



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE COIMBRA

**MODELOS DE ATRIBUIÇÃO/SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO:
O IMPACTO NA QUALIDADE DOS RESULTADOS DE
ERROS NO PROCESSO DE MODELAÇÃO**

ANTÓNIO LUÍS PIMENTEL VASCONCELOS

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
de Coimbra para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Urbana

Coimbra, Fevereiro de 2004



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE COIMBRA

**MODELOS DE ATRIBUIÇÃO/SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO:
O IMPACTO NA QUALIDADE DOS RESULTADOS DE
ERROS NO PROCESSO DE MODELAÇÃO**

AUTOR:

António Luís Pimentel Vasconcelos
Assistente da ESTV-IPV
Engenheiro Civil

ORIENTADOR:

Doutor Álvaro Jorge da Maia Seco
Professor Associado do DEC-FCTUC
Engenheiro Civil

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
de Coimbra para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Urbana

Coimbra, Fevereiro de 2004

RESUMO

Os modelos de atribuição/simulação de tráfego têm uma larga utilização no âmbito dos processos de planeamento e gestão de sistemas de transportes e, mais especificamente, de redes rodoviárias urbanas, mas a sua aplicação a casos reais é, em muitos casos, complexa e muito exigente do ponto de vista dos recursos envolvidos.

De facto, em cada uma das fases de modelação, desde a formulação matemática do problema à aplicação prática do modelo pelo utilizador final, são cometidos “erros” de diferentes tipos (especificação, agregação/simplificação, transferência, computacionais, quantificação), os quais condicionam a precisão das estimativas produzidas e, consequentemente, a aplicabilidade do modelo.

Tal facto leva a que nos processos de validação operacional destes modelos se recorra a referenciais, definidos em documentos normativos aceites internacionalmente, relativos aos níveis mínimos de “aderência entre sistemas reais e modelados”.

No entanto, nem estes documentos, nem quaisquer outras referências relevantes, apresentam indicações significativas quanto ao modo como os diferentes erros ou imprecisões influenciam a qualidade das estimativas. Tal torna o processo de construção e validação dos modelos uma “arte”, em que a experiência do utilizador é essencial para garantir processos eficientes de modelação.

No presente documento apresenta-se uma metodologia que permite simular e avaliar as consequências da ocorrência de erros de quantificação. Essa metodologia pressupõe a existência de uma “base de trabalho”, um modelo de atribuição/simulação de tráfego razoavelmente representativo de uma realidade específica, o que motivou o desenvolvimento do modelo da rede viária da cidade de Coimbra, através do *software* SATURN.

A aplicação da metodologia permitiu melhorar o conhecimento acerca dos padrões espectáveis nas relações entre erros de quantificação dos *inputs* e a precisão dos *outputs*, dando assim um contributo para a criação de procedimentos de recolha e tratamento de dados capazes de tornar mais eficiente a aplicação de modelos de atribuição/simulação de tráfego.

ABSTRACT

Traffic assignment/simulation models are widely applied in transport planning and traffic management operations, particularly in the scope of urban networks, but their application is, in many cases, complex and resource demanding.

This happens because through the different stages of model development, from the mathematical formulation stage to the end user practical implementation, different types of “errors” occur (specification, aggregation/simplification, transfer, computational, quantification), affecting the accuracy of the model estimates.

This has led some institutions to produce guidelines where the minimum levels of likelihood required between observed and simulated systems are specified. However, neither those guidelines, nor any other significant references, show how the different kinds of errors affect the outputs of the model. This makes the models construction and validation processes an “art”, where the user experience is essential to guarantee efficient modelling processes.

In the current text a methodology which allows simulating and assessing the impacts of quantification errors is presented. The application of this methodology implies the existence of a “reference model”, a traffic assignment/simulation model approximately representative of a specific real world traffic system, which was produced through the development of the Coimbra road network traffic model using the SATURN software.

The methodology application enabled a better understanding of the expectable patterns of the *quantification errors – estimates accuracy* relationships. This has represented a contribution to the development of data collection procedures more efficient within traffic assignment/simulation models development processes.

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação de Mestrado não teria sido possível sem o apoio das seguintes pessoas a quem quero exprimir os mais sinceros agradecimentos.

Começo por agradecer ao Professor Doutor Álvaro Jorge da Maia Seco, orientador científico deste trabalho, pelo imprescindível e valioso apoio prestado em todas as fases desta dissertação, desde a ideia original até à redacção, apoio sempre pronto e frutuoso. Da mesma forma, agradeço-lhe a forma amiga como sempre me motivou.

Dirijo também os meus agradecimentos à Escola Superior de Tecnologia de Viseu, e em particular ao Director do Departamento de Engenharia Civil, Eng.º Manuel António Pinto da Silva Amaral, pelas facilidades concedidas.

Agradeço ainda a todos os meus colegas, amigos e familiares, pela preocupação, auxílio e motivação que sempre prestaram.

Finalmente, o meu agradecimento especial ao Fernando pela sua ajuda na revisão do texto.

ÍNDICE

I	ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA.....	9
I.1	<i>Definição de modelo e classificação genérica.....</i>	9
I.2	<i>Validade e aplicabilidade de modelos.....</i>	9
I.2.1	Tipologias de erros.....	10
I.2.1.1	Erros de especificação.....	11
I.2.1.2	Erros de agregação / simplificação.....	11
I.2.1.3	Erros de transferência.....	11
I.2.1.4	Erros computacionais.....	11
I.2.1.5	Erros de quantificação.....	12
I.2.2	O processo de validação.....	12
I.3	<i>Objecto de estudo.....</i>	14
I.4	<i>Objectivos do estudo.....</i>	15
I.5	<i>Estrutura do texto.....</i>	16
II	OS MODELOS DE ATRIBUIÇÃO/SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO	17
II.1	<i>Introdução.....</i>	17
II.2	<i>Princípios básicos de modelação de sistemas viários.....</i>	19
II.2.1	Caracterização da procura.....	20
II.2.2	Caracterização da topologia das redes.....	21
II.2.3	Caracterização do potencial de desempenho das redes.....	22
II.2.3.1	Desempenho dos arcos.....	22
II.2.3.2	Desempenho das intersecções.....	26
II.2.4	Metodologias de atribuição de viagens à rede.....	27
II.2.4.1	Custo generalizado de deslocação.....	27
II.2.4.2	Atribuição tudo-ou-nada.....	28
II.2.4.3	Consideração da heterogeneidade e da inconsistência da população de condutores.....	28
II.2.4.4	Atribuição em redes congestionadas.....	29
II.3	<i>Modelos de simulação de tráfego.....</i>	30
II.3.1	Modelos macroscópicos.....	30
II.3.2	Modelos mesoscópicos.....	31
II.3.3	Modelos microscópicos.....	32
II.4	<i>Sequência geral de desenvolvimento de modelos de simulação de tráfego.....</i>	34
II.5	<i>Impacto dos erros de quantificação em modelos de simulação de tráfego.....</i>	38
II.6	<i>Síntese.....</i>	39
III	DEFINIÇÃO DE UMA METODOLOGIA DE ANÁLISE	41
III.1	<i>Enquadramento.....</i>	41
III.2	<i>Princípios fundamentais da metodologia de análise.....</i>	43
III.3	<i>Tipos de questões relevantes.....</i>	44

III.4	<i>Metodologia de simulação de erros de quantificação</i>	47
III.4.1	Introdução.....	47
III.4.2	Tipos de <i>inputs</i> dos modelos de simulação.....	48
III.4.2.1	Variáveis independentes.....	48
III.4.2.2	Parâmetros de calibração.....	49
III.4.3	Erros decorrentes dos processos de amostragem.....	49
III.4.3.1	Estimativa de médias.....	50
III.4.3.2	Estimativa de proporções.....	51
III.4.4	Métodos para simulação dos erros de quantificação.....	52
III.4.4.1	Decorrentes dos processos de amostragem.....	52
III.4.4.2	Decorrentes do recurso a sub-modelos.....	53
III.4.5	Intensidade dos erros simulados.....	54
III.5	<i>Caracterização da qualidade de um modelo</i>	55
III.5.1	Indicadores do estado do sistema.....	55
III.5.2	Indicadores de afastamento.....	56
III.5.3	Medidas estatísticas.....	57
III.5.4	Critérios de validação.....	61
III.5.4.1	Recomendações FHWA 1997.....	61
III.5.4.2	Recomendações UK DOT 1996.....	63
III.5.4.3	Outros critérios.....	64
IV	DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE REFERÊNCIA	66
IV.1	<i>O modelo de simulação de tráfego SATURN</i>	66
IV.1.1	Estrutura do modelo.....	66
IV.1.2	Caracterização da procura.....	66
IV.1.3	Caracterização topológica e funcional da rede.....	67
IV.1.4	Caracterização do potencial de desempenho da rede.....	68
IV.1.4.1	Rede de atribuição.....	68
IV.1.4.2	Rede de simulação.....	69
IV.1.5	Resultados do modelo.....	71
IV.2	<i>Desenvolvimento do modelo COIMBRA – SAT</i>	72
IV.2.1	Objectivos genéricos da modelação.....	72
IV.2.2	Caracterização geral da rede viária de Coimbra.....	73
IV.2.3	Área de estudo e estrutura da rede.....	73
IV.2.4	Codificação da rede de atribuição.....	75
IV.2.5	Rede de simulação.....	79
IV.2.5.1	Características geométricas e operacionais.....	79
IV.2.5.2	Velocidades.....	79
IV.2.5.3	Fluxos de saturação.....	80
IV.2.5.4	Intervalos críticos de aceitação.....	82
IV.2.6	Matriz origem-destino.....	82
IV.2.6.1	A matriz FCTUC.....	82
IV.2.6.2	Compatibilização da matriz FCTUC com o modelo COIMBRA-SAT.....	83
IV.2.7	Avaliação da convergência do modelo.....	84

IV.2.8	Correcção de erros grosseiros e calibração	85
IV.2.8.1	Parâmetros de calibração	86
IV.2.8.2	Variáveis independentes	87
IV.2.9	Validação.....	90
IV.2.9.1	Fluxos de tráfego	90
IV.2.9.2	Tempos de trajecto.....	92
IV.2.10	Conclusões.....	96
V	ANÁLISE DAS RELAÇÕES ENTRE ERROS DE QUANTIFICAÇÃO E O DESEMPENHO DOS MODELOS	97
V.1	<i>Introdução e metodologia geral.....</i>	97
V.2	<i>Avaliação do comportamento dos indicadores de aderência à realidade</i>	98
V.2.1	Objectivos e metodologia	98
V.2.2	Resultados obtidos	99
V.2.3	Síntese	104
V.3	<i>Análise do impacto de erros de quantificação na qualidade global do modelo.....</i>	105
V.3.1	Variáveis de ocorrência singular – erros sistemáticos	105
V.3.1.1	Sensibilidade do modelo a erros de quantificação do parâmetro GONZO.....	106
V.3.1.2	Sensibilidade do modelo a erros de quantificação da relação de parâmetros PPM/PPK.....	107
V.3.2	Variáveis de ocorrência múltipla – erros aleatórios.....	108
V.3.2.1	Fluxos de saturação nos movimentos de viragem.....	109
V.3.2.2	Velocidades nos arcos da zona de simulação	110
V.3.3	Variáveis de ocorrência múltipla – combinação de erros aleatórios e sistemáticos	110
V.3.4	Síntese	113
V.4	<i>Avaliação do desempenho do modelo em função da quantidade de erros que se cometem na quantificação de uma variável.....</i>	113
V.5	<i>Identificação e caracterização dos elementos da rede que mais condicionam a qualidade do modelo.....</i>	114
V.5.1	Variáveis explicativas.....	115
V.5.2	Relação entre o desempenho do modelo e as características dos movimentos de viragem onde são cometidos os erros	117
V.5.3	Estudo da relação entre o grau de susceptibilidade dos diferentes elementos da rede e as suas características básicas	129
V.5.4	Síntese	131
V.6	<i>Avaliação da importância da inter-relação espacial dos elementos onde são cometidos os erros de quantificação.....</i>	131
V.7	<i>Avaliação de efeitos de degradação espacial dos impactos</i>	135
V.8	<i>Importância do ambiente rodoviário</i>	138
V.8.1	Objectivos e metodologia	138
V.8.2	Sensibilidade do modelo com diferentes graus de congestionamento da rede	138
V.8.3	Sensibilidade do modelo com diferentes valorizações relativas do custo do tempo e da distância percorrida.....	140
V.8.3.1	Erros na quantificação dos fluxos de saturação	140
V.8.3.2	Erros na quantificação da relação PPM/PPK.....	141

V.8.4	Síntese	142
VI	CONCLUSÕES	144
VI.1	<i>Síntese e conclusões gerais.....</i>	<i>144</i>
VI.2	<i>Desenvolvimentos futuros do estudo.....</i>	<i>146</i>
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148

I ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA

I.1 Definição de modelo e classificação genérica

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

Ortúzar e Willumsen (1990) propõem a classificação de modelos em duas categorias principais: os modelos físicos e os modelos teóricos. De uma maneira geral, recorre-se aos primeiros, normalmente à escala reduzida, quando o processo a estudar é particularmente complexo, impossibilitando a sua compreensão apenas com base em considerações teóricas. Quanto aos modelos teóricos, estes podem ser do tipo narrativo (expressos por palavras), gráfico (desenhos, diagramas) ou matemático.

São os modelos matemáticos que mais interessam para o campo de investigação em causa. Dentro desta classe é possível classificar os modelos consoante a forma como foram desenvolvidos ou segundo o tipo de soluções que são perseguidas. O primeiro critério estabelece a fronteira entre os modelos teóricos, deduzidos exclusivamente com base em princípios matemáticos/físicos, e os modelos empíricos, deduzidos com base em observações/experiências. O segundo critério separa os modelos matemáticos puros, que permitem determinar soluções óptimas, e as heurísticas ou métodos aproximados que, baseados em raciocínios empíricos e mesmo na intuição, permitem a obtenção de boas soluções para os problemas, com custos computacionais aceitáveis (Rodrigues, 1996).

I.2 Validade e aplicabilidade de modelos

Um modelo perfeito seria capaz de reflectir um processo real com o mesmo grau de precisão com que é possível medir as variáveis caracterizadoras desse processo. Em

princípio, seria desejável o desenvolvimento de modelos “perfeitos” mas, da própria definição de modelo, compreende-se que tal é impossível.

Consequentemente, põe-se o problema de definir o grau de proximidade entre o modelo e o processo real ou, dito de outra forma, estabelecer o grau de precisão aceitável/desejável do modelo. Esta é uma questão relevante, uma vez que o custo de desenvolvimento de um modelo cresce rapidamente quando se exigem altos níveis de confiança. (ver a Figura I.1)

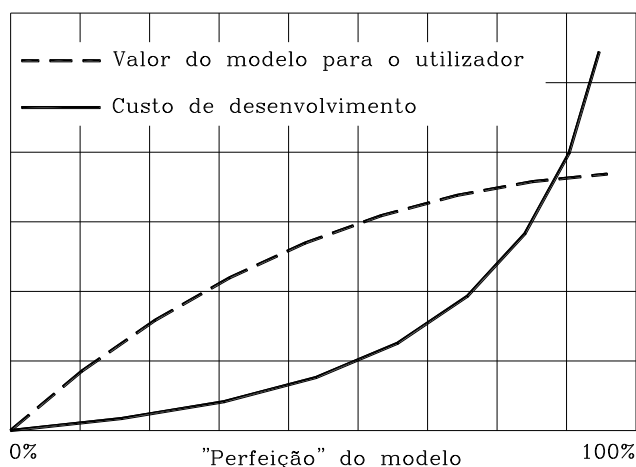


Figura I.1 – Relação entre o custo de desenvolvimento e o valor de um modelo para o utilizador (adaptado de Sargent, 2000)

Conclui-se, assim, que um aspecto chave no processo de análise de um problema deverá ser o de adaptar a complexidade do modelo ao uso pretendido, de modo que seja estabelecido um compromisso entre o custo de desenvolvimento, o grau de confiança no modelo e o valor do modelo para o utilizador. A posição do Departamento de Transportes do Reino Unido (UK DOT, 1991: p.1-2) traduz precisamente estas considerações quando refere que *“a adequação de um modelo a um fim específico não deve ser julgada pela sua sofisticação, mas antes pela facilidade com que permite fornecer informações essenciais para tomar e justificar decisões”*.

I.2.1 Tipologias de erros

São muitos os factores responsáveis pelas discrepâncias entre um modelo e o sistema real representado. A existência destas diferenças – *erros*, é intrínseca ao processo de modelação, não significando necessariamente que tenha havido “enganos” por parte do utilizador. Os erros podem ser classificados segundo os factores que os originaram, nas categorias de “especificação”, de “agregação / simplificação”, de “transferência”, “computacionais” e de “quantificação” (Barton-Aschman Associates e Cambridge Systematics, 1997, Ortúzar e Willumsen, 1990).

I.2.1.1 Erros de especificação

Os erros de especificação resultam da não utilização de variáveis independentes relevantes e/ou de relações incorrectas entre as variáveis. Surgem porque o fenómeno modelado não foi bem compreendido ou porque houve necessidade de assumir simplificações. Como exemplo destes erros pode referir-se:

- Admitir comportamento determinístico dos condutores, em vez de se considerar a variabilidade e a inconsistência própria dos seus processos de decisão;
- Admitir a propagação instantânea dos veículos pela rede, em vez de se representar a progressão espacial dos veículos ao longo do tempo;
- Assumir a simulação de cruzamentos semaforizados exclusivamente com tempos fixos, em redes onde existam cruzamentos semaforizados actuados.

I.2.1.2 Erros de agregação / simplificação

Estes erros resultam da necessidade de reduzir a complexidade do problema através do agrupamento de elementos individuais de características não totalmente homogéneas. Por exemplo:

- Considerar que uma única matriz origem/destino é representativa de um período, quando é reconhecida a variabilidade temporal e espacial da procura;
- Agregação dos pontos de origem e destino dos condutores num número limitado de pontos (centróides), em vez de se considerarem os pontos exactos de origem e destino das viagens.

I.2.1.3 Erros de transferência

Ocorrem quando um modelo desenvolvido num determinado ambiente é utilizado noutro diferente (como exemplo, é reconhecido que os estilos de condução variam significativamente de país para país). Em princípio, poderão ser efectuados alguns ajustamentos ao modelo, mas é normal que as suas especificações não sejam totalmente representativas do novo ambiente. Neste caso pode-se considerar que o modelo apresenta erros de especificação.

I.2.1.4 Erros computacionais

Trata-se de um tipo de erro com uma expressão cada vez mais reduzida. Dentro desta categoria podem distinguir-se os erros de propagação, em que o erro associado a uma variável é propagado ao longo dos cálculos, e os erros de convergência, quando a cadeia de cálculos é interrompida antes de ser atingido o valor óptimo.

