Nelson, B. L. (1996); *Discrete-event system simulation*, Prentice-Hall International Edition
- Barton-Aschman Associates Inc. & Cambridge Systematics Inc. (1997); *Model validation and reasonableness checking manual*, Travel Model Improvement Program, FHWA-Federal Highway Administration.
- Beckman, M., McGuire, C. B., Winsten, C. (1956); *Studies in the economics of transportation*, Cowles Commission Monograph, Yale University Press
- Bell, M. G. H., Iida, Y. (1997); *Transportation network analysis*, Wiley, Chichester
- Bovy, P. (1994); *Travel time errors in shortest path predictions and all-or-nothing assignments: theoretical analysis and simulation findings*, Memorandum n° 2, Delft University of Technology, Department of Architecture, Institute for Town Planning Research
- Bovy, P., Jansen, G (1983); *An evaluation of traffic assignment predictions using choice analysis and error decomposition*, Proceedings of PTRC Summer Annual Meeting, Brighton, pp 101-113
- Branston, D. (1976); *Link capacity functions: A review*, Transportation Research, Vol. 10, pp 223-236

- Burrel, J. E. (1968); *Multiple road assignment and its application to capacity restraint*, Proceedings of the 4th International Symposium on the Theory of Traffic Flow
- Carvalho, M. S. (1996); *Algorithms for improving the convergence of trip matrix estimation and assignment models*, PhD Thesis, Institute for Transport Studies, University of Leeds
- Cascetta, E., Nguyen, S. (1988); *A unified framework for estimating or updating origin/destination matrices from traffic counts*, Transportation Research, Vol. 22B (6), pp 437-455
- Clark, S. D., Watling, D. P. (2002); *Sensitivity analysis of the probit-based stochastic user equilibrium assignment model*, Transportation Research, Vol. 36B, pp 617-635
- Costa, A. H. P. (1987); *Cruzamentos regulados por sinais luminosos*, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- Daganzo, C. F. (1980); *Optimal sampling strategies for statistical models with discrete dependent variables*, Transportation Science, Vol. 14 (4), pp 324-345
- Daganzo, C. F. (1977); *On the traffic assignment problem with flow dependent costs – I e II*, Transportation Research, Vol. 11, pp 433-441
- Dial, R. B. (1971); *A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration*, Transportation Research, Vol. 5B, pp 83-111
- Easa, S. M (2002); *Calibrating simulation models for advanced traveler information systems/advanced traffic management system applications*, Journal of Transportation Engineering, January/February, pp80-88
- Easa, S. M. (1991); *Traffic assignment in practice: Overview and guidelines for users*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 117 (6), pp 602-623
- El-Mously, Z. (1994); *A systematic approach to the calibration of traffic assignment models*, PhD Thesis in City and Regional Planning, University of Pennsylvania

ESTRAUS (1989); Estudio estratégico de transporte del Gran Santiago, Informe Final a la Secretaría Ejecutiva de la Comisión de Transporte Urbano, Consorcio SIGDO-KOPPERS/CIS

FHWA-Federal Highway Administration (1992); *Section 187 VMT Forecasting and Tracking Guidance*, US Department of Transportation

FHWA-Federal Highway Administration (1990); *Calibrating and Adjustment of System Planning Models*, US Department of Transportation

FHWA-Federal Highway Administration (1985); *Traffic Monitoring Guide*, US Department of Transportation

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

FHWA-Federal Highway Administration (1980); *Guide to Urban Traffic Volume Counting*, US Department of Transportation

Figueiredo, I., Jesus, I., Machado, J.A. (2002); *Sistemas Inteligentes de Transporte*, Revista Ingeniería, 2ª Série (71), pp 84-92

Fisk, C. S. (1989); *Trip matrix estimation from traffic counts: the congested network case*, Transportation Research, Vol. 23B (5), pp 331-336

Fisk, C. S. (1988); *On combining maximum entropy trip matrix estimation with user optimal assignment*, Transportation Research, Vol. 22B (1), pp 69-79

Florian, M. Chen, Y. (1992); A coordinate descent method for the bilevel O-D matrix adjustment problem, Publication n° 807, Centre des Recherches sur les transport, Université Montréal

Frank, M., Wolfe, P (1956); *An algorithm for quadratic programming*, Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 3, pp 95-110