I.2.1.5 Erros de quantificação

Os erros de quantificação ocorrem devido a imprecisões na caracterização das variáveis utilizadas pelo modelo. Podem ser consideradas as seguintes subcategorias: erros de medição, erros de amostragem e erros de previsão. Especificamente, estes podem ser caracterizados do seguinte modo:

- Erros de medição: quando é cometido um erro na observação ou registo de uma variável que toma valor único (como a largura de uma via de circulação);
- Erros de amostragem: quando um modelo requer um valor característico de uma população e o valor disponível é obtido através de uma amostra;
- Erros de previsão: quando é cometido um erro na previsão da evolução no tempo de uma variável.

I.2.2 O processo de validação

Entende-se por validação o acto de determinar se um modelo representa ou aproxima razoavelmente o sistema real para um determinado uso (Fishman e Kiviat, 1968; Law e Kelton, 2000). A validade de um modelo é assim um conceito relativo. Balci e Sargent (1981) defendem mesmo que os modelos devem ser desenvolvidos para objectivos específicos e que a sua validade deve ser entendida apenas nesse contexto.

No Traffic Appraisal Manual (UK DOT, 1991), são apontados os seguintes princípios orientadores para o desenvolvimento e validação de um modelo:

- Os decisores devem compreender a qualidade da informação com que lidam;
- A precisão deve permitir a tomada consciente de decisões;
- As incertezas devem ser levadas em conta no processo de decisão.

O desenvolvimento e a validação de um modelo são processos interligados. Sargent (2000), propõe a estrutura esquematizada na Figura I.2., onde é sugerido um processo de validação que acompanha as diversas fases de desenvolvimento do modelo. O *modelo conceptual* é a representação matemática do *sistema real* em causa; o *modelo computadorizado* é o modelo conceptual implementado em computador. O modelo conceptual é desenvolvido através de uma *fase de análise e modelação*, o modelo computadorizado é desenvolvido através de uma *fase de programação e implementação* e inferências sobre o sistema real, obtidas através de experiências realizadas sobre o modelo computadorizado na *fase de experimentação*.

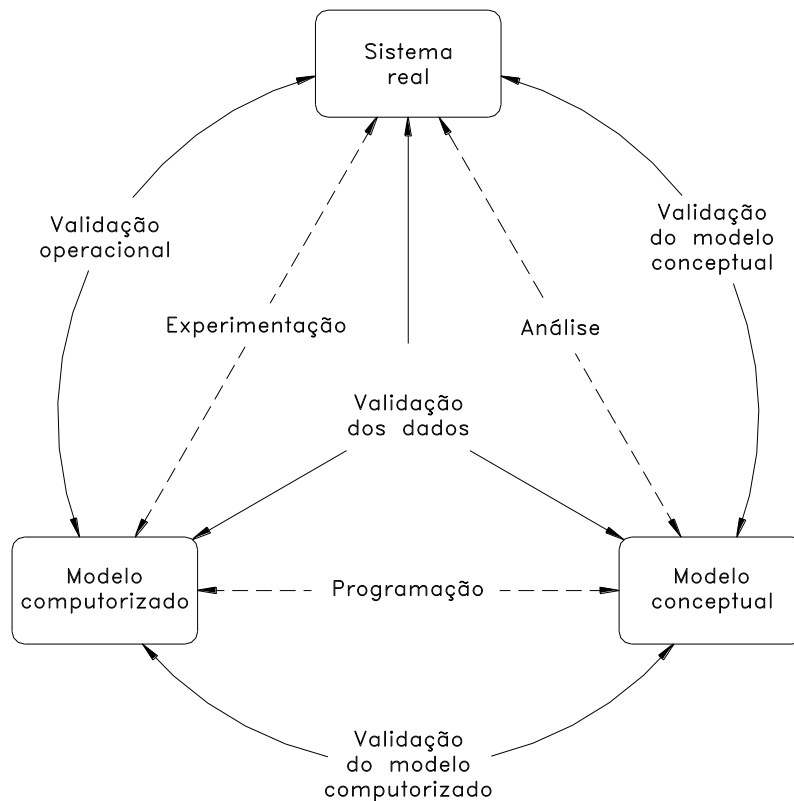


Figura I.2 – Processo genérico de desenvolvimento e validação de um modelo (Sargent, 2000)

A cada uma destas fases está associado um processo de validação. A *validação do modelo conceptual* assegura que as teorias subjacentes ao modelo conceptual são correctas e que a representação do sistema real é razoável para o uso pretendido do modelo. Implica, normalmente, que um número de indivíduos qualificados reveja cuidadosamente a lógica do modelo e a sua compatibilidade com os fundamentos teóricos que lhe são subjacentes (Kaman, 1996 e Sargent, 2000).

A *validação do modelo computorizado* assegura que foi feita uma correcta programação e implementação do modelo conceptual. Esta é uma fase normalmente seguida pelo autor do *software*, que apenas garante a não existência de erros na transição. A verificação rigorosa implica a realização de testes estáticos e dinâmicos. Os primeiros consistem em avaliações passo a passo dos algoritmos utilizados no programa de computador. Nos testes dinâmicos o programa é executado sob diferentes condições e valores e os resultados obtidos são utilizados para determinar se a programação foi bem efectuada (Fairley, 1976).

A *validação operacional* garante que os resultados do modelo constituem uma representação suficientemente precisa do sistema real dentro do domínio da aplicabilidade. Existem três formas básicas de comparação de dois sistemas: comparação gráfica de resultados, intervalos de confiança e testes de hipóteses (Sargent, 2000).

Complementarmente a todo este processo, é identificada a necessidade de *validação dos dados*, como forma de assegurar que os dados necessários para o desenvolvimento e validação do modelo, assim como para a realização de experiências, são adequados e correctos¹.

I.3 Objecto de estudo

Ao gestor de uma rede de transportes coloca-se normalmente o problema de definir planos de investimentos orientados por objectivos, como a diminuição do congestionamento da rede viária, promoção das acessibilidades e melhoria do ambiente. A realização de estudos onde se avaliem os impactos de diferentes alternativas e onde se identifiquem as respectivas relações custo – benefício é assim uma acção cada vez mais indispensável à tomada objectiva de decisões.

Neste contexto, os modelos computadorizados de simulação de tráfego assumem um papel importante no processo de decisão. Estes modelos procuram reproduzir o sistema de transportes, em particular o padrão de deslocações de veículos que se observa na rede, face a uma determinada procura.

A utilização de modelos de simulação de tráfego tem vindo progressivamente a generalizar-se. De entre os factores que para tal contribuem destacam-se:

- A complexidade das redes viárias: a multiplicidade de origens e destinos, a existência de trajectos alternativos e a interacção que existe entre o desempenho da rede e a procura torna os problemas de simulação de tráfego em geral, e de redes urbanas em particular, muito complexos, sendo resolúveis apenas através de cálculos iterativos;
- O custo do solo em áreas centrais e as restrições que se colocam à construção de novas infra-estruturas fazem com que, cada vez mais, se procure otimizar os sistemas existentes através de intervenções de impacto bastante limitado e, conseqüentemente, dificilmente quantificável através de métodos tradicionais de análise como os estudos antes e depois (Fox *et al*, 1998);
- Os avanços recentes nas técnicas de modelação e a diminuição dos horizontes de projecto, o que tem permitido a diminuição das margens de erro das estimativas produzidas (por comparação com os modelos de planeamento estratégico em voga nos anos 60).

¹ Como exemplo deste tipo de validação, pode referir-se que o Departamento de Transportes do Reino Unido recomenda que nas estimativas dos tempos médios de deslocação *observados* (da população dos condutores, com base num número limitado de observações) não sejam introduzidos erros superiores a 10%, com um nível de confiança de 95%.

Existe, contudo, um aspecto que, de certa forma, tem limitado a aplicabilidade dos modelos de atribuição/simulação de tráfego. Trata-se do custo de desenvolvimento, que tende a aproximar-se do valor que o modelo representa para o utilizador, à medida que o grau de confiança exigido aumenta (como referido no ponto I.2).

É sobre este aspecto que a presente investigação assenta. Tomando por adquirido a selecção adequada de um determinado modelo para um uso específico (assumindo-se a validade do modelo conceptual e do modelo computadorizado), o desempenho do modelo fica condicionado pela qualidade dos seus *inputs*. A fase de recolha e tratamento de todos os dados necessários é assim uma fase crítica do processo de modelação operacional, sendo essencial que os recursos (de tempo, de pessoal, financeiros) disponíveis sejam criteriosamente utilizados. Este ponto é reforçado pela cada vez maior sofisticação dos modelos, normalmente associada a uma maior exigência no que respeita à qualidade e quantidade dos dados de entrada.

Existem já publicações onde se indicam objectivos a cumprir relativamente ao processo de validação operacional dos modelos de atribuição/simulação. Não é, contudo, clara a relação entre o desempenho do modelo e a qualidade dos seus *inputs*, ou seja, não é possível prever com exactidão o erro que o modelo apresentará ao nível das variáveis dependentes quando é cometido um erro de quantificação em uma ou mais das variáveis independentes. Este desconhecimento dificulta a atribuição de prioridades durante o processo de recolha de informação de base e pode mesmo por em causa a utilidade de todo o processo de modelação e análise.

Esta lacuna sugere a oportunidade do presente tema de investigação. Assim, o objecto do trabalho é a problemática da simulação de redes rodoviárias urbanas, particularmente naquilo que respeita à relação entre o grau de precisão dos *outputs* do modelo e a precisão necessária ao nível dos *inputs*. Um mais preciso conhecimento destas relações contribuirá para uma melhor compreensão sobre os níveis de recursos envolvidos numa modelação adequada e, conseqüentemente, sobre as reais condições de aplicabilidade dos modelos.

I.4 Objectivos do estudo

Na sequência do exposto, com o presente trabalho de investigação pretende-se compreender melhor a forma como se reflectem os erros, cometidos na quantificação dos *inputs* e parâmetros internos, no desempenho dos modelos de simulação de tráfego.

A prossecução deste objectivo genérico implica que sejam atingidos os seguintes objectivos parcelares:

- Definição de uma metodologia de análise que permita, de uma forma sistemática, estudar os diversos tipos de erros e a avaliação dos respectivos impactos;
- Desenvolvimento e validação de um modelo de simulação de tráfego aplicado a uma rede real (no caso, a rede viária da cidade de Coimbra), com características representativas dos modelos que são objecto desta investigação;
- Aplicação da metodologia ao modelo desenvolvido, no estudo das inter-relações entre um conjunto de tipologias de erros característicos deste tipo de modelos e a precisão das respectivas estimativas.

I.5 Estrutura do texto

Além deste primeiro capítulo de introdução, onde é feito o enquadramento do problema, o texto é constituído por mais cinco capítulos que se passam a resumir:

No Capítulo II é feita uma breve caracterização dos modelos de simulação de tráfego e das respectivas técnicas de modelação teóricas. Depois, centrando a análise especificamente sobre os modelos mesoscópicos, e com base na sequência tradicional de desenvolvimento de modelos de simulação, identificou-se a importância dos dados de entrada e justificou-se a necessidade de compreender melhor as relações entre os erros de quantificação e a capacidade dos modelos em representar sistemas de tráfego reais.

No Capítulo III apresentam-se os princípios gerais de uma metodologia de análise que permite avaliar a sensibilidade de um modelo de simulação de tráfego a erros de quantificação.

O desenvolvimento de um modelo de referência é objecto do Capítulo IV. Neste capítulo apresenta-se a aplicação informática adoptada – SATURN – e descrevem-se os principais passos seguidos no desenvolvimento e validação do modelo da rede viária de Coimbra – COIMBRA-SAT.

No Capítulo V descreve-se a aplicação da metodologia de análise ao modelo COIMBRA-SAT, estudando-se o impacto de diferentes tipologias de erros no desempenho desse modelo.

Finalmente, no Capítulo VI, apresentam-se as principais conclusões e sugerem-se algumas perspectivas de desenvolvimento futuro desta linha de investigação.

II OS MODELOS DE ATRIBUIÇÃO/SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

II.1 Introdução

A atribuição de tráfego era normalmente encarada como a última fase de um processo de avaliação do desempenho das infra-estruturas de transportes que se generalizou na década de 60 e que ficou conhecido por “modelo clássico de transportes” ou “modelo dos quatro passos”.

A forma geral deste modelo é apresentada na Figura II.1. São considerados, como elementos de base, o sistema de redes de transportes e um zonamento, assim como a caracterização socio-económica da população e do uso do solo. Esta informação é utilizada para estimar um modelo de geração e atracção de viagens na área de estudo (geração de tráfego), produzindo os totais das linhas e colunas de uma matriz de deslocações. O passo seguinte consiste em distribuir estas viagens por destinos específicos (distribuição de tráfego), o que se traduz pela obtenção dos elementos interiores da matriz. De seguida, procede-se à modelação dos modos de transporte alternativos (distribuição modal), o que resulta numa matriz de deslocações por modo. O último destes passos é a “atribuição de tráfego”, no qual se procede à atribuição das matrizes de viagens efectuadas nos diversos modos às redes correspondentes. De acordo com Thomas (1991), nesta forma tradicional de análise, os modelos de atribuição são utilizados para fornecer estimativas de fluxos de tráfego em vias estratégicas, a nível regional, com o principal objectivo de disponibilizar uma base para comparação de sistemas de transportes a médio e longo prazo.

Desde cedo esta abordagem enfrentou muitas críticas. Foram-lhe apontadas como principais fraquezas o formato sequencial, a incapacidade de tratar cadeias de múltiplas viagens ao longo do dia e a aplicação a níveis muito agregados, face ao custo da informação detalhada (Bates, 2000). Apesar disso, e embora o grau de utilização se tenha reduzido, Viegas (2000) refere que há ainda muitas circunstâncias em que são usados. As razões para tal prendem-se com a facilidade de encontrar aplicações informáticas de baixo custo para a sua corrida e a menor exigência em dados relativamente a outros modelos de estimação da procura.

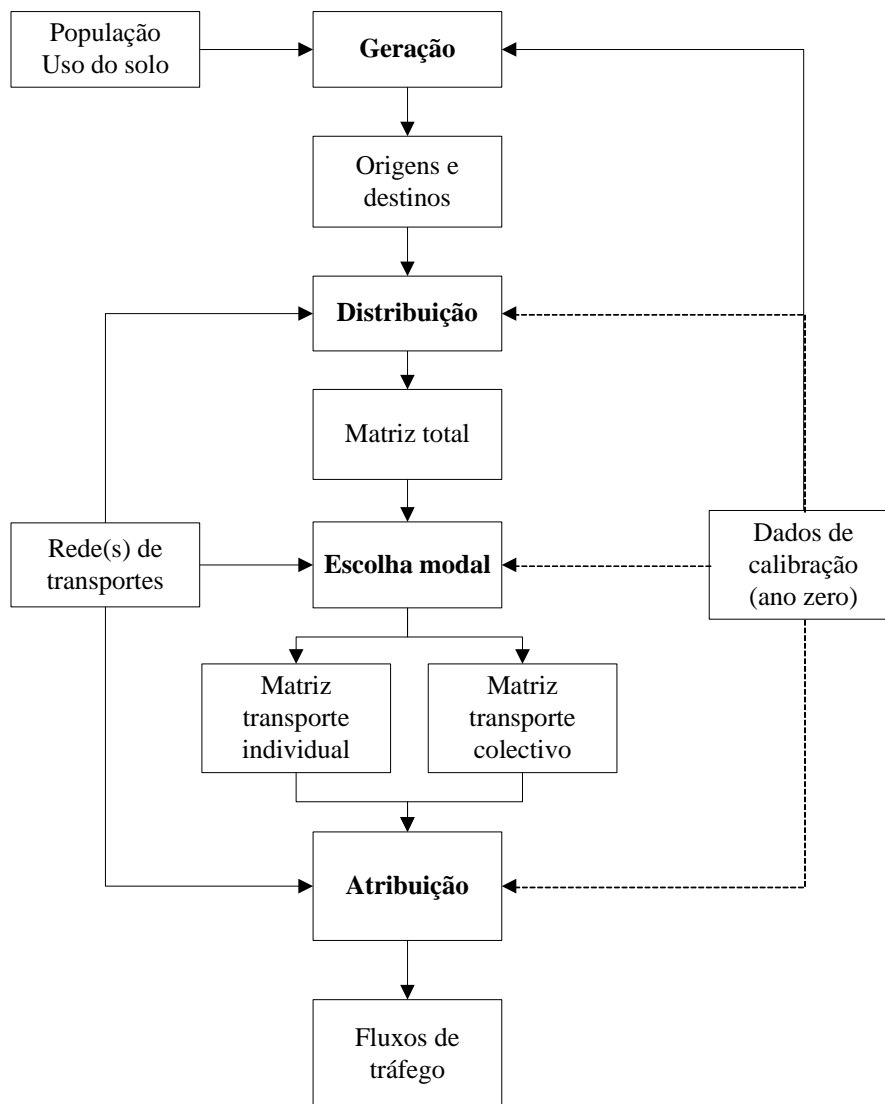


Figura II.1 – Estrutura do modelo sequencial de quatro passos (adaptado de HMSO, 1987)

Durante a década de 70 surgiram propostas de modelação alternativas ao modelo de quatro passos, considerando explicitamente a influência do agregado familiar e das características do indivíduo, bem como a consideração conjunta de toda a cadeia de viagens realizadas por uma pessoa ao longo do dia. A este tipo de modelos, *modelos globais desagregados*, são, por sua vez, apontadas as dificuldades em se obter informação suficientemente desagregada, de se conhecerem as margens de erros das estimativas produzidas e de transposição de processos de decisão entre duas realidades significativamente distintas, como cidades diferentes ou, para a mesma cidade, a situação actual e aquela que ocorre a médio/longo prazo, o que põe em causa a aplicabilidade destes modelos (Viegas, 2000).

É neste contexto que Thomas (1991) refere a actual pouca confiança em soluções estratégicas para os problemas de tráfego, contrapondo uma progressiva preocupação com intervenções imediatas ou de curto/médio prazo sobre redes locais.

Nesta perspectiva, não será normalmente necessário recorrer a um modelo global de procura de transportes, devendo as matrizes de viagens ser obtidas, tanto quanto possível, por observação directa ou actualização de outras anteriores (UK DOT, 1996).

No entanto, esta nova forma de gestão das infra-estruturas coloca novas exigências aos níveis dos processos de modelação. Se, por um lado, a fase de atribuição passa a constituir a única etapa de modelação no processo de planeamento e análise, por outro, as intervenções a avaliar são cada vez mais subtis, compreendendo-se assim os esforços desenvolvidos no sentido de tornar os modelos de atribuição cada vez mais sensíveis e realistas.

Seguindo esta tendência, centrar-se-á a investigação sobre o processo de atribuição/simulação de tráfego, assumindo-se portanto que as matrizes origem-destino foram obtidas por processos de observação/estimação.

II.2 Princípios básicos de modelação de sistemas viários

O processo básico de simulação de tráfego está representado esquematicamente na Figura II.2. Os principais dados de entrada são a matriz origem-destino (OD) das viagens a efectuar e uma rede codificada sobre a qual serão distribuídas as viagens, bem como um conjunto de elementos que representam o processo de interacção dos condutores com a rede. São determinados os trajectos utilizados pelos condutores entre os vários pares OD e carregados com as viagens respectivas. O resultado fundamental é o conjunto de fluxos de tráfego nos arcos da rede mas são também importantes as matrizes de custos e tempos inter-zonais.

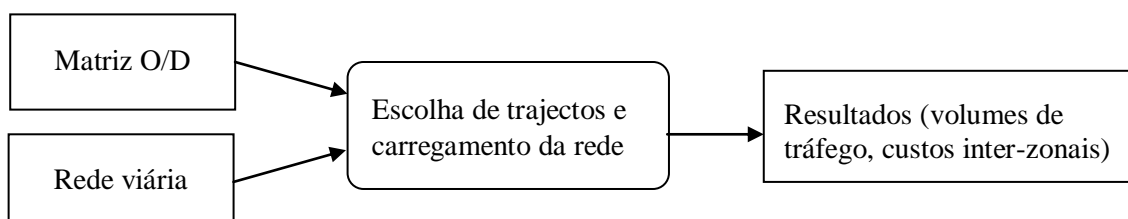


Figura II.2 – Fases fundamentais de um processo de atribuição (adaptado de Thomas, 1991)

Nesta fase importa distinguir a fase de atribuição, em que são determinados os trajectos óptimos entre os diversos pares O-D em função dos custos de deslocação, e a fase de simulação, própria dos modelos ditos não convencionais, onde, em função de um determinado carregamento, são simuladas as interacções entre veículos nos cruzamentos e calculados os tempos de deslocação em conformidade. Existem modelos que apenas efectuem a atribuição (EMME/2, TRANSCAD), outros que apenas fazem a simulação (TRANSYT, AIMSUN2, VISSIM) e ainda outros que oferecem as duas possibilidades – atribuição/simulação (SATURN, PARAMICS). De acordo com a tendência actual,

será utilizada a designação de “modelo de simulação de tráfego” para referir a generalidade dos modelos que, de alguma forma, representam um sistema viário.

Nos pontos seguintes descrevem-se os principais conceitos / técnicas respeitantes à modelação da procura, da rede viária e da interacção dos condutores com a rede.

II.2.1 Caracterização da procura

A procura representa a necessidade de mobilidade dos utentes do sistema de transportes. Pode ser classificada por motivo (emprego, serviço, lazer, etc.), por modo (transporte individual, autocarro) e por hora do dia.

Idealmente, a caracterização da procura seria feita de modo a permitir a reprodução exacta das origens e dos destinos de todas as viagens que se realizam pela rede durante o período considerado. É, contudo, necessário introduzir simplificações devido à impossibilidade de se obter toda a informação relevante.

A primeira destas simplificações está relacionada com a impraticabilidade de uma caracterização espacial exacta de todos os pontos de partida e chegada, sendo necessário agregar espacialmente as origens e destinos, através de um zonamento. Este é um aspecto que condiciona fortemente a precisão de um modelo, uma vez que as viagens intra-zonais não são afectadas à rede. Se as zonas forem muito grandes, o modelo não será capaz de prever com precisão os fluxos de tráfego, independentemente da precisão dos dados OD disponíveis. Se, pelo contrário, as zonas forem muito pequenas, os erros de amostragem afectam a precisão dos valores individuais da matriz de deslocações e consequentemente, das estimativas de fluxos.

Outra simplificação relevante está relacionada com a dificuldade associada à caracterização temporal da procura. Reconhecendo-se que o número de viagens entre os diversos pontos de origem e destino de uma rede de transportes varia ao longo do dia e de dia para dia, é prática corrente adoptar uma matriz origem-destino fixa que contenha os valores médios, considerada representativa do período em análise. Este é um aspecto que actualmente é condicionado essencialmente pela dificuldade em obter informação fidedigna e suficientemente desagregada, já que os modelos mais recentes possibilitam o carregamento sucessivo das redes com matrizes OD diferenciadas.

Finalmente, importa referir que a utilização de matrizes OD estáticas, ou seja, independentes das condições de circulação, pode constituir uma fonte de erro importante, se estiverem em análise alterações significativas na procura ou na infraestrutura, uma vez que não são levados em conta os fenómenos de indução/supressão de tráfego ou de repartição modal. Existem já vários métodos para simular o efeito do congestionamento sobre a procura, os quais se podem classificar em duas grandes categorias:

- Métodos que identificam, mas não tratam, as viagens suprimidas pelo congestionamento da rede. É assumido que as viagens suprimidas são transferidas para outros modos de transporte, ocorrem em diferentes modos de transporte, a horas diferentes ou em vias não modeladas; em White *et al* (1995) é discutida a aplicabilidade de diversas técnicas nesta categoria;
- Métodos que simulam dinamicamente a decisão de alterar o tempo de partida. Assentam no princípio de que o custo da deslocação está relacionado não só com os factores inerentes à própria viagem, mas também com a modificação da hora de saída. As viagens suprimidas são efectuadas em instantes diferentes dos pretendidos, simulando-se o alargamento do período de ponta (Vythoulkas, 1988; Alfa, 1989).

A matriz OD para as condições actuais pode ser obtida essencialmente de duas maneiras:

- Através de observações: inquéritos origem-destino associados a contagens de tráfego. É um método rigoroso mas extraordinariamente caro e difícil de implementar em meio urbano, implicando a realização de um grande número de sessões de inquéritos OD, responsáveis em muitos casos por perturbações significativas das condições de circulação;
- Estimacão com base em contagens de tráfego. Estes métodos dispensam a realizacão de inquéritos. Consistem em determinar a matriz mais provável que, atribuída a uma rede viária, anula ou minimiza as diferenças entre os fluxos observados e modelados. Na monografia de Abrahamsson (1998) são identificados 20 modelos de estimacão de matrizes, de entre os quais o mais popular é provavelmente o ME2 (Van Zuylen e Willumsen, 1980), fruto da sua integracão de raiz com o igualmente popular modelo de simulacão de tráfego SATURN (Hall, Van Vliet e Willumsen, 1980).

II.2.2 Caracterizacão da topologia das redes

No caso específico de modelos de atribuicão de tráfego rodoviário, a infra-estrutura de transportes traduz-se pela rede viária e respectivos dispositivos de controlo. O processo mais simples de representacão da rede traduz-se por um grafo orientado onde os arcos correspondem às vias e os nós correspondem às intersecçoes (Figura II.3 – a). Esta é uma soluçao com limitacões importantes, na medida em que não possibilita a caracterizacão diferenciada dos custos associados a cada movimento de viragem. A representacão alternativa, característica dos modelos mais recentes, passa pela definicão de arcos auxiliares, cada um relativo a um movimento de viragem (Figura II.3 – b). Esta soluçao permite já a caracterizacão detalhada dos diversos movimentos de viragem, não só no que respeita à possibilidade de efectuar o movimento mas também ao custo associado a essa manobra.

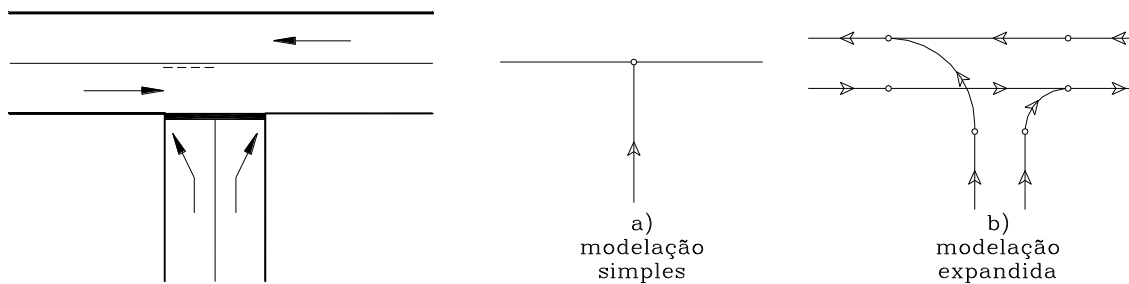


Figura II.3 – Modelação de intersecções: a) simples; b) expandida

No que respeita à procura, como referido no ponto anterior, é necessário dividir a área de estudo em zonas. Cada zona é representada por um nó específico, designado por centróide, onde se assume ter início e fim cada uma das viagens respeitantes à zona representada. A ligação entre os nós da rede e os centróides é estabelecida através de arcos fictícios – conectores de centróide.

II.2.3 Caracterização do potencial de desempenho das redes

A grande maioria dos modelos de simulação de tráfego permite representar, de forma mais ou menos elaborada, a variação do tempo de deslocação face a diferentes graus de carregamento dos elementos da rede. Dependendo da forma de modelação das intersecções adoptada (simples ou expandida), esse comportamento pode ser modelado apenas ao nível dos arcos, das intersecções, ou de ambos.

II.2.3.1 Desempenho dos arcos

É conhecida a relação teórica que existe entre o fluxo de tráfego, a velocidade média (no espaço) e a densidade. Quando a densidade é zero, não há veículos na via e o fluxo é zero. Quando a densidade é máxima, a velocidade anula-se e o fluxo é novamente zero. Entre estes dois pontos extremos, à medida que a densidade aumenta, verifica-se o aumento do fluxo, dado pelo produto da velocidade e da densidade, até um valor máximo, a capacidade. A partir deste ponto, tentativas de aumentar o fluxo resultam num escoamento instável, caracterizado por baixos fluxos e velocidades.

Tendo como pressuposto a uniformidade das correntes de tráfego e condições de escoamento permanentes e estáveis, vários autores propuseram formas funcionais para expressar a relação fluxo – velocidade ou fluxo – tempo de trajecto respeitante à parte estável da curva. Destas destacam-se as relações desenvolvidas no âmbito do programa de análise económica COBA (UK DOT, 2002), no Reino Unido, e as que estão presentes no Highway Capacity Manual (TRB, 2000) nos EUA. Lembre-se, contudo, que estas relações, que seguidamente se apresentam, são sempre aproximações estatísticas à realidade, possuindo esta um grau significativo de variabilidade.

a) Relações velocidade – fluxo: UK DOT

O Departamento de Transportes do Reino Unido propõe relações fluxo-velocidade para 11 combinações de tipos de infra-estruturas (estradas com uma faixa, estradas multivias, auto-estradas), e de ambientes (rural, suburbano, urbano). Cada uma das relações traduz-se por uma ou mais expressões onde são consideradas as principais características da via e do ambiente, como a inclinação, largura ou a frequência de intersecções. As expressões reflectem normalmente uma relação bi-linear entre o fluxo e a velocidade, ou linear, quando as condições básicas de circulação são menos favoráveis. Na Figura II.4 apresentam-se as curvas que resultam da aplicação da metodologia a estradas com diferentes velocidades livres, pertencentes à categoria “cidades de pequena dimensão”.

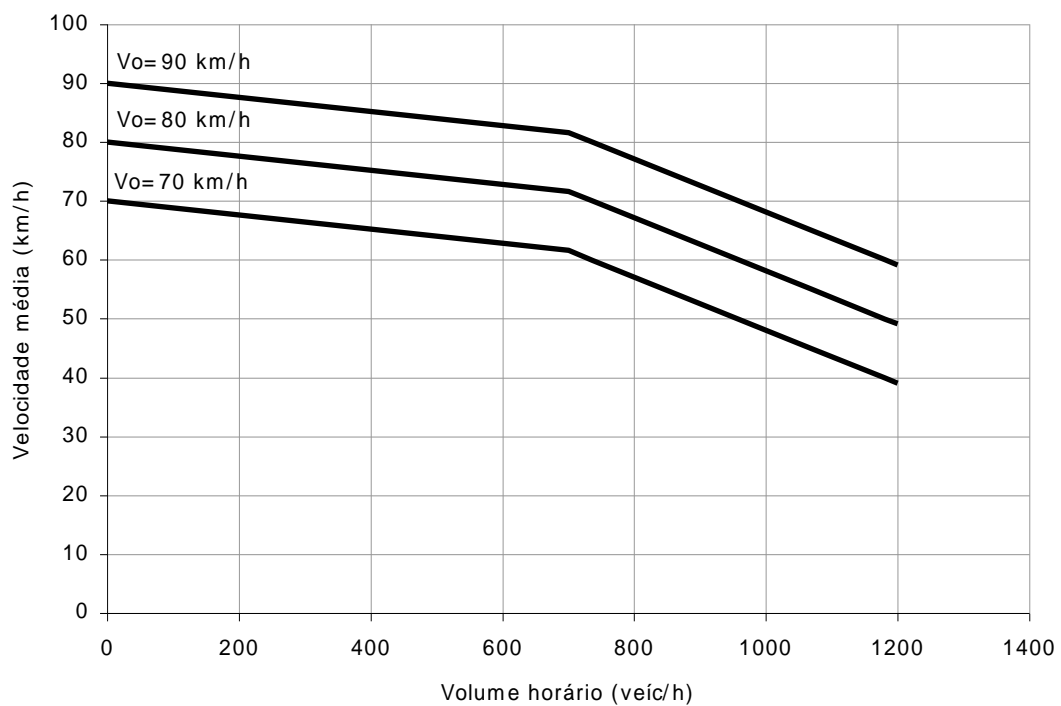


Figura II.4 – Curvas fluxo – velocidade de estradas de acesso a cidades de pequena dimensão (método COBA: UK DOT, 2002)

b) Relações velocidade – fluxo: Transportation Research Board

Na mais recente edição do Highway Capacity Manual (TRB, 2000) são propostos dois tipos fundamentais de relações entre o fluxo e a velocidade:

O primeiro, relativo a estradas com duas vias e dois sentidos, indica que a velocidade decresce linearmente com o volume de tráfego na estrada:

$$ATS = FFS - 0,0125Q_L - f_{np} \quad (IV.1)$$

sendo:

ATS..... velocidade média nos dois sentidos (km/h)

FFS..... velocidade em condições livres (km/h)

Q_L..... volume horário equivalente de veículos ligeiros no período de ponta de 15 minutos (UVE/h)

f_{np}..... factor dependente da percentagem de zonas com proibição de ultrapassar

O segundo, relativo a estradas multivias e auto-estradas, indica que a velocidade média é igual à velocidade livre mesmo para volumes de tráfego relativamente altos, e apenas se observa a redução da velocidade para fluxos de tráfego próximos da capacidade (ver a Figura II.5, relativa a estradas multivias).

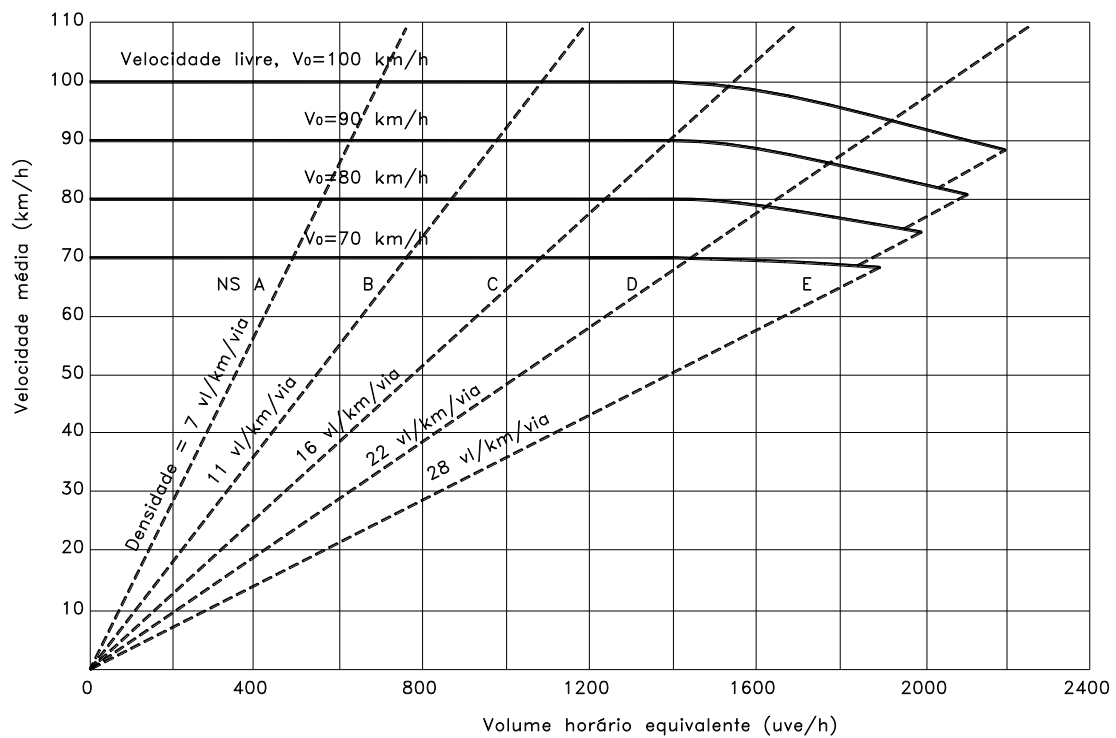


Figura II.5 – Curvas fluxo – velocidade de estradas multivias (TRB, 2000)

Para que estas relações sejam incorporadas em modelos de atribuição, torna-se necessário definir expressões suficientemente aproximadas com propriedades matemáticas adequadas sendo que, especificamente, as funções devem ser contínuas e diferenciáveis (Ortúzar e Willumnsen, 1990). As fórmulas seguintes foram desenvolvidas com esse propósito e possuem parâmetros de calibração que permitem o ajuste às representações anteriores:

- Fórmula BPR (Bureau of Public Roads, 1964)

$$t(Q) = t_0 \left[1 + \alpha \left(Q / Q_C \right)^\beta \right] \quad (\text{IV.2})$$

sendo:

t tempo de trajecto para o fluxo Q
 t_0 tempo de trajecto em condições livre
 α coeficiente de calibração
 β coeficiente de calibração
 Q fluxo atribuído
 Q_C capacidade da via

São assumidos normalmente os valores de 0,15 e 4 para os coeficientes α e β respectivamente (Thomas, 1991).

- Fórmula utilizada no modelo de simulação de tráfego SATURN (Hall, Van Vliet e Willumnsen, 1980)

$$\begin{aligned} T(Q) &= T_0 + \frac{T_C - T_0}{Q_C^n} Q^n & Q < Q_C \\ T(Q) &= T_0 + A Q_C^n + B \cdot \frac{(Q - Q_C)}{Q_C} & Q \geq Q_C \end{aligned} \quad (\text{IV.3})$$

sendo:

T tempo médio de trajecto no arco
 Q fluxo atribuído
 Q_C capacidade da via
 T_0 tempo de trajecto em condições livres
 T_C tempo de trajecto na capacidade
 B constante, expressa em segundos, igual a metade do período modelado
 n coeficiente de calibração

É de realçar que, para condições não saturadas ($Q < Q_C$), as duas formulações são funcionalmente equivalentes. A diferença é formal e reside no aspecto de a fórmula do Bureau of Public Roads (BPR) incluir um parâmetro (α) que relaciona os tempos de trajecto em condições livres e na capacidade, enquanto que na fórmula do SATURN os tempos de trajecto são explicitamente indicados para as duas situações. Para condições saturadas, a fórmula do SATURN prevê uma demora adicional, que é a média das demoras dos veículos em fila de espera.