Guimarães, R. C., (1999); *Estatística*, McGraw-Hill Portugal

- Heydecker, B. G., Verlander, N. Q., Bolland, J.D., Arezky, Y. (1995); *Improved matrix estimation under congested conditions*, Traffic Engineering & Control, Vol. 35, pp 665-672
- HMSO-Her Majesty's Stationery Office (1999); *Traffic modeling in NESAs*, Design Manual for Roads and Bridges, The NESAs Manual, Vol. 15, Section 1, Part 5
- 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
- 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
- Horowitz, J. L. (1981); *Applied discrete choice modeling - Sampling error, specification and data errors in probabilistic discrete choice models*, Croom Helm, London
- IEEE-Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (1991); *IEEE Standard Computer Dictionary*
- JHK Associates, Dowling Associates (1992); *Travel Forecasting Guidelines*, California Department of Transportation in cooperation with Federal Highway Department, US Department of Transportation
- Kaman Sciences Corporation (1996); *TSIS User's Guide. Version 4.0 Beta*, FHWA-Federal Highway Administration
- Leurent, F. (1998); *Sensitivity and error analysis of the dual criteria traffic assignment model*, Transportation Research, Vol. 32B (3), pp189-204
- Maher, M. J. (1992); *SAM – A stochastic assignment model*, Proceedings IMA conference on Transport Planning Theory and Control
- Maher, M. J. (1983); *Inferences on trip matrices from observations on link volumes: a Bayesian statistical approach*, Transportation Research, Vol. 17B (6), pp 435-477

McNeil, S., Hendriksen, C. (1985); *A note on alternative matrix entry estimation techniques*, Transportation Research, Vo. 19B, pp 509-519

MUSIC (1999); *MUSIC Final Consolidated Report*, MUSIC Project, Transport RTD Programme of the 4th Framework Research and Technological Development, European Union project number UR-95-SC-173

MUSIC (1998); *MUSIC Handbook*, MUSIC Project, Transport RTD Programme of the 4th Framework Research and Technological Development, European Union project number UR-95-SC-173

MUSIC (1995), *The MUSIC Project: MUSIC Project, Technical Annex*, Transport RTD Programme of the 4th Framework Research and Technological Development, European Union project number UP-95-SC-173

NCHRP-National Cooperative Highway Research Program (1997); *Planning Techniques to estimate speeds and service volumes for planning applications*, Report 387, Transportation Research Board

Oh, J. (1991); *Estimation of trip matrices in networks with equilibrium link flows*, Proceedings 17th PTRC Summer Annual Meeting, University of Sussex

Ortuzar, J. D., Willumsen, L. G. (1990); *Modelling Transport*, John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex

Outram, V. E., Thompson, E. (1978); *Driver perceived cost in route choice*, Proceedings 6th PTRC Summer Annual Meeting, University of Warwick

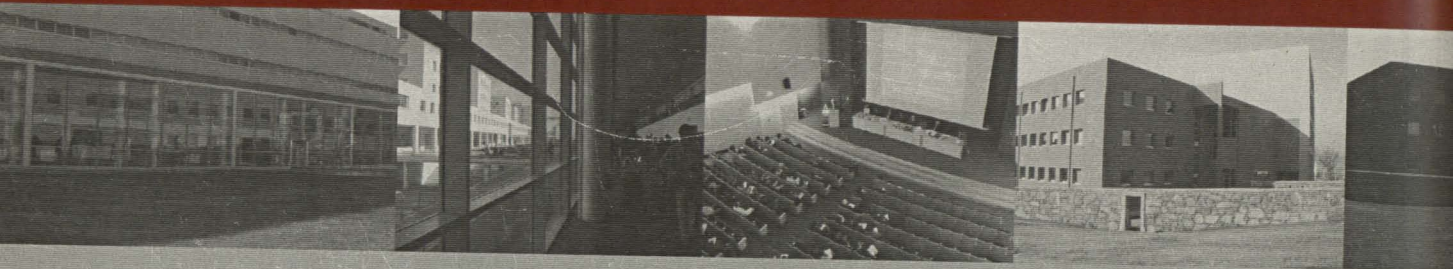
Outram, V. E., Thompson, E. (1977); *Driver route choice-behavioural and motivational studies*, Proceedings 5th PTRC Summer Annual Meeting, University of Warwick

Owen, L. E. et al (1996); *A Compendium of Traffic Model Validation Documentation and Recommendations*, Kaman Sciences Corporation, US Department of Transportation, FHWA - Federal Highway Administration