II.2.3.2 Desempenho das intersecções

As demoras nas intersecções podem ser tratadas pelos modelos de simulação de duas formas fundamentais:

A primeira utiliza-se quando, apesar da opção pela representação simples das intersecções, se reconhece que as demoras sofridas nas intersecções são de tal ordem que não podem ser simplesmente ignoradas. Nesse caso, são desenvolvidas curvas fluxo – velocidade do tipo descrito no ponto anterior, mas em cujos processos de estimação de parâmetros são levadas em conta as demoras sofridas nas extremidades dos arcos. Este processo é descrito por McSheen e Hale (1989), no âmbito da construção de um modelo de simulação de tráfego da cidade do Kuwait, e algumas das curvas COBA (referidas no ponto anterior) são também deste tipo (classe 7 – áreas urbanas não centrais; classe 8 – áreas urbanas centrais).

A segunda forma de incorporar no modelo as demoras nas intersecções passa pela adopção do modo de codificação expandido (ver o ponto II.2.2). O tempo de trajecto associado a um determinado movimento de viragem pode ser tratado pelo modelo das seguintes maneiras:

- Introduzido directamente pelo utilizador, independente da procura e do fluxo conflituante;
- Calculado através de uma curva fluxo velocidade, independente do fluxo conflituante (EMME/2);
- Calculado através de uma curva fluxo velocidade dependente do fluxo conflituante (SATURN);
- Calculado em cada intervalo de tempo através da teoria *time-dependent*²(CONTRAM).

² A teoria constitui uma evolução relativamente aos modelos estacionários (*steady-state*), na medida em que leva em conta a ocorrência de períodos em que a procura excede a capacidade. Como exemplo de uma formulação *time-dependent*, pode referir-se a expressão para a demora em cruzamentos semaforizados, apresentada na versão mais recente do HCM (TRB, 2000), que corrige a demora *estacionária* prevista pela formulação de Webster em função do período de modelação e do grau de saturação.

Estas duas últimas abordagens dão lugar a estimativas das demoras de grande precisão, implicando, em relação às primeiras, um esforço adicional de codificação (caracterização do controlo da intersecção, fluxos de saturação, etc.).

II.2.4 Metodologias de atribuição de viagens à rede

II.2.4.1 Custo generalizado de deslocação

Um primeiro conceito que se encontra subjacente a todos os modelos de atribuição de tráfego é o do custo de deslocação. Caso um utilizador disponha de mais que uma alternativa para efectuar uma viagem, vai naturalmente ponderar uma série de factores para decidir o percurso a seguir.

Torna-se assim útil utilizar o conceito de *custo generalizado de deslocação*, como sendo uma função dos factores envolvidos na decisão. Alguns destes factores, como o conforto, os aspectos cénicos ou a perigosidade do percurso, são dificilmente quantificáveis e geralmente não são levados em conta nos processos de modelação. A expressão (II.4), adoptada frequentemente no Reino Unido, traduz o custo generalizado de deslocação da zona i para a zona j, através do modo k. Caso não esteja em causa a possibilidade de transferência modal, é possível adoptar a expressão simplificada (II.5) (ver Thomas, 1991).

$$c_{ij}^k = a_1 t_{ij}^k + a_2 e_{ij}^k + a_3 d_{ij}^k + T_{ij}^k + p_j^k + B^k \quad (\text{IV.4})$$

$$c_{ij}^k = a_1 t_{ij}^k + a_3 d_{ij}^k + T_{ij}^k \quad (\text{IV.5})$$

sendo:

- c_{ij}^k custo generalizado de deslocação da zona i para a zona j, através do modo k, em *pence*
- t_{ij}^k tempo de deslocação, dentro do veículo
- e_{ij}^k tempo adicional de deslocação, fora do veículo (deslocações a pé e esperas pelos transportes colectivos)
- d_{ij}^k distância percorrida no veículo
- p_j^k custos associados ao fim da viagem (tarifas de estacionamento, no caso de transporte individual)
- B^k penalidade modal (representa a *desutilidade* percebida do modo k)
- a_1 valor do tempo para os utilizadores, em *pence* por minuto
- a_2 valor do tempo adicional, normalmente assumido como $2a_1$
- a_3^k valor do quilómetro percorrido (custo do combustível no caso do transporte individual e das tarifas no caso de transporte públicos)

II.2.4.2 Atribuição tudo-ou-nada

O método mais simples de distribuir as viagens pela rede é através da chamada atribuição tudo-ou-nada. Trata-se simplesmente de, para cada par O-D, determinar o trajecto com o custo inicial mais baixo e carregar esse percurso com as viagens respectivas. Este método considera os custos de deslocação independentes do fluxo nos arcos, sendo assim apenas aplicável a redes pouco solicitadas.

II.2.4.3 Consideração da heterogeneidade e da inconsistência da população de condutores

Os condutores não são todos iguais. Alguns valorizam mais o tempo, outros a distância percorrida. Comete-se assim uma simplificação importante quando se assume a homogeneidade dos comportamentos. Para além desta variabilidade, há ainda que notar que pelo facto de um condutor num dia escolher um trajecto, nada garante que venha a repetir a opção noutro dia, mesmo em igualdade de circunstâncias – nesse dia pode valorizar de diferente forma os factores que contribuem para o custo da viagem. Outros ainda, pelo facto de não possuírem um conhecimento “completo” do sistema, optam por trajectos que, mesmo na sua perspectiva, não são os melhores. Os comportamentos dos condutores são portanto inconsistentes e heterogêneos.

É conceptualmente simples lidar com a variabilidade. Basta desagregar a matriz OD em diversas classes de utilizadores, sendo cada uma caracterizada por uma determinada atitude relativamente ao custo generalizado da viagem. Já no que respeita à inconsistência, muitos modelos optam por não a considerar e dizem-se determinísticos. Sucessivas simulações de um mesmo caso com um modelo determinístico resultam sempre na mesma distribuição de fluxos. Os modelos que, de alguma forma, procuram simular a inconsistência, dizem-se estocásticos. Nestes modelos, um ou mais elementos estão sujeitos a aleatoriedade e sucessivas simulações do mesmo caso não geram necessariamente resultados idênticos.

Há duas formas tradicionais de incorporar os efeitos estocásticos. A primeira refere-se a uma família de algoritmos em que o tráfego respeitante a um determinado par OD é distribuído pelos diferentes trajectos de acordo com uma curva do tipo Logit, com preferência pelo trajecto de custo mínimo. O algoritmo deste tipo mais conhecido é atribuído a Dial (1971). A abordagem alternativa utiliza simulações de Monte Carlo para representar a variabilidade dos custos percebidos. Os algoritmos deste tipo derivam de uma técnica desenvolvida por Burrell (1968), onde os custos de deslocação dos diferentes arcos da rede são retirados de uma distribuição, rectangular ou normal, cuja média é o custo real. Estes métodos de atribuição dizem-se estocásticos puros, na medida em que pressupõem a invariabilidade dos custos de deslocação nos arcos.

A consideração dos efeitos estocásticos é desejável, por princípio. Mas muitos modelos adoptam a abordagem determinística já que, por um lado, os recursos de computação exigidos são bastante inferiores e, por outro, como referido por Cantarella e Sforza (1991) e Van Vliet e Hall (1997), à medida que o congestionamento das redes aumenta, as diferenças entre os equilíbrios determinístico e estocástico tendem a esbater-se.

II.2.4.4 Atribuição em redes congestionadas

Os métodos de atribuição descritos nos pontos anteriores, tudo-ou-nada e estocástica pura, pressupõem custos de deslocação fixos, independentes do carregamento das vias. Ora, como visto no ponto II.2.3, os custos de deslocação nos arcos dependem da procura, pelo que a escolha de trajectos de um condutor específico é condicionada pelas opções dos restantes condutores. Tendo como subjacente a hipótese de que todos os condutores têm a mesma percepção dos custos de deslocação, Wardrop (1952) apresentou princípios de escolha de trajectos com base em dois tipos de comportamentos:

- Os condutores escolhem os seus percursos independentemente e no seu melhor interesse, com base nas condições de tráfego resultantes das escolhas de outros;
- Os condutores cooperam na escolha de trajectos tendo em vista produzir um padrão de tráfego que dê o máximo benefício à comunidade.

O primeiro tipo de comportamentos é traduzido pelo seguinte princípio:

“Em redes congestionadas, o tráfego distribui-se de modo a que os custos de deslocação em todos os trajectos utilizados entre cada par origem-destino sejam iguais. O custo de deslocação em qualquer um dos trajectos não utilizados é superior”.

O segundo tipo de comportamentos dá lugar a uma distribuição de tráfego tal que *“O custo global de deslocação de cada um dos trajectos utilizados é o mínimo possível”.* Trata-se do *Equilíbrio do Sistema*.

É consensual considerar que a escolha individualista de trajectos representa a aproximação mais realista, pelo que geralmente as técnicas de atribuição de tráfego procuram respeitar a primeira hipótese de Wardrop, conhecida por *Equilíbrio do Utilizador*.

Os modelos que procuram atingir um dos estados referidos dizem-se *modelos de equilíbrio*. Willumsen (2000) refere que a resolução analítica deste problema é possível, mas apenas em redes muito simples, preconizando em redes reais uma abordagem iterativa. Considera-se, nesse caso, que o modelo convergiu quando nenhum condutor consegue reduzir o seu custo de deslocação escolhendo um diferente trajecto. No caso de se procurar um equilíbrio estocástico, pelo facto de ser permitido aos utilizadores a

selecção de trajectos não óptimos, em redes congestionadas não é garantida a convergência para uma situação de equilíbrio (Van Vliet e Dow, 1979).

Na Figura II.6 apresenta-se uma classificação esquemática dos diferentes tipos de métodos de atribuição. Para além das classes indicadas, há ainda que considerar a atribuição tudo-ou-nada para diversas classes de utilizadores e a atribuição estocástica pura para várias classes de utilizadores.

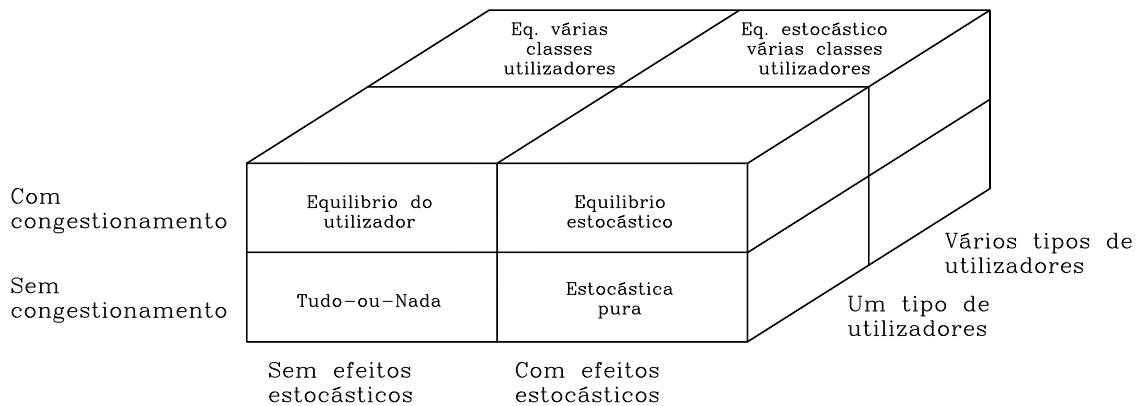


Figura II.6 – Classificação de métodos de atribuição (adaptado de Willumsen, 2000)

II.3 Modelos de simulação de tráfego

A aplicação dos conceitos e técnicas referidas no ponto anterior a uma rede viária é feita através de modelos computadorizados de simulação de tráfego. Estes modelos podem classificar-se quanto ao processo de escolha de trajectos (determinísticos/estocásticos), quanto à forma como são obtidas as soluções (analíticos/simulação), quanto à opção relativamente à incorporação de efeitos dinâmicos do tráfego (estáticos/dinâmicos) ou ainda relativamente ao nível de detalhe dos elementos modelados. Neste caso, classificam-se como macroscópicos, mesoscópicos ou microscópicos.

De seguida é apresentada uma descrição sumária dos diferentes modelos classificados em função deste último critério.

II.3.1 Modelos macroscópicos

Os modelos macroscópicos caracterizam-se pela análise integrada das correntes de tráfego, sendo os diversos estados do tráfego determinados através das relações entre as variáveis fundamentais do tráfego: fluxo, densidade e velocidade.

Dentro da categoria dos modelos macroscópicos distinguem-se os modelos de simulação e os modelos analíticos. Os primeiros, ditos “modelos convencionais”, podem ignorar os efeitos de congestão da rede (atribuição tudo-ou-nada ou estocástica pura), ou procurar um estado de equilíbrio. Neste caso, os tempos de trajecto nos arcos são calculados iterativamente através de curvas fluxo-velocidade.

Recentemente, tem sido desenvolvida investigação no sentido de aproveitar a simplicidade dos modelos macroscópicos para o desenvolvimento de estratégias de optimização de sistemas de controlo de tráfego. Trata-se da construção de modelos analíticos que estabelecem relações, mais ou menos complexas, entre as variáveis fundamentais das correntes de tráfego, representando a variação das condições de circulação ao longo do tempo. Relativamente aos modelos de simulação, pode referir-se as seguintes vantagens dos modelos analíticos:

- Conduzirem a soluções com propriedades bem compreendidas e definidas, permitindo uma actuação prescritiva (Lo *et al*, 1996);
- Terem um tempo de execução extremamente curto, possibilitando a aplicação em tempo real. Como exemplo deste tipo de modelos pode referir-se a aplicação METANET (Papageorgiou *et al*, 1990), utilizada para desenvolver estratégias de controlo de acessos ao *Boulevard Péripherique* de Paris.

O principal inconveniente apontado à abordagem analítica (Lo *et al*, 1996) é o de tornar a modelação da dinâmica dos veículos extremamente difícil, o que praticamente limita a aplicação destas técnicas a estradas multivias ou a auto-estradas.

II.3.2 Modelos mesoscópicos

Os modelos macroscópicos de simulação, referidos no ponto anterior, revelaram-se adequados à análise de redes interurbanas (ainda hoje são utilizados), mas apresentavam sérias limitações em meio urbano. É sabido que neste ambiente os cruzamentos assumem um papel fundamental na duração total dos percursos, pelo que os modelos convencionais, ao não considerarem explicitamente estas demoras, revelavam-se manifestamente inadequados. Esta deficiência foi sendo resolvida no final dos anos 70, quando os modelos mais avançados no Reino Unido começaram a incorporar explicitamente as demoras nos cruzamentos com recurso à teoria “*time-dependent*”. Desenvolvimentos posteriores permitiram a consideração dos efeitos de interacção, isto é, a simulação do efeito que um cruzamento tem noutros. Os modelos surgidos nesta altura, e que de alguma forma incorporam os efeitos de interacção, dizem-se mesoscópicos. São modelos que, embora sem descer ao detalhe dos veículos individuais, permitem a simulação de fenómenos de tráfego causados por comportamentos individuais.

De acordo com um estudo de Willoughby e Emmerson (1999), os modelos agregados mais utilizados são o SATURN (Hall, Van Vliet e Willumnsen, 1980), que utiliza a técnica dos *perfis cíclicos de fluxos*, e o CONTRAM (Leonard *et al*, 1978), que recorre à técnica da *atribuição dinâmica*.

A técnica dos perfis cíclicos de fluxos foi originalmente desenvolvida para o programa de optimização semafórica TRANSYT, cuja primeira aplicação prática teve lugar em 1967 (ver Robertson, 1997). Parte do princípio que, em consequência da existência de semáforos programados com tempos fixos, os padrões de tráfego, nomeadamente as demoras, os fluxos de chegada e partida dos cruzamentos, são cíclicos durante o período modelado. A técnica consiste em reduzir o problema de simulação à análise das interacções entre veículos que ocorrem num único dos perfis cíclicos de fluxos, uma vez que os restantes são idênticos. O ciclo é dividido num número finito de intervalos e as interacções são calculadas em cada um desses intervalos.

Com o método da atribuição dinâmica, a procura de tráfego dentro de cada segmento de tempo considerado é dividida em “pacotes” de veículos. Estes pacotes são atribuídos sequencialmente a uma rede progressivamente carregada, sendo determinado, para cada sub-intervalo de tempo, o segmento onde o pacote se encontrará. O número de veículos no pacote é adicionado ao fluxo existente na via. Em função da nova estimativa de fluxos, são actualizados os custos de deslocação e determinados novos trajectos de custo mínimo para o próximo pacote. O processo é repetido até que todos os pacotes tenham sido atribuídos.

II.3.3 Modelos microscópicos

Nos últimos anos tem-se assistido a uma utilização progressivamente maior dos chamados Sistemas Inteligentes de Tráfego, como forma de lidar com o congestionamento em redes muito solicitadas. A avaliação da efectiva eficácia deste tipo de estratégias de regulação levanta algumas dificuldades:

- Os benefícios da introdução destes sistemas e das respectivas estratégias de regulação são relativamente modestos, de magnitude frequentemente inferior à variabilidade diária do tráfego, pelo que a comparação entre duas situações distintas obriga à recolha de uma grande quantidade de dados, como forma de reduzir os intervalos de confiança das estimativas (Fox *et al*, 1998);
- A implementação no sistema real de novas estratégias de regulação está sempre sujeita a efeitos inesperados e indesejáveis, pelo que as entidades gestoras estão normalmente pouco interessadas em testes nos sistemas de controlo. A fase de implementação deverá efectuar-se, preferencialmente, apenas com a solução final, previamente testada. Este ponto sugere a utilização de modelos de

simulação de tráfego para testar as diversas alternativas, em ambiente controlado.

Os modelos descritos anteriormente descrevem o tráfego como blocos homogêneos que obedecem a relações simples entre fluxo e velocidade, o que é manifestamente insuficiente para a avaliação destes sistemas, onde o controlo é feito ao nível do veículo (por exemplo, a alteração da sequência de fases num cruzamento semaforizado, despoletada pela actuação de um detector). É nesta perspectiva que uma nova classe de modelos, ditos microscópicos, tem vindo a ganhar protagonismo.

Os modelos microscópicos procuram reproduzir a dinâmica de cada veículo na rede, com base em características dos condutores e dos veículos. O sub-modelo de “seguimento” (*car-following*) é fulcral aos modelos microscópicos e tem como objectivo gerar a resposta de um condutor relativamente ao veículo que segue à sua frente. Esta teoria foi proposta por Reuschel (1950) e Pipes (1953) e desenvolvida por Herman *et al* (1959). As expressões desenvolvidas por estes autores têm como pressuposto que a aceleração do veículo seguidor é proporcional à velocidade do líder e ao inverso da distância. Nos modelos mais recentes os condutores aceleram ou desaceleram apenas para atingir a velocidade pretendida ou para evitar a colisão com o líder (Benekolal e Treiterer (1998) e Hossain e McDonald (1998).

Os modelos microscópicos utilizam ainda os sub-modelos “Intervalo de aceitação” e “Mudança de via”. O primeiro determina se um veículo pode avançar numa intersecção. Esta decisão depende do intervalo de tempo disponível pelo veículo em causa para se inserir em segurança na corrente de tráfego concorrente. O sub-modelo “Mudança de via” determina a motivação e possibilidade para um condutor mudar de via, tendo por base o seu objectivo próximo. A mudança pode ser obrigatória caso o condutor necessite de mudar de direcção. Será opcional caso a mudança seja justificada pelo desejo de aumento de velocidade. A oportunidade de mudar é determinada pela relação entre o benefício e o risco associado à manobra (ver Kaman, 1996).

Cada um destes sub-modelos é sensível às características do condutor e do veículo. Assim, é necessário indicar valores médios como a “agressividade” dos condutores e o desempenho dos veículos. Os valores individuais são posteriormente obtidos com base em distribuições de probabilidades centradas nestes valores médios, através de simulações de Monte Carlo.

A evolução recente dos modelos microscópicos tem sido bastante rápida. Chin (1991) referenciou cerca de uma dezena de modelos, a maior parte deles de âmbito restrito e ainda em desenvolvimento. Já no projecto europeu SMARTTEST (SMARTTEST, 1999) foram identificados 58 modelos, sendo 9 destes produtos comerciais. Verifica-se também que houve uma aposta forte dos países europeus em geral e do Reino Unido em

particular no desenvolvimento deste tipo de modelos, contrariando a situação avaliada por Chin (*op. cit.*), onde o papel dominante era assumido pelos EUA.

II.4 Sequência geral de desenvolvimento de modelos de simulação de tráfego

Tal como referido no Capítulo I, não caem no âmbito desta investigação as questões da validação conceptual e do modelo computadorizado. Admite-se que estes aspectos foram devidamente tratados e que o modelo seleccionado é adequado para tratar o problema em causa. O trabalho enfatiza portanto a questão do desenvolvimento e da validação operacional do modelo, do ponto de vista do utilizador final.

Silva e Tyler (2001), Law e Kelton (2000) afirmam que não existe uma abordagem definitiva para validar todo e qualquer modelo de simulação uma vez que o método apropriado é altamente dependente da natureza do fenómeno simulado. Considerou-se, contudo, que o esquema que se apresenta na Figura II.7 representa a sequência tradicional de utilização de um modelo (a ilustração do processo alude a modelos de simulação de tráfego, mas a sequência é aplicável a qualquer outro tipo de modelos).

O objectivo final deste processo é avaliar, à priori, o desempenho do sistema face a diferentes cenários futuros de procura possível e a uma ou mais opções de intervenção no sistema em avaliação. Para tal, é necessário um modelo com capacidade comprovada de simular o estado do sistema em função de elementos explicativos diferentes daqueles que se verificam no sistema base. Os principais passos são:

1. Recolha de dados e codificação. Neste passo são recolhidas e codificadas num formato adequado as informações requeridas pelo modelo (características dos arcos e dos cruzamentos, descrição da procura). Para além destes dados, do tipo independente ou explicativo, são também necessários indicadores do estado do sistema real, para as fases de calibração e validação (fluxos de tráfego, demoras, filas de espera);
2. Simulação do sistema base, com base nos dados explicativos do sistema e em parâmetros assumidos por defeito;
3. Análise qualitativa dos resultados, tendo como termo de comparação o conhecimento pessoal do sistema. Trata-se de avaliar a razoabilidade dos resultados para detectar erros grosseiros (verificar os trajectos adoptados entre pares OD, avaliar as demoras nos cruzamentos, etc.). Caso sejam detectados erros importantes, torna-se necessário rever o processo de tratamento de dados;

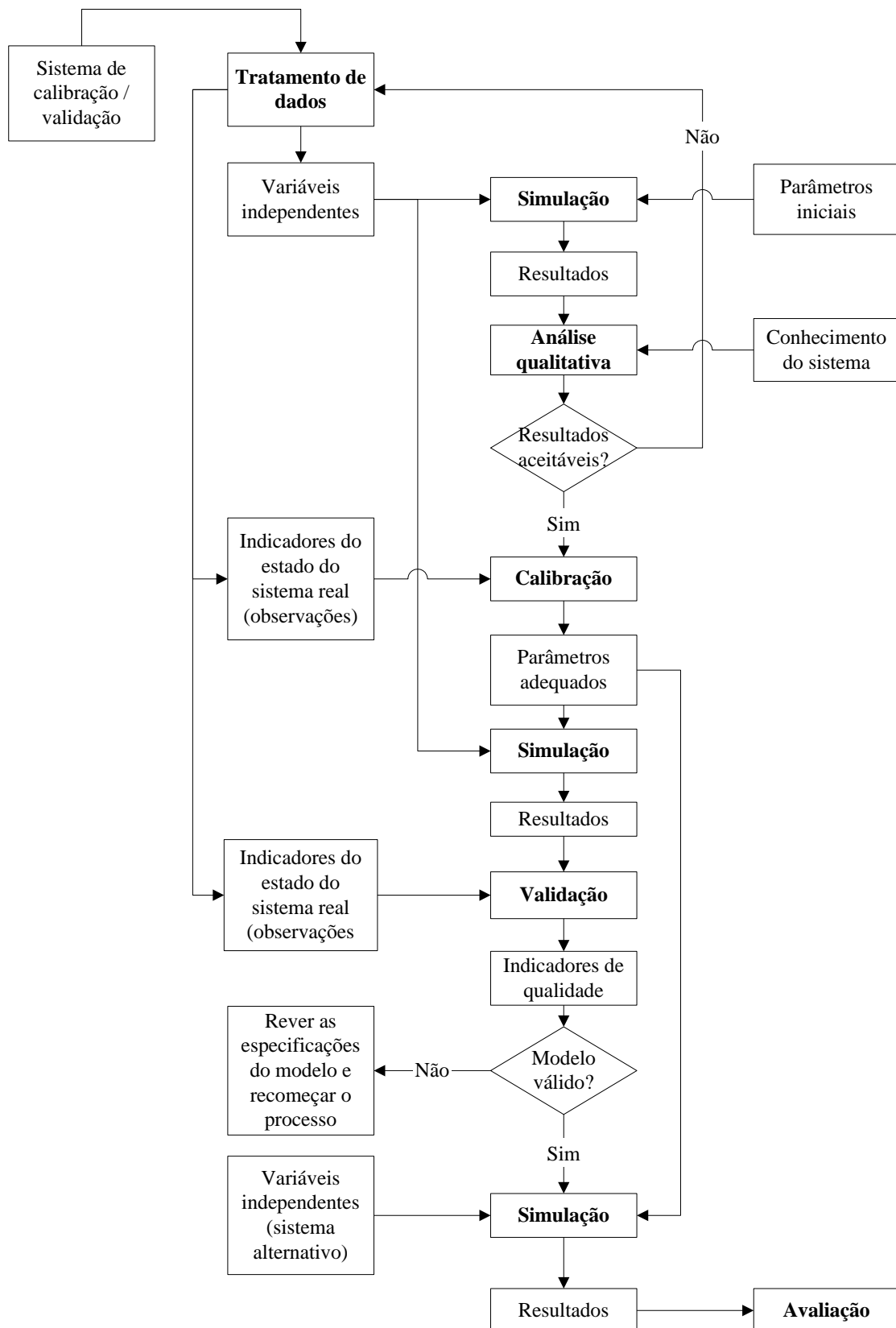


Figura II.7 - Desenvolvimento e validação operacional de um modelo de simulação de tráfego: método tradicional

4. Calibração: no fim da análise qualitativa deverão ter sido eliminados praticamente todos os erros grosseiros nas variáveis independentes. Assim sendo, será de esperar que no início desta fase sejam detectáveis essencialmente erros sistemáticos, indicativos da desadequação do valor dos parâmetros para as condições locais. O objectivo da calibração é portanto o de ajustar estes valores de modo a que as estimativas reflectam os valores observados. Para esta fase são necessários dados representativos do estado do sistema (como fluxos de tráfego, tempos de trajecto ou matrizes em secção), preferencialmente do mesmo tipo daqueles que se consideram mais importantes para o processo de decisão (UK DOT, 1991);
5. Validação: O facto de o modelo simular correctamente os elementos do sistema utilizados na calibração não garante a sua capacidade para simular condições distintas. Na realidade, a existência de erros nas variáveis independentes ou nos indicadores do estado do sistema poderá conduzir a que no processo de calibração sejam adoptados parâmetros incorrectos, que embora permitam gerar resultados aparentemente representativos da situação de referência, fazem com que o modelo seja incapaz de simular correctamente situações distintas. Assim, e de acordo com as normas britânicas (UK DOT, *op. cit.*), validação é o processo que determina a adequabilidade do modelo calibrado, quer através de comparações de estimativas produzidos pelo modelo com dados não utilizados na calibração, quer através da quantificação directa da precisão das estimativas;
6. Previsão: Pode-se afirmar nesta fase que os processos de caracterização da rede e de quantificação dos parâmetros foram correctamente efectuados. Assim, o modelo está apto a produzir informações fidedignas relativas ao desempenho do sistema face a diferentes variáveis independentes, tanto ao nível da procura como da infraestrutura. Para este efeito é necessário dispor de pelo menos dois conjuntos de dados explicativos. O primeiro é relativo ao sistema base, admitindo que não houve intervenções na rede ou que estas se limitaram ao mínimo indispensável para fazer face às variações da procura (*do-nothing / do-minimum*). O segundo conjunto traduz as alterações cujos benefícios se pretendem avaliar (*do-something*). A decisão de introduzir ou não as alterações na rede deverá então ser condicionada pela análise comparativa do desempenho previsível destes dois sistemas.

Embora o processo descrito seja conceptualmente simples, a sua aplicabilidade depende da utilização de conjuntos de observações independentes entre si, nas fases de calibração e validação. Ora, como afirmam Law e Kelton (2000), os *outputs* de quase todos os sistemas do mundo real e das simulações estão correlacionados. Por exemplo, ao nível macroscópico, verifica-se a dependência entre os fluxos de tráfego afluentes e efluentes de um nó; ao nível microscópico, a posição de um veículo não é independente da posição ocupada no instante anterior nem da posição ocupada pelo veículo que se

desloca à sua frente, o mesmo acontecendo com outras variáveis como a velocidade e a aceleração³. Este problema pode ser mitigado das seguintes formas:

- Utilização de variáveis para calibração de natureza distinta daquelas que são utilizadas na validação (por exemplo, calibração do intervalo crítico de aceitação nos cruzamentos prioritários através de comparações entre as filas de espera observadas e modeladas, e validação recorrendo a comparações entre fluxos de tráfego);
- Utilização de variáveis do mesmo tipo, mas “suficientemente independentes”. Por exemplo, a utilização de contagens de tráfego obtidas em locais perfeitamente distintos, no que respeita à origem e destino dos condutores intersectados.

Uma opção aparentemente mais robusta para lidar com o problema da correlação das variáveis é esquematizada na Figura II.8 e implica a utilização de dois sistemas físicos de referência (por exemplo, as redes viárias de uma cidade antes e depois da abertura ao tráfego de um eixo estruturante). O primeiro é utilizado exclusivamente para calibrar os parâmetros e o segundo para validar e aplicar o modelo.

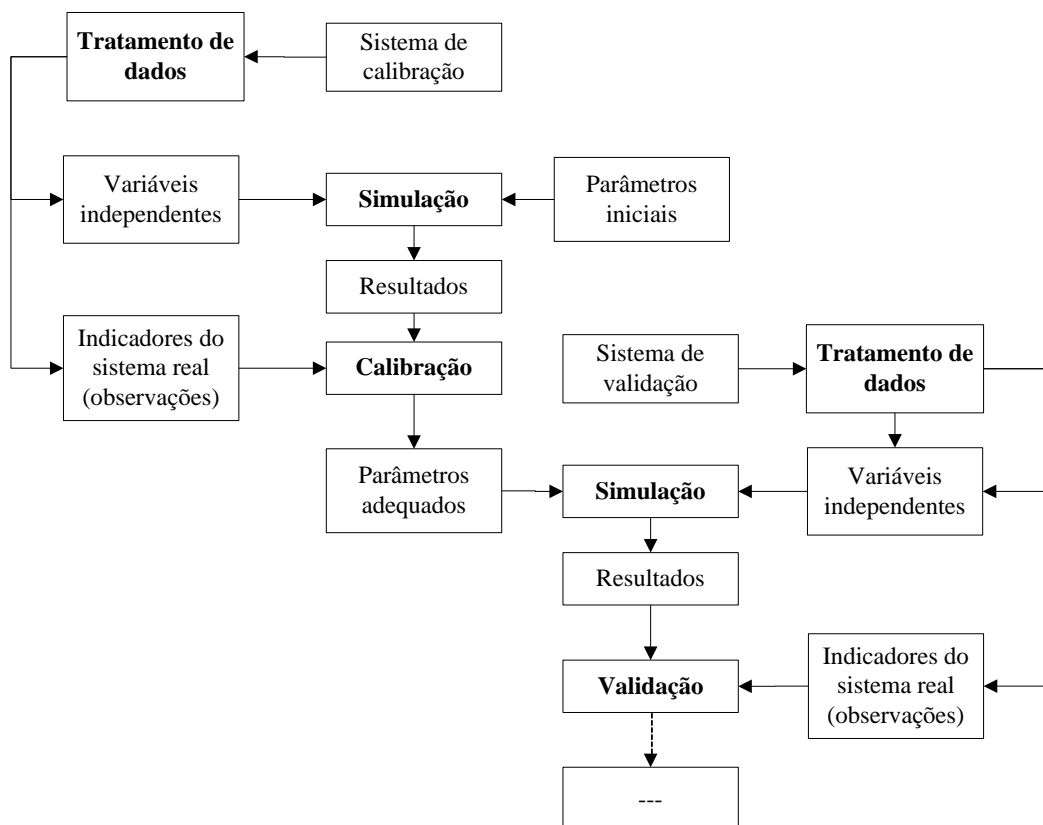


Figura II.8 – Desenvolvimento e validação operacional de um modelo de atribuição: método alternativo

3 Aycin e Benekohal (1999) chegaram mesmo a admitir a inaplicabilidade de métodos estatísticos clássicos para validar modelos a este nível, recomendando a inspeção visual do movimento dos veículos como um método mais adequado.

O inconveniente desta alternativa é precisamente a necessidade de modelar dois sistemas (embora semelhantes) e de recolher os dados de entrada relativos a cada um. A principal vantagem é a de se garantir a independência dos dados utilizados para calibrar e validar o modelo, o que permite obter uma estimativa realista do erro cometido quando o modelo é utilizado para simular condições diferentes daquela que foi utilizada na calibração.

Esta técnica de validação foi utilizada num estudo sobre a aplicabilidade de modelos de microsimulação em redes congestionadas (Middleton e Cooner, 1999). Ficou demonstrado que os mesmos modelos, que representavam com grande rigor uma situação base, vinham a apresentar um desempenho inaceitável quando se tratava de comparar os resultados da simulação com os padrões de tráfego reais que se verificaram após um número limitado de intervenções no sistema base.

Uma outra alternativa de validação, mas que se pode considerar um caso particular da anterior (dois sistemas de tráfego), é a utilização dos padrões de tráfego de um período (manhã) para calibrar e os padrões de outro período (tarde) para validar. Aqui, a diferença nas variáveis independentes limita-se à matriz OD, pelo que o método é de mais fácil aplicação e não implica um intervalo temporal demasiado longo⁴ entre o período de calibração e validação.

II.5 Impacto dos erros de quantificação em modelos de simulação de tráfego

Tal como se viu nos pontos anteriores, há inúmeras fontes de erros, ou imprecisões, associadas à modelação das diversas características dos sistemas viários reais, importando distinguir duas grandes categorias de erros, consoante estes sejam ou não controláveis pelo utilizador final.

Na primeira incluem-se todos aqueles que se encontram a montante da modelação de um sistema real concreto. São os erros de especificação e computação (como, por exemplo, a eventual decisão de assumir comportamentos consistentes dos condutores ou velocidades constantes ao longo dos arcos), cujas implicações no rigor das estimativas são avaliadas através dos processos de validação do *modelo conceptual* e do *modelo computadorizado*, tal como referido no Capítulo I.

Na segunda categoria incluem-se os erros associados à modelação de um sistema em particular. São, em certa medida, controláveis pelo utilizador, implicando um compromisso entre o rigor e o custo de desenvolvimento do modelo. Neste processo distinguem-se duas sub-fases, associadas a erros de tipologias muito diferentes:

⁴ Middleton e Cooner contornaram este problema de uma forma simples. Uma vez que as intervenções estavam concluídas à data do início da investigação, utilizaram a rede viária anterior para calibrar o modelo (uma vez que havia um registo importante de contagens automáticas de tráfego) e a rede actual para validar o modelo.

- *Definição da estrutura do modelo seleccionado.* As decisões relativas à área de estudo e ao detalhe com que é modelada são essencialmente tomadas em função dos objectivos a atingir com o modelo. É aqui que têm origem os erros de *simplificação*, decorrentes, por exemplo, da definição do número de níveis hierárquicos das vias a representar, do número de zonas e ligações dos centróides ou do modo de segmentação da procura ao longo do período.
- *Desenvolvimento do modelo/estrutura assumido ao longo das fases anteriores.* Aqui, a qualidade do modelo fica condicionada pelos erros de *quantificação* dos diversos *inputs*: variáveis independentes e parâmetros (ver a Figura II.7 e a Figura II.8).

O utilizador/modelador tem assim a responsabilidade de intervir ao longo de diversas etapas com consequências no desempenho e na utilidade do modelo. Nomeadamente, na opção pela tipologia mais adequada, na definição da estrutura do modelo e finalmente na definição do grau de rigor com que se quantificam os diversos *inputs*.

No que respeita especificamente a esta última etapa, a tarefa do analista é dificultada por diversos factores. Por um lado, são exigidos determinados níveis de precisão das estimativas produzidas pelo modelo⁵, mas não existem quaisquer referências que sugiram os níveis de precisão mais adequados na quantificação das variáveis independentes. Por outro lado, são mal conhecidas as próprias relações entre os erros cometidos ao nível dos *inputs* e os graus de imprecisão resultantes ao nível dos *outputs* dos modelos.

Compreende-se, assim, que a racionalização do processo de desenvolvimento de um modelo passa por uma melhor compreensão da forma como os diferentes níveis de precisão dos *inputs* se reflectem no desempenho dos modelos. A definição e teste de uma metodologia que permite suportar este tipo de análises é objecto do próximo capítulo.

II.6 Síntese

Nos pontos anteriores foi feita uma apresentação dos diferentes modos de abordar a questão do planeamento e gestão das infra-estruturas de transportes. Foi possível associar a cada uma destas abordagens uma tipologia de modelos. O modelo clássico dos quatro passos, normalmente incluindo um modelo de atribuição “convencional”, sustentava o desenvolvimento dos projectos de planeamento estratégico, de longo prazo. Os planos locais, de médio prazo, têm vindo a ser avaliados com ênfase sobre a fase de atribuição, com ou sem a consideração dos efeitos da interacção do tráfego. Finalmente,

⁵ No ponto III.5.4 apresentam-se recomendações de validação onde são especificados os critérios de qualidade a atingir para diferentes tipos de modelos.

o desenvolvimento dos sistemas inteligentes de tráfego tem promovido a evolução dos modelos microscópicos, bem como de modelos analíticos, macro ou mesoscópicos.

Embora presentemente os modelos de microsimulação estejam em grande desenvolvimento, os modelos mesoscópicos são ainda a família dominante, representado o *state-of-practice* em todo o mundo. Entendeu-se portanto que a investigação deveria ser prosseguida com um modelo deste tipo.

Da análise do processo geral de construção e validação de um modelo de simulação, foi possível identificar a importância da qualidade dos dados explicativos – as variáveis independentes – para a qualidade final das previsões, na medida em que erros nestes elementos comprometem os processos subsequentes, nomeadamente, as fases de calibração, de validação e de avaliação. Da mesma forma, ficou clara a importância da qualidade dos dados utilizados para calibrar o modelo – indicadores do estado do sistema – uma vez que é com estes que são determinados os valores dos parâmetros, que por sua vez são *inputs* do módulo de simulação.

Do que foi dito, conclui-se que se justifica plenamente proceder de forma mais aprofundada e quantitativa ao estudo das relações entre incorrecções / erros de quantificação e qualidade dos modelos e, a partir dessa análise, contribuir para uma melhor compreensão da verdadeira aplicabilidade prática (que não da sua validade científica intrínseca) de modelos deste tipo.

III DEFINIÇÃO DE UMA METODOLOGIA DE ANÁLISE

III.1 Enquadramento

Nos pontos anteriores foi visto que os modelos estão sujeitos a diferentes tipologias de erros, como os erros de especificação, computacionais, de agregação / simplificação e de quantificação. As duas primeiras tipologias não são da responsabilidade do utilizador, admitindo-se para esta análise que foram devidamente considerados nas fases de validação correspondentes. Relativamente aos erros de simplificação, apesar de poderem assumir um papel decisivo na qualidade global do modelo, também não foram considerados nesta análise, assumindo-se que o analista adequa correctamente a estrutura do modelo ao problema em análise. A investigação recai assim sobre os erros de quantificação, sobre o modo como estes afectam a robustez do modelo e, conseqüentemente, sobre as condições de aplicabilidade do modelo a determinados fins.

Como atrás ficou patente, a obtenção de uma solução com um modelo de simulação de tráfego é uma operação que normalmente se revela bastante complexa, face ao número de variáveis e relações envolvidas. Como tal, é praticamente impossível prever o valor que uma determinada variável dependente tomará quando se comete um erro na quantificação de uma ou mais variáveis independentes, ou seja, estabelecer uma relação determinística pura entre os dois níveis de erros.

Mas esse nível de conhecimento também não é essencial. Na maioria das vezes basta conhecer o padrão de variação dos resultados com os erros nos *inputs*, sendo já suficientemente bom conhecer a resposta a questões como: “o erro origina uma estimativa por excesso ou por defeito?”, “existe uma gama de erros nos dados com impactos desprezáveis?”, “é mais gravoso haver concentração ou dispersão de erros?”. Ou seja, o conhecimento do tipo de sensibilidade do modelo aos erros nos dados é já um dado valioso.

As análises de sensibilidade, no sentido tradicional, não representam qualquer inovação. É vulgar a sua aplicação para demonstrar o comportamento de uma variável dependente face a variações em uma ou mais variáveis independentes (por exemplo, relacionar as demoras num cruzamento semaforizado face ao ciclo, restringindo outras variáveis independentes, como a taxa de saturação, duração das fases, fluxo de saturação). Já no que respeita à avaliação da sensibilidade de variáveis quando integradas em modelos de simulação, praticamente não se identificaram trabalhos de investigação.

Como excepção pode referir-se o trabalho de Martin e Douglas (1983) que descreveram o desenvolvimento de um programa cujo objectivo era facilitar a avaliação do impacto

de diversas assumpções ao nível do modelo de atribuição, sobre a distribuição final de fluxos. Basicamente, o programa comparava os resultados de duas atribuições idênticas em todos os aspectos à excepção da relação *custo do tempo / custo da distância*, que é utilizada para quantificar o custo de utilização de um determinado arco. O programa produzia um índice de estabilidade que indicava a percentagem de viagens que era reafectada, assim como a identificação dos arcos onde as alterações assumiam particular importância, evidenciando situações de instabilidade que justificariam maior atenção por parte do analista (por exemplo, recorrendo à análise das matrizes em secção dos arcos com oscilação de tráfego entre diferentes atribuições, permitindo a identificação dos pares OD envolvidos).

Uma outra linha de investigação é seguida por autores como Smith (1984), Dafermos e Nagurney (1984), Tobin (1986), Friesz (1990), Ban *et al* (2002) e Clark e Watling (2002), que estudam o desenvolvimento de relações analíticas entre causa e efeito, tendo já apresentado resultados preliminares promissores, embora em redes extremamente simples.

Relativamente a esta abordagem analítica, importa realçar o carácter teórico das investigações, pelo que a efectiva aplicabilidade destes métodos a redes reais e situações concretas parece estar ainda longe de ser uma realidade. A presente investigação seguiu a linha traçada por Martin e Douglas (*op. cit.*), mas com as seguintes diferenças fundamentais:

- Procurou-se desenvolver uma metodologia para a avaliação do impacto de erros decorrentes dos métodos tradicionais de recolha de dados e de calibração de parâmetros, por oposição a perturbações genéricas;
- A metodologia deveria permitir a avaliação do impacto de erros em todo o tipo de dados e não apenas em parâmetros globais;
- Deveria ser avaliada a influência da distribuição espacial dos erros ao nível dos dados e dos resultados.

Neste capítulo, após a apresentação dos princípios fundamentais e da estrutura da metodologia de análise, identificam-se diversos tipos de problemas pertinentes, aos quais esta metodologia é aplicável. De seguida, apresenta-se e justifica-se um método que permite simular os erros de quantificação e, finalmente, apresenta-se uma análise comparativa dos indicadores de funcionamento do sistema, das medidas estatísticas e dos indicadores de aderência à realidade, essenciais para avaliar quantitativamente o desempenho do modelo face às diversas tipologias de problemas/erros em análise.

III.2 Princípios fundamentais da metodologia de análise

Considere-se um estado particular de um sistema real $\mathbf{Y}_R = f(\mathbf{X}_R)$, cujo desempenho é caracterizado por um conjunto de variáveis Y_{Ri} e causado (ou explicado) pelas variáveis X_{Ri}

$$\mathbf{Y}_R = [y_1, y_2, \dots, y_n]$$

$$\mathbf{X}_R = [x_1, x_2, \dots, x_n]$$

Um modelo procura reproduzir as relações observadas entre as variáveis explicativas e dependentes, constituindo um sistema virtual potencialmente *perfeito* $\mathbf{Y}_P = g(\mathbf{X}_P)$. Trata-se de uma descrição matemática do problema, que pressupõe a introdução de um conjunto de simplificações, em parte inerentes ao próprio modelo e em parte assumidas pelo analista, pelo que os dois estados (físico e virtual) não coincidem.

Acrescenta ainda que o carácter contínuo e/ou aleatório das variáveis explicativas implica a existência de erros de quantificação. Assim sendo, a previsão do estado do sistema passa a assentar nas variáveis explicativas X_{E1i} , pelo que a representação virtual *possível* do sistema físico é $\mathbf{Y}_{E1} = g(\mathbf{X}_{E1})$.

Neste trabalho pretende-se avaliar a importância dos erros de quantificação (afastamento entre \mathbf{X}_R e \mathbf{X}_{E1}) na qualidade de representação do sistema físico (afastamento entre \mathbf{Y}_R e \mathbf{Y}_{E1}). Para tal é assumido que, tendencialmente, existe uma relação directa entre esse afastamento e o afastamento dos dois modelos virtuais (\mathbf{Y}_P e \mathbf{Y}_{E1}).

Particularizando, o sistema \mathbf{Y}_R constitui um sistema real urbano de tráfego, caracterizado por variáveis Y_{Ri} como fluxos, tempos de trajecto e filas de espera. O estado do sistema é causado por variáveis X_{Ri} – capacidade das vias, características funcionais da rede, etc.

O método adoptado implica o desenvolvimento de um modelo de simulação de tráfego representativo deste sistema, processo que tanto quanto possível deve seguir o actual estado-da-arte, em particular no que respeita aos processos de calibração e validação, e onde, inevitavelmente, são cometidos erros dos diversos tipos. No entanto, após esta fase é assumido que este modelo “possível”, \mathbf{Y}_{E1} é de facto o modelo “perfeito” \mathbf{Y}_P , ou seja, que não são cometidos quaisquer erros de quantificação no seu desenvolvimento – todos os valores codificados são exactos. Constitui assim o sistema virtual de referência \mathbf{Y}_P e pode ser considerado como a representação exacta de uma realidade possível, muito próxima daquela que se pretendia simular. O desenvolvimento deste modelo base é objecto do próximo capítulo.

A simulação de erros de quantificação é feita com recurso a um modelo “possível” Y_{E2} , baseado no modelo “perfeito” Y_{E1} , sendo que todas as diferenças nos dados representam os erros de quantificação cujas implicações se pretende analisar, na medida em que não são introduzidas alterações estruturais (como a modificação das ligações dos centróides à rede ou da tipologia de funcionamento de um nó). No ponto seguinte discute-se a tipologia de erros a estudar.

O passo final consiste em comparar os estados Y_{E2} e $Y_P \equiv Y_{E1}$, obtidos após as respectivas “corridas” do modelo. Tendencialmente, a diferença entre os dois estados reflecte o verdadeiro impacto dos erros de quantificação e permite a avaliação do contributo das diversas variáveis explicativas. Note-se, todavia, que não sendo conhecidas com exactidão as consequências dos erros devidos às restantes tipologias de erros (especificação, simplificação), não se pretende estabelecer uma relação de causalidade precisa entre estas diferenças e os erros reais, podendo haver fenómenos localizados de compensação ou ampliação de erros. Consequentemente, os impactos dos erros são analisados de modo principalmente qualitativo, identificando-se tendências e importâncias relativas.

III.3 Tipos de questões relevantes

Considerou-se que, de entre o conjunto de questões que se podem colocar a um analista no que respeita à influência dos erros de quantificação sobre a aplicabilidade do modelo, a maioria cai dentro de uma das categorias apresentadas de seguida, e às quais correspondem outros tantos tipos de análises, suportadas pela metodologia descrita:

- Avaliação do impacto dos erros de quantificação na qualidade global dos modelos;
 - Avaliação do desempenho do modelo em função da quantidade de erros que se cometem na quantificação de uma variável de ocorrência múltipla;
 - Análise de eventuais efeitos de potenciação / compensação de impactos quando são cometidos erros de quantificação em duas ou mais variáveis simultaneamente;
 - Identificação e caracterização dos elementos da rede que mais condicionam a qualidade do modelo;
 - Avaliação da importância da inter-relação espacial dos elementos onde são cometidos os erros de quantificação;
 - Avaliação dos eventuais processos de degradação espacial dos impactos;
 - Avaliação da importância do ambiente rodoviário;
 - Importância do contexto de modelação.
- a) *Avaliação do impacto dos erros de quantificação na qualidade global dos modelos.*
Nesta secção trata-se essencialmente de compreender melhor a forma como, em

traços gerais, evolui a qualidade *global* do modelo face a diferentes intensidades e combinações de erros numa determinada variável, de ocorrência singular ou múltipla⁶, decorrentes dos processos tradicionais de quantificação de variáveis (observações e sub-modelos);

- b) *Avaliação do desempenho do modelo em função da quantidade de erros que se cometem na quantificação de uma variável de ocorrência múltipla.* Com esta análise, procura-se saber como varia o desempenho do modelo face ao *número* ou *proporção* de ocorrências de uma mesma variável em que foram cometidos erros de uma determinada gravidade. Esta informação permite, por exemplo, estimar o esforço de codificação que implica a transição de um nível de validação para outro mais exigente;
- c) *Análise de eventuais efeitos de potenciação / compensação de impactos quando são cometidos erros de quantificação em duas ou mais variáveis simultaneamente.* Nos processos reais de modelação os erros não ocorrem num único tipo de variáveis. Na verdade, serão espectáveis situações em que cada uma das variáveis está sujeita a erros de diferentes tipologias e intensidades, cujas combinações poderão potenciar ou limitar as imprecisões ao nível das estimativas do modelo. Interessa assim estabelecer um paralelo com as respostas às questões anteriores, ou seja, conhecer a verdadeira importância dos erros numa variável adicional, sabendo que no modelo em causa foram já cometidos erros de diversos tipos;
- d) *Identificação e caracterização dos elementos da rede que mais condicionam a qualidade do modelo.* Os resultados decorrentes dos pontos anteriores são genéricos, indicando o modo como a qualidade global do modelo varia em função de um conjunto de erros, em variáveis uniformemente distribuídas pela rede ou de âmbito global. Com esta secção pretende-se ir um pouco mais longe e identificar os elementos da rede que exercem um papel mais significativo sobre a qualidade do modelo, através de duas subclasses de análises:
 - i. *Identificação e caracterização dos elementos da rede cuja má caracterização mais condiciona o desempenho do modelo.* Enfatiza-se agora o papel das características intrínsecas e operacionais do “elemento” da rede na sua sensibilidade aos erros de quantificação, por oposição às análises referidas nos pontos anteriores, em que se estuda a importância das variáveis ou da tipologia do erro; A identificação de relações de causalidade entre determinadas características dos elementos da rede e o impacto global dos

⁶ Cada uma das ocorrências de uma “variável de ocorrência múltipla” caracteriza um elemento específico da rede, como acontece com a velocidade livre, relativamente a um determinado arco. Por oposição, uma “variável de ocorrência singular”, ou parâmetro, caracteriza um determinado aspecto do próprio processo da modelação.

erros de quantificação que neles ocorrem poderá justificar, nesses elementos, uma quantificação particularmente rigorosa;

- ii. *Estudo da relação entre o grau de susceptibilidade dos diferentes elementos da rede e as suas características básicas*; Esta análise tem como objectivo investigar a existência de elementos da rede com particular propensão a erros, ao nível das variáveis dependentes e, em caso afirmativo, identificar eventuais características intrínsecas desses elementos que permitam explicar a variabilidade dos resultados observados.
- e) *Avaliação da importância da inter-relação espacial dos elementos onde são cometidos os erros de quantificação*. Nesta secção pretende-se associar à problemática dos erros de quantificação uma componente espacial, ou seja, considera-se a localização e organização dos elementos da rede como um possível factor explicativo do padrão de discrepâncias causadas pelos erros de quantificação; Especificamente, pretende-se conhecer a importância da concentração de erros de quantificação numa área específica, por oposição a uma distribuição aleatória pela rede; esta questão coloca-se, por exemplo, quando se trata de expandir modelos existentes, havendo que decidir se será mais adequado codificar o melhor possível a zona em avaliação e “confiar” na codificação existente para as restantes áreas ou se, pelo contrário, é preferível um nível de codificação relativamente uniforme;
- f) *Avaliação dos eventuais processos de degradação espacial dos impactos*. Coloca-se aqui a questão de caracterizar os eventuais padrões de propagação espacial das discrepâncias entre a realidade e o modelo (degradação dos erros), em função do afastamento aos locais onde são cometidos os erros de quantificação; a identificação de relações perfeitamente definidas permitiria, por exemplo, definir diferentes níveis de precisão na caracterização das variáveis como uma função do afastamento à zona específica em análise;
- g) *Avaliação da importância do ambiente rodoviário*. O impacto dos erros num modelo pode depender de um grande conjunto de factores. Muitos destes serão característicos da rede (tipo de nó, reserva de capacidade) ou da tipologia do erro introduzido (intensidade, distribuição). Mas o desempenho do modelo pode também ser explicado pelo “ambiente rodoviário”, pelo que interessa conhecer a importância dos seguintes factores na sensibilidade geral do modelo:
- i. *Estrutura da rede*: diferentes redes podem apresentar diferentes sensibilidades ao mesmo tipo de erros. Será natural esperar que os erros numa rede fortemente hierarquizada tenham menores consequências do que numa rede pouco estruturada, onde pequenas perturbações no funcionamento de alguns elementos são suficientes para motivar mudanças de trajectos;

- ii. *Grau de congestionamento*: em princípio, numa rede muito carregada, o tráfego distribui-se dando lugar a um conjunto de trajectos alternativos de custo equivalente. A alteração, ainda que subtil, da atractividade de um destes trajectos pode ser suficiente para promover a utilização dos percursos concorrentes. Este comportamento apenas se verifica em redes pouco carregadas se, nessas condições, existirem percursos de custo equivalente, o que não é uma situação normal;
 - iii. *Valorização relativa do tempo / distância*: com esta análise procura-se conhecer até que ponto diferentes atitudes da população de condutores, no que respeita à valorização relativa do tempo e da distância, contribuem para explicar uma maior ou menor sensibilidade do modelo aos erros de quantificação.
- h) *Importância do contexto de modelação*. Reconhece-se que os resultados obtidos para um determinado modelo poderão não ser generalizáveis a outros modelos, ainda que do mesmo tipo, em consequência de diferentes assumpções e métodos de cálculo. Assim, seria importante realizar uma análise comparativa das sensibilidades de diferentes tipos de modelos (como, por exemplo, a modelação microscópica vs mesoscópica) aos erros de quantificação. Refira-se, contudo, que essa avaliação é uma tarefa que, pelo facto de implicar a modelação do mesmo sistema viário com diferentes tipos de modelos, se afigura particularmente trabalhosa.

III.4 Metodologia de simulação de erros de quantificação

III.4.1 Introdução

Em qualquer uma das tipologias de problemas apresentadas nos pontos anteriores está subjacente a ideia de que se pretende estabelecer uma analogia entre os impactos dos erros de quantificação nos sistemas real e virtual. Tal justifica que haja a preocupação de introduzir erros no sistema virtual de referência representativos daqueles que surgem no processo de modelação do sistema real.

Nos pontos seguintes começa por se estabelecer a distinção entre os diferentes tipos de *inputs* envolvidos no desenvolvimento de um modelo de simulação de tráfego, nomeadamente as variáveis independentes e os parâmetros. De seguida, caracterizam-se os principais métodos de quantificação desses *inputs* e os erros daí decorrentes, para finalmente se apresentar um método de simulação desses erros.

III.4.2 Tipos de *inputs* dos modelos de simulação

Os *inputs* de um modelo de simulação podem ser classificados em duas categorias – as variáveis independentes e os parâmetros de calibração.

III.4.2.1 Variáveis independentes

As variáveis independentes são aquelas às quais é possível atribuir um valor único, sem ambiguidade. Estas podem ser classificadas em três categorias:

- Características geométricas e operacionais da rede: pertencem a esta categoria todos os elementos necessários para modelar a infra-estrutura, no que respeita às suas características geométricas e às regras operacionais. Nesta categoria é indicada a posição e tipologia de cada um dos nós, o número de arcos que ligam, os movimentos de viragem permitidos, os planos semaforicos, hierarquias de prioridades, etc. Em suma, as características da rede que não mudam em função dos comportamentos dos condutores;
- Características da procura: a caracterização da procura num modelo de atribuição é feita tradicionalmente através de uma ou mais matrizes origem-destino. Diversos modelos permitem o tratamento detalhado do problema de afectação das viagens, através do carregamento sequencial de matrizes correspondentes a diferentes períodos do dia, as quais podem variar tanto quantitativamente como qualitativamente. No entanto, após se fixar um determinado período de modelação, a matriz origem-destino *real* fica representada por um conjunto único de valores;
- Características funcionais: pertencem à categoria de *características funcionais* todas as variáveis que respeitam à interacção dos condutores com a infra-estrutura e às quais supostamente também se pode atribuir um determinado valor, obtido sem ambiguidade. A velocidade em condições livres e o fluxo de saturação de um movimento de viragem integram-se nesta categoria, já que se pode definir o valor exacto de cada uma destas variáveis como sendo a média populacional correspondente ao período em causa.

A quantificação das variáveis independentes – características da procura e características funcionais – pode ser feita de duas maneiras: através de observações (por exemplo da velocidade livre, com medição dos tempos de percurso de um conjunto de condutores), ou através de sub-modelos (como o modelo gravitacional, utilizado para estimar a matriz origem-destino). Estes permitem, recorrendo a variáveis independentes mais facilmente quantificáveis, estimar com uma precisão *aceitável* as variáveis independentes requeridas pelo modelo principal. Cada um destes métodos introduz *erros de quantificação* com consequências nos resultados.

Relativamente às variáveis utilizadas para caracterizar a topologia e as condições de operação da rede, reconhece-se que estão, como todas as outras, sujeitas a erros de quantificação. Mas no âmbito deste trabalho foi admitido que os modelos são submetidos a processos de controlo de qualidade, durante os quais é eliminada a quase totalidade destes erros, pelo que se assume a possibilidade de haver uma perfeita codificação das características geométricas e operacionais da rede (naturalmente dentro das especificidades do modelo).

III.4.2.2 Parâmetros de calibração

Os parâmetros de calibração distinguem-se pelo aspecto de os seus valores serem obtidos de uma forma indirecta. Por definição, o valor correcto de um parâmetro é aquele que permite minimizar as diferenças entre a realidade e as previsões, assumindo a perfeita quantificação dos indicadores do funcionamento do sistema viário e das variáveis independentes.

Como exemplo destes parâmetros, pode referir-se a demora geométrica em cruzamentos prioritários, o intervalo crítico de aceitação, a demora aleatória em cruzamentos semaforizados e a relação entre o custo do tempo e da distância. Note-se que todos estes parâmetros poderiam, pelo menos aproximadamente, ser quantificados recorrendo a observações, mas devido à propriedade que possuem de corrigir de forma sistemática tendências de modelação, para estes são normalmente adoptados valores pouco consentâneos com o que seria naturalmente expectável. A este propósito refira-se que há diferentes interpretações sobre a forma mais correcta de fixar o valor dos parâmetros. Por exemplo, Boddy (1992) defende que as variáveis que relacionam o custo do tempo e da distância devem ser obtidas a partir de um sub-modelo específico, tratando-as, portanto, como variáveis independentes, sem funções de calibração. Outros autores (York City Council, 1996) entendem que estas variáveis devem ser ajustadas de um modo mais ou menos livre até que os valores modelados se aproximem dos valores observados.

III.4.3 Erros decorrentes dos processos de amostragem

Quando se recorre a uma amostra para estimar um valor característico da população, incorre-se em erros de amostragem, que dependem essencialmente do tamanho da amostra e da variabilidade da população.

A metodologia utilizada para quantificar o valor de uma determinada variável difere consoante se pretenda conhecer a média ou a proporção populacional. Geralmente, procura-se conhecer a média das variáveis que descrevem as características funcionais da rede (fluxos de saturação, velocidades, filas de espera) e a proporção no caso dos elementos que compõem a matriz origem-destino.

III.4.3.1 Estimativa de médias

Considere-se a variável aleatória contínua x , normalmente distribuída, caracterizada pela média populacional, μ e desvio padrão populacional, σ .

Admitindo que o valor exacto dessa variável, requerido pelo modelo, é a média populacional, toma-se normalmente a média de uma amostra como estimativa desse valor. O erro associado a essa estimativa depende do tamanho da amostra e do desvio padrão da variável, podendo-se afirmar com $(1-\alpha)$ 100% de confiança que o intervalo

$$\bar{x} - z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{V.1})$$

determinado com base em uma grande amostra aleatória ($n \geq 30$) contém a média populacional pretendida. Recorrendo ao Teorema do Limite Central pode garantir-se que, quando a amostra é de grande dimensão, a afirmação é válida mesmo que a variável não siga a distribuição normal (Freund e Simon, 2000). Pode ainda utilizar-se o desvio padrão da amostra, s , como estimativa do desvio padrão populacional, σ .

Quando a amostra é pequena deve ser utilizada a distribuição t de Student, obtendo-se o seguinte intervalo de confiança para a média da população:

$$\bar{x} - t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (\text{V.2})$$

Exemplo de estimativa de médias

Pretende-se construir um intervalo de confiança de 95% para a média das velocidades livres (V_0) de uma população de condutores, a partir de uma amostra de 10 condutores:

Condutor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_0 [km/h]	89,5	90,4	93,8	85,2	86,6	95,1	92,1	89,3	88,4	96,3

A média e o desvio padrão dos $n = 10$ valores são:

$$\bar{x} = 90,7 \text{ e } s = 3,6$$

A amostra é de pequena dimensão ($n = 10 < 30$), pelo que se deve utilizar a distribuição t . Como $t_{0,025}$ para $10 - 1 = 9$ graus de liberdade é igual a 2,262 (valor tabelado), a substituição na fórmula (V.2) dá:

$$90,7 - 2,262 \cdot \frac{3,6}{\sqrt{10}} < \mu < 90,7 + 2,262 \cdot \frac{3,6}{\sqrt{10}}$$

$$88,1 < \mu < 93,3$$

III.4.3.2 Estimativa de proporções

Quando se pretendem quantificar os valores individuais de uma matriz origem-destino através de observações, cometem-se erros de amostragem que podem, nos casos mais simples, ser facilmente quantificados.

Admita-se assim que se pretende conhecer o número de viagens correspondente a um determinado par origem-destino, sendo que existe a possibilidade de efectuar inquéritos num arco, passagem obrigatória dessas viagens, e onde se conhece o fluxo total Q .

Sabendo que a proporção populacional p de veículos que se desloca entre o par O-D considerado corresponde ao volume Q_{ij} , tem-se a relação $Q_{ij} = pQ$, ou seja, admitindo que não são cometidos erros na contagem, o valor O-D está dependente da precisão da proporção amostral p_A que se utiliza como estimativa da proporção populacional p .

Ora, p_A é o quociente entre o número de inquiridos x que se deslocam entre o par considerado e o número total de inquéritos n . A probabilidade de se inquirirem x condutores nessas condições é dada pela distribuição binomial:

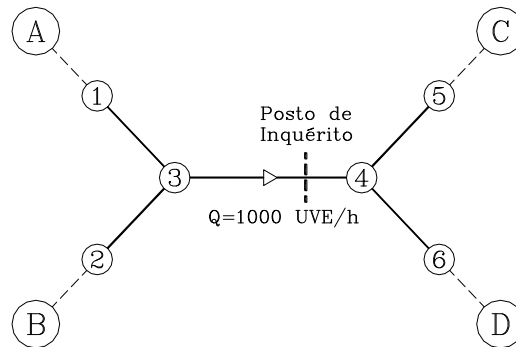
$$f(x) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x} \quad (\text{V.3})$$

a qual, quando $np \geq 5$ e $n(1-p) \geq 5$, pode ser aproximada pela distribuição normal. Assim, é possível definir um intervalo de confiança para a proporção populacional:

$$p_A - z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{p_A(1-p_A)}{n}} < p < p_A + z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{p_A(1-p_A)}{n}} \quad (\text{V.4})$$

Exemplo de estimativa de proporções

Pretende-se construir um intervalo de confiança de 95% para o número de viagens que se realiza entre o par origem-destino A-C. Para tal realizaram-se 100 inquéritos numa secção do arco 3-4, sendo que 25 dos inquiridos declararam efectuar o tipo de viagem em causa. Complementarmente, fez-se uma contagem de tráfego registando-se um fluxo horário de 1000 UVE/h no arco 3-4.



A proporção amostral é $p_A = 25 / 100 = 0,25$

Uma vez que $np = 100 \cdot 0,25 = 25 > 5$ e $n(1-p) = 100 \cdot (1-0,25) = 75 > 5$, e como $Z_{0,025} = 1,96$ (valor tabelado), obtêm-se os seguintes intervalos de confiança para a proporção populacional e para o número de viagens pretendido:

$$0,25 - 1,96 \cdot \sqrt{\frac{0,25(1-0,25)}{100}} < p < 0,25 + 1,96 \cdot \sqrt{\frac{0,25(1-0,25)}{100}}$$
$$0,201 < p < 0,299$$
$$201 < Q_{AC} < 299$$

III.4.4 Métodos para simulação dos erros de quantificação

III.4.4.1 Decorrentes dos processos de amostragem

Tal como foi exposto nos pontos anteriores, as médias amostrais, utilizadas como estimativas das médias populacionais, distribuem-se de acordo com a lei Normal, tanto no caso de quantificação de valores absolutos como de proporções. Posto de outra forma, a distribuição dos erros de quantificação respeita a lei Normal⁷.

Conhecendo a distribuição teórica, é possível simular, pela técnica de Monte Carlo, os erros cometidos nos processos reais de amostragem. Assim, a simulação de erros de quantificação, num dado elemento, passa pela extracção aleatória de um valor de uma população normalmente distribuída cuja média é o valor codificado, assumido exacto, e cujo desvio padrão é representativo do número de observações utilizadas para estimar a

⁷ Verificou-se que, quando as amostras são de pequena dimensão, as estimativas distribuem-se de acordo a lei t de Student. No entanto, com vista à simplificação das análises, e uma vez que as distribuições t e Normal são muito semelhantes, considerou-se apenas a distribuição Normal.

média. Estes valores substituem os valores originais no modelo base $Y_P \equiv Y_{E1}$, dando lugar ao modelo com erros Y_{E2} .

Salienta-se que não se pretende estabelecer uma relação quantitativa entre o número de observações e a qualidade do modelo. Apenas interessa avaliar, qualitativamente, a sensibilidade do modelo a diferentes graus de precisão na quantificação das variáveis, o que passa por repetir o processo de análise para diferentes coeficientes de variação.

III.4.4.2 Decorrentes do recurso a sub-modelos

A quantificação de variáveis através de observações é um processo que, devido aos custos implicados, se reserva para um número muito limitado de casos. A alternativa passa pela utilização de sub-modelos específicos que disponibilizem estimativas razoáveis mediante a utilização de variáveis independentes mais fáceis de obter. A complexidade desses sub-modelos é muito variável, podendo traduzir-se, nos casos mais simples, por uma tabela de referência ou mesmo por uma abstracção (a estimativa mental da capacidade de uma via, tendo como referência valores conhecidos para condições base e levando em conta factores como a presença de veículos mal estacionados, paragens de autocarros, largura da via, etc.).

Por oposição ao método de quantificação através de observações, não é possível recorrer a considerações estatísticas para quantificar o erro cometido devido à utilização de um sub-modelo. É apenas razoável afirmar que originam erros sistemáticos, tendências de sub ou sobre-estimação, de gravidade apenas superficialmente conhecida, e eventualmente associados a desvios aleatórios.

É nessa perspectiva que serão gerados os erros. Tendo com base os valores codificados, assumidos exactos, simulam-se os erros de quantificação através da introdução de desvios percentuais de gravidade variável associados a desvios aleatórios de gravidade também variável.

III.4.5 Intensidade dos erros simulados

Neste ponto importa tecer algumas considerações sobre os limites dos erros a introduzir. É conhecida a seguinte regra empírica, relativa a distribuições normais, mas aplicável a qualquer outro tipo de distribuição (ver, por exemplo, Ott e Longnecker, 2001):

Dado um conjunto n de medições,

O intervalo $\bar{x} \pm s$ contém aproximadamente 68% das medições

O intervalo $\bar{x} \pm 2s$ contém aproximadamente 95% das medições

O intervalo $\bar{x} \pm 3s$ contém aproximadamente 99,7% das medições

Ou,

O erro máximo é inferior a 1.CV em 68% das medições

O erro máximo é inferior a 2.CV em 95% das medições

O erro máximo é inferior a 3.CV em 99,7% das medições

onde s representa o desvio padrão da amostra e CV o coeficiente de variação ($CV = s/\bar{x}$).

Admita-se agora que se pretendiam introduzir erros aleatórios na velocidade livre de um arco, sendo que o valor exacto é de V_0 km/h e que o erro não deveria exceder um determinado valor (por exemplo, 30%), uma vez que acima desse limite o analista rejeitaria a estimativa. Poder-se-ia proceder das seguintes formas:

- a) Extrair aleatoriamente as velocidades de uma população normalmente distribuída, com média $\bar{x} = V_0$ km/h e um determinado coeficiente de variação, e trincar os valores obtidos aos limites superiores e inferiores (para um $CV = 0,15$ seria necessário trincar 5% das velocidades);
- b) Admitir a possibilidade de erros acima do limite, embora numa percentagem muito limitada. Por exemplo, para garantir que apenas 0,3% ($100 - 99,7$) das velocidades não respeitassem os limites ($\pm 30\%$), seria necessário que o CV fosse igual a 0,1.

Optou-se pela segunda opção. Assim, seria aparentemente pouco razoável avaliar o desempenho do modelo para coeficientes de variação da ordem dos 20%, uma vez que se estaria a admitir que em 5% dos casos o erro de quantificação é superior a 40%, o que é pouco provável em aplicações práticas.

Contudo, importa não esquecer que nesta análise apenas foram considerados os erros de quantificação, e que o impacto de cada um deles é avaliado assumindo-se a codificação exacta das demais variáveis, pelo que aquilo que é determinado é o limite superior dos erros. Ou seja, para validação, é condição necessária mas não suficiente a obtenção de

estimativas mais rigorosas que as correspondentes ao limite. Não se sentiu, assim, necessidade de limitar a amplitude dos erros testados a uma gama estritamente “natural”.

III.5 Caracterização da qualidade de um modelo

Tendo sido apresentadas no ponto anterior as técnicas básicas adoptadas para simular os diferentes erros de quantificação, apresentam-se agora os indicadores utilizados para caracterizar os estados dos sistemas viários, as medidas estatísticas que permitem quantificar os impactos dos referidos erros e os critérios de validação comumente seguidos para avaliar a aplicabilidade prática de modelos de simulação, apresentando-se para cada caso as opções assumidas para aplicação no trabalho subsequente.

III.5.1 Indicadores do estado do sistema

Mesmo os modelos de atribuição mais simples são capazes de apresentar um grande número de variáveis descritivas do estado do sistema. Uma vez que garantir a validade do modelo para além de um determinado nível pode ser uma tarefa muito consumidora de recursos, Law e Kelton (2000) defendem que é mais adequado validar o modelo relativamente aos indicadores que vão ser utilizados para fazer opções de planeamento, gestão ou controlo.

No *Manual of Best Practice* (SMARTTEST, 1999), elaborado no âmbito do projecto europeu SMARTTEST é apresentada uma estrutura que sustenta a opção por um indicador específico. Foram identificados diversos objectivos de alto nível, caracterizados por indicadores qualitativos aos quais foi associado um conjunto de critérios para avaliação quantitativa. Por exemplo, para o objectivo primário “Eficiência Económica”, são propostos indicadores como: demoras sofridas pelos veículos em intersecções; demoras sofridas pelos peões; tempo de trajecto. Por sua vez, ao indicador “tempo de trajecto” são associadas duas medidas de desempenho: “tempo total” e “variabilidade”, podendo estas medidas ser avaliadas com recurso ao modelo.

No *Traffic Appraisal Manual* (UK DOT, 2002) é também apresentada uma relação entre objectivos de alto nível (definidos para o Reino Unido) e as medidas de desempenho correspondentes. Esta é uma estrutura mais simples, onde são essencialmente considerados dois grandes objectivos: eficiência económica e protecção ambiental. O primeiro destes objectivos é avaliado através de programas de avaliação económica (COBA, URECA), que requerem dados como fluxos de tráfego, velocidades e demoras. A avaliação ambiental é um processo que requer fluxos de tráfego, composição do tráfego e velocidades médias.

Também no âmbito do projecto europeu MUSIC (Seco *et al*, 1997) é apresentada uma estrutura que relaciona os objectivos a atingir com os indicadores a utilizar (*redução do congestionamento no centro da cidade sem penalizar as áreas adjacentes*: tempo de percurso e fluxos; *melhoria da comodidade e segurança dos peões*: fluxos e proporção de tempo de verde das fases pedonais; *melhoria da eficiência dos transportes públicos*: tempo de percurso dos transportes públicos).

Já no manual da FHWA (Barton-Aschman e Cambridge Systematics, 1997), apenas são utilizados os fluxos de tráfego (embora com diferentes níveis de agregação) para descrever o sistema de tráfego de transporte individual. A adopção de um único indicador é explicada pelo âmbito regional e de longo prazo dos modelos a que se destina.

Para este trabalho de investigação, optou-se por restringir a análise a dois indicadores, entendidos como particularmente representativos do sistema em avaliação. Adoptaram-se os indicadores “fluxo de tráfego” e “tempo de trajeto”, tendo para tal sido considerados os seguintes aspectos:

- Tratam-se dos principais indicadores de suporte aos processos de calibração e validação de modelos macro e mesoscópicos;
- Estão directamente associados à maior parte dos critérios de avaliação de alternativas, definidos em função dos objectivos de ordem superior (eficiência económica, protecção ambiental, segurança, sustentabilidade,...).

Como desvantagem do indicador “fluxo de tráfego”, poder-se-ia argumentar que não é completamente representativo do sistema: segundo a teoria fundamental das correntes de tráfego, a qualquer fluxo de valor inferior à capacidade da via correspondem dois valores possíveis para a velocidade e densidade. Esta é, contudo, uma especificação não tratada pelos modelos mesoscópicos clássicos, pelo que a adopção do indicador referido não implica simplificações desnecessárias (o que já aconteceria com um modelo de microsimulação, onde o indicador “densidade” ou uma combinação de indicadores seria provavelmente uma escolha mais reveladora).

III.5.2 Indicadores de afastamento

Algumas das análises referidas no ponto III.3, nomeadamente a “Avaliação dos eventuais processos de degradação espacial dos impactos” e a “Avaliação da importância da inter-relação espacial dos elementos onde são cometidos os erros de quantificação”, pressupõem a utilização de um indicador para identificar os elementos da rede que se encontrem a um afastamento igual ou menor que um determinado valor, relativamente a um ponto de referência.

Como indicadores de fácil aplicação, adoptados para este estudo, pode referir-se a “Distância” e a “Conectividade”. O primeiro representa a distância em linha recta entre dois pontos, enquanto a “Conectividade” traduz o número mínimo de nós por que é necessário passar para ligar dois pontos da rede. A utilização destes indicadores tem implícita a noção de “área de influência” centrada num ponto de referência, com formato circular no primeiro caso e irregular no segundo.

Num nível de mais difícil aplicação, pode referir-se um conjunto de indicadores que reflectem o verdadeiro custo de deslocação entre dois pontos. Este custo pode corresponder apenas à distância, ao tempo de deslocação ou uma combinação dos dois.

III.5.3 Medidas estatísticas

O tipo de análises em causa nesta investigação implica o tratamento de uma grande quantidade de informação. Em particular, é necessário efectuar comparações sistemáticas de valores emparelhados, característicos de estudos antes e depois, ou de modelos de simulação.

Normalmente, essa comparação é feita com base em duas medidas fundamentais: a diferença simples e a variação percentual. Estas medidas não são, contudo, suficientes, justificando-se uma breve discussão que sustente a adopção das medidas estatísticas mais adequadas à investigação.

Considerem-se duas distribuições de uma mesma variável com N valores. A primeira relativa aos valores observados e a segunda relativa aos valores modelados. A medida mais simples para avaliar o afastamento entre o par de valores observados e modelados i (O/M) é a diferença simples: $DS_i = O_i - M_i$. A soma resulta numa medida única, que é simplesmente a diferença dos totais:

$$DS = \sum_{i=1}^N (O_i - M_i) \quad (\text{V.5})$$

Estas medidas apresentam várias limitações. Começando pela medida individual, não fornece qualquer informação sobre a importância relativa do desvio. É obtido o mesmo valor quando se compara o par (10, 11) ou o par (100, 101), isto apesar de a diferença no primeiro par ser de 10% e no segundo de apenas 1%. Por outro lado, a medida global também não é adequada para avaliar as diferenças individuais, uma vez que é afectada pelo sinal dos desvios individuais.

Existem duas formas simples de evitar a compensação dos erros. A primeira é através da adopção do seu valor absoluto, e a segunda passa por elevar o desvio ao quadrado. A medida agregada *AAD* (*average absolute difference*) utiliza a primeira aproximação:

$$AAD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - M_i| \quad (V.6)$$

Apesar de evitar a compensação dos desvios, esta medida também é insensível aos desvios relativos. Por este motivo, Van Vuren (1996) sugere a sua aplicação em conjugação com a medida *RAAD* (*relative average absolute error*).

$$RAAD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|O_i - M_i|}{O_i} \quad (V.7)$$

Esta medida leva em conta a importância relativa dos desvios mas, em contrapartida, é insensível ao valor absoluto do erro: é devolvido o mesmo resultado quando se comparam os pares (10, 11) e (100, 110).

A medida agregada *RMSE* (*root mean square error*), apresentada de seguida possui um comportamento similar à *AAD*, ignorando os desvios relativos. Com esta medida, os desvios são elevados ao quadrado, o que tem a consequência de sobrevalorizar as grandes diferenças. Esta é uma característica que tem o interesse de salientar a variabilidade dos desvios e a particularidade de ser muito sensível a erros grosseiros (ver, por exemplo, Barceló e Casas, 2002).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - M_i)^2} \quad (V.8)$$

De seguida apresentam-se três medidas agregadas que possuem sensibilidade tanto às diferenças absolutas como às relativas. A primeira é normalmente utilizada no teste Chi-quadrado:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(O_i - M_i)^2}{O_i} \quad (V.9)$$

O segundo destes indicadores, *ENT*, é uma adaptação da medida de entropia (grau de desordem de um sistema), sendo utilizado, por exemplo, para quantificar o afastamento entre duas matrizes (ver Ortúzar e Willumsen, 1990).

$$ENT = \sum_{i=1}^N (O_i \ln(O_i / M_i) - O_i + M_i) \quad (V.10)$$

Por último, o GEH é a medida sugerida no *Traffic Appraisal Manual* (UK DOT, 1996), e mais não é que uma adaptação conveniente da medida Chi-quadrado. Van Vliet (1997), identifica as vantagens de utilizar a média dos dois valores no denominador, evitando divisões por zero e a de independência da ordem dos valores. Na expressão seguinte

utiliza-se a notação *GEHM* para distinguir a medida apresentada (agregada), da medida *GEH* simples, aplicável a apenas um par.

$$GEHM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(O_i - M_i)^2}{0,5(O_i + M_i)}} \quad (V.11)$$

O interesse na utilização desta medida reside no respeito pelas expectativas dos analistas. Por exemplo, será defensável admitir que um erro de 30 veículos/hora quando os fluxos são da ordem dos 100 veículos (30%) é tão grave como um erro de 100 sobre 1000 (10%), e nos dois casos o GEH é aproximadamente igual a 3 (ver a Figura III.1).

Note-se, aliás, que este é um comportamento praticamente idêntico entre as três medidas agregadas referidas.

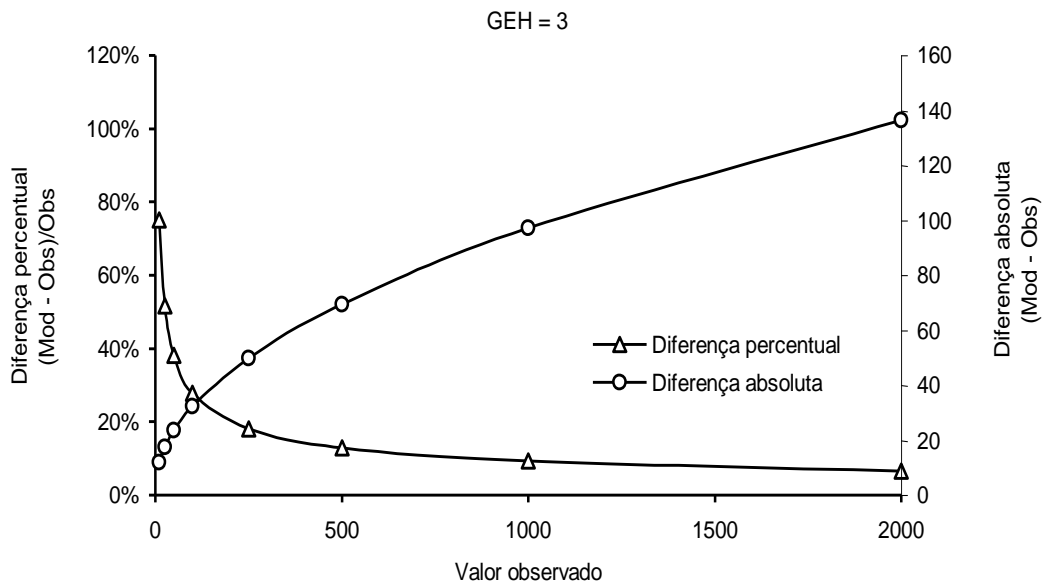


Figura III.1 – Medida GEH: evolução das diferenças percentuais e absolutas

Finalmente, o Coeficiente de Desigualdade de Theil (Theil, 1971) é uma medida agregada baseada na RMSE, mas que não está sujeita à restrição de valores não nulos. A medida (*U*) toma valores entre 1 e 0. Se *U* = 0, *O* = *M* para todos os pares e o modelo é perfeito.

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - M_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_i^2}} \quad (V.12)$$

A desigualdade de Theil pode ser decomposta em três parcelas que permitem conhecer a contribuição de cada tipo de erro de modelação. Assim, U_M é a proporção de desvio, indicativa da presença de erros sistemáticos; U_S é a proporção da variância, indicativa da capacidade do modelo para replicar o grau de variabilidade da variável em causa; e U_C , a proporção da covariância, demonstrativa da presença de erros não sistemáticos.

$$U_M = \frac{(\bar{O} - \bar{M})}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - M_i)^2} \quad (\text{V.13})$$

$$U_S = \frac{(S_P - S_A)^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - M_i)^2} \quad (\text{V.14})$$

$$U_C = \frac{2(1-r)S_P S_A}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - M_i)^2} \quad (\text{V.15})$$

sendo:

$$S_P = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad S_A = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \quad r = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(M_i - \bar{M})}{S_O S_M}$$

(Yang, 1997) refere que, idealmente, U_M e U_S devem ter valores próximos de 0 e U_C próximo de 1. Um valor elevado de U_M ($> 0,1$ ou $0,2$) é indicativo de um desvio sistemático. Um valor elevado de U_S indica que existe uma grande flutuação nos valores observados enquanto os valores modelados apresentam pequena flutuação, ou vice-versa.

Apesar da particularidade da medida U permitir a desagregação do erro, tem o inconveniente de não fazer sentido a sua aplicação a pares isolados, o que diminui o interesse na sua utilização.

Para além destas medidas quantitativas, no Traffic Appraisal Manual (UK DOT, 1991) é sugerida a análise visual da dispersão dos dados, num gráfico onde em abcissas são dispostos os valores modelados e nas ordenadas os valores previstos (ou o contrário).

Ajustando, pelo método dos mínimos quadrados, uma recta aos pontos é possível obter um conjunto alargado de informações. Idealmente, a recta (definida pela equação $y = a + b \cdot x$) apresenta um ângulo de 45° com a horizontal e passa na origem. Diferenças significativas ao nível da inclinação (b) ou da intersecção com o eixo das ordenadas (a) merecem particular atenção uma vez que podem ser causadas por desvios

sistemáticos (uma matriz OD uniformemente subestimada, por exemplo). Para além desta indicação, é ainda fundamental atender à dispersão dos pontos, quantificada pelo coeficiente de determinação (r^2), uma medida normalmente utilizada em regressão e que, nesse contexto, representa a proporção da variabilidade que é explicada pelo modelo.

Face ao exposto, parece natural que se adopte como medida quantitativa preferencial para a realização das análises de sensibilidade, uma medida de entre o conjunto das estatísticas que possuem sensibilidade tanto às diferenças absolutas como às relativas. Há uma certa tradição no uso da medida GEH, não se encontrando nenhuma razão que justifique outra opção.

III.5.4 Critérios de validação

Um aspecto essencial no processo de desenvolvimento de um modelo de tráfego é o de monitorização da qualidade da simulação. É a definição precisa de indicadores de aderência à realidade que, de uma forma objectiva, permite aferir a validade de um modelo para um fim específico.

Não é fácil, contudo, quantificar a qualidade de um modelo, e são muitos os factores que para isso contribuem. Em primeiro lugar, importa lembrar que nem todos os modelos envolvem os mesmos processos (geração, distribuição, repartição modal, atribuição) pelo que a adopção de um indicador único tenderia a revelar-se demasiadamente exigente para os modelos mais abrangentes. Por outro lado, nem todos os modelos utilizam as mesmas variáveis para representar o estado dos sistemas físicos. Por último, não existe uma base de aplicação prática suficientemente ampla e documentada para que seja possível generalizar recomendações.

Nos pontos seguintes são apresentados valores referenciais sugeridos por entidades governamentais dos Estados Unidos da América (FHWA) e do Reino Unido (UK DOT).

III.5.4.1 Recomendações FHWA 1997

No âmbito de um programa destinado a promover a utilização de modelos de transportes (*Travel Model Improvement Program – TMIP*), a agência governamental FHWA (Federal Highway Administration), integrada no Departamento de Transportes dos EUA produziu um documento (Bartoon-Aschman e Cambridge Systematics, 1997), onde se reúnem recomendações e linhas orientadoras destinadas a validar modelos de planeamento estratégico, de carácter essencialmente não urbano. Esse documento foi desenvolvido na sequência de uma anterior publicação (Ismart, 1990) que continha um conjunto simplificado de procedimentos, reflexo da pouca informação socio-económica disponível à data.

Abrangendo todos os passos do modelo sequencial, o documento sugere a validação sucessiva de cada um dos sub-modelos. Relativamente ao sub-modelo de afectação, são utilizados os seguintes critérios de validação:

- Milhas percorridas (*Vehicle miles of travel* - VMT)

Este primeiro critério de validação assenta no indicador do estado do sistema real VMT, que representa o somatório dos produtos dos comprimentos das vias pelos volumes de tráfego respectivos, sobre uma área geográfica ou classificação funcional. É um indicador agregado, particularmente adequado para integrar estudos de impacto ambiental.

Ao nível mais agregado, era admitida uma diferença máxima entre os valores modelados e observados de 5%, a qual foi reduzida em 1994 para 3%.

Não são especificados critérios de validação formais relativos a níveis de agregação mais baixos, como categorias funcionais das vias. No entanto, são indicados valores de referência que têm como objectivo sustentar a calibração do modelo (ver a Tabela III.1)

Tabela III.1 – Distribuição típica do indicador VMT por categoria funcional das vias (Bartoon-Aschman e Cambridge Systematics, 1997. Fonte: Fleet e Corla-Sousa, 1990)

Categoria	Tamanho da população (habitantes)		
	50 – 200K	200 – 1M	> 1M
<i>Freeways</i>	18 – 23%	33 – 38%	40%
<i>Principal arterials</i>	37 – 43%	27 – 33%	27%
<i>Minor arterials</i>	25 – 28%	18 – 22%	18 – 22%
<i>Collectors</i>	12 – 15%	8 – 12%	8 – 12%

- Fluxos de tráfego (Q)

Este indicador é utilizado sob diferentes níveis de agregação, de modo a facilitar a calibração e validação sucessiva dos diferentes sub-modelos envolvidos. São apresentados os seguintes critérios de validação para volumes de tráfego diário, por categoria funcional:

Tabela III.2 – Diferença percentual máxima entre volumes de tráfego diários modelados e observados (Bartoon-Aschman e Cambridge Systematics, 1997. Fonte: Ismart, 1990; Michigan Department of Transport (MDOT), 1993)

Categoria	Metas FHWA	Metas MDOT
<i>Freeways</i>	7%	6%
<i>Principal arterials</i>	10%	7%
<i>Minor arterials</i>	15%	10%
<i>Collectors</i>	25%	20%

Na Tabela III.3 são indicadas critérios de validação para volumes de tráfego diário, por via (note-se a diminuição da tolerância à medida que os volumes aumentam, à semelhança do que se passa com a estatística *GEH*)

Tabela III.3 – Diferença percentual máxima entre volumes individuais de tráfego diários modelados e observados (Bartoon-Aschman e Cambridge Systematics, 1997. Fonte Ismart, 1990; Michigan Department of Transport (MDOT), 1993)

Tráfego médio diário anual	Metas FHWA	Metas 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%

São ainda indicados critérios de validação do modelo no período de ponta:

Tabela III.4 – Critérios de validação no período de ponta (A Bartoon-Aschman e Cambridge Systematics, 1997. Fonte: Contra Costa Transit Authority – San Francisco Bay Área)

Categoria	Mínimo de observações a satisfazer condição de validação	Erro aceitável entre valores observados e modelados
<i>Freeway</i>	75%	20%
<i>Freeway</i>	50%	10%
<i>Principal arterials</i>	75%	30%
<i>Principal arterials</i>	50%	15%
Movimentos de viragem principais	50%	20%
Movimentos de viragem secundários	30%	20%

III.5.4.2 Recomendações UK DOT 1996

Por oposição ao que se passa nos EUA, as recomendações do Departamento de Transportes do Reino Unido têm como objecto a avaliação a curto / médio prazo das consequências de intervenções sobre a rede. Para tal, esta instituição salienta a importância da caracterização da procura, actual e futura, assente em observações da situação actual e projecções simples, dispensando, portanto, a utilização dos três primeiros passos do modelo sequencial.

O carácter mais limitado, espacial e temporal, dos modelos resultantes faz com a precisão das estimativas seja bastante mais elevada do que em modelos de planeamento estratégico. Isso mesmo é revelado pelas metas publicadas pelo Departamento de Transportes UK DOT (1996), as quais assentam essencialmente em indicadores desagregados (ver Tabela III.5).

Tabela III.5 – Critérios de validação: fluxos horários de tráfego e tempos de trajecto (UK DOT, 1996)

Indicador	N.º mínimo de observações a satisfazer condição de validação	Erro aceitável entre valores observados e modelados
Fluxo individuais (Q < 700 veic/h)	85%	100 veic/h
Fluxo individuais (700 < Q < 2700 veic/h)	85%	15%
Fluxo individuais (Q > 2700 veic/h)	85%	400 veic/h
Fluxos em <i>screenlines</i>	100%	5%
Fluxos individuais	85%	GEH = 5
Fluxos em <i>screenlines</i>	100%	GEH = 4
Tempo de trajecto	85%	15% (ou 1 minuto)

Para além destes valores, e como referido no ponto III.5.3, nas normas é sugerida a apresentação de um gráfico bidimensional de dispersão com as variáveis *fluxo previsto* e *fluxo modelado*. Consideram-se aceitáveis valores de r (coeficiente de correlação) acima de 0,90 e de m (declive da recta de regressão) no intervalo [0,9 - 1,1].

Relativamente a estas metas, importa notar que não são diferenciados os casos dos fluxos nos arcos e nos movimentos de viragem, sendo que os primeiros representam uma agregação dos segundos e, por esse motivo, mais facilmente respeitam o critério de validação. Este aspecto foi reconhecido por Van Vuren (1996) que, no âmbito do projecto comunitário de investigação MUSIC, propõe a tolerância de 15% ou 100 veic/h no arcos e de 25% ou 100 veic/h nos movimentos de viragem, independentemente do fluxo observado. Sugere ainda que seja imposto o limite $GEHM = 2$ relativamente à média das 85% melhores previsões.

III.5.4.3 Outros critérios

Dos poucos conjuntos de critérios de validação referidos na bibliografia, parece natural que se tomem como referência para este estudo as recomendações britânicas, já que reportam a uma tipologia de problemas/modelos que se enquadram nos objectivos