- Papageorgiou, M. (1997); *Short Course on Dynamic Traffic Flow Modelling and Control*, Apontamentos Didácticos, Dynamic Systems and Simulation Laboratory, Technical University of Crete
- Pindyck, R., Rubinfeld, D. (1981); *Econometric Models and Economic Forecasts*, McGraw-Hill Book Company
- Robbins, J. (1978); *Mathematical modelling – the error of our ways*, Traffic Engineering and Control, Vol. 18 (1), pp 32-37
- Robertson, D. I. (1974); *Cyclic flow profiles*, Traffic Engineering and Control, Vol. 15, pp 640-641
- Sheffi, Y (1985); *Urban transportation networks*, Prentice Hall, Englewood Cliffs
- Sheffi, Y., Powell, W. (1982); *An algorithm for the equilibrium assignment with random link times*, Networks, Vol. 12, pp191-207
- Sheffi, Y., Powell, W (1981); *A comparison of stochastic traffic assignment over transportation networks*, Transportation Research, Vol. 15B, pp 53-64
- SMARTTEST (2000); *SMARTTEST Final Report*, SMARTTEST Project, Transport RTD Programme of the 4th Framework Research and Technological Development, European Union project number RO-97-SC.1059
- Spiess, H. (1990); *A gradient approach for the OD matrix adjustment problem*, Publication n° 693, Centre des Recherches sur les transport, Université Montréal
- Spiess, H. (1987); *A maximum-likelihood model for estimating OD matrices*, Transportation Research, Vol. 21B (5)
- STCP – Serviço de Transportes Colectivos do Porto (1991); *Inquérito à Mobilidade*
- Suh, S., Park, H., Kim, T. J. (1990); *A highway capacity function in Korea: Measurement and Calibration*, Transportation Research, Volume 24A (3), pp 177-186

- Tardiff, T. J. (1979); *Specification analysis for quantal choice models*, Transportation Science, 13 (3), pp 179-190
- Tavares, J. P., Costa, A. P., Seco, A. M. (1997); *Desenvolvimento de novas estratégias de gestão de redes viárias urbanas utilizando os sistemas de semaforizados de controlo de tráfego*, Actas do Seminário de Investigação em Engenharia, Arquitectura e Planeamento Urbano, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, pp. 323-330
- Taylor, M. A. P. (1979); *Evaluating the performance of a simulation model*, Transportation Research, Vol. 15A, pp 159-173
- Tobin, R. L., Friesz, T. L. (1988); *Sensitivity analysis for equilibrium network flow*, Transportation Science, Vol. 22 (4), pp 242-250
- TRB - Transportation Research Board (2000); *Highway Capacity Manual*, Washington D. C.,
- Van Vliet, D., Hall, M. (2002); *SATURN 10.3, User Manual*, The Institute for Transport Studies, The University of Leeds
- Van Vuren T. (1997); *MUSIC – SATURN Verification Guidelines*, Report, MUSIC Project, Transport RTD Programme of the 4th Framework, EC
- Van Vuren, T., Van Vliet, D. (1992); *Route choice and signal control – The potential for integrated route guidance*, Avebury, Institute for Transport Studies, University of Leeds
- Van Zuylen, H., Willumsen, L. G. (1980); *The most likely trip matrix estimated from traffic counts*, Transportation Research, Vol. 14B (3), pp 281-293
- Wang, J. (1993); *Accelerated convergence in traffic assignment by perturbation approach*, MSc Thesis in Transport Planning and Engineering, Institute for Transport Studies, University of Leeds
- Wardrop, J. G. (1952); *Some theoretical aspects of road traffic research*, Proceedings of Institute Civil Engineers II, pp 325-378

- Williams, H. C., Ortúzar, J. D. (1982); *Behavioural theories of dispersion and the mis-specification of travel demand models*, Transportation Research, Vol. 16B (3), pp 167-219
- Wills, M. J. (1986); *A flexible Gravity-Opportunities Model for Trip Distribution*, Transport Research 20B (2), pp 82-111
- Willumsen, L.G. (1981); *An entropy maximizing model for estimating trip matrices from traffic counts*, PhD Thesis, Institute for Transport Studies, University of Leeds
- Willumsen, L. G. (1978), *Estimation of an O-D matrix from traffic counts – a review*, Working Paper 99, Institute for Transport Studies, University of Leeds
- Yanagaia, W. (1994); *The conversion of standard speed-flow curves into flow-delay relationships for use in SATURN*, Traffic Engineering and Control, Vol. 34, pp 385-389
- Yang, H. (1997); *Sensitivity analysis for the elastic-demand network equilibrium problem with applications*, Transportation Research, Vol. 31B (1), pp 55-70
- Yang, H. (1995); *Sensitivity analysis for queuing equilibrium network flow and its application to traffic control*, Mathematical and Computer Modeling, Vol. 22 (7), pp 247-258
- Yang, H., Sasaki, T., Iida, Y. (1992); *Estimation of origin-destination matrices from link traffic counts on congested networks*, Transportation Research, Vol. 26B (6), pp 417-434



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000078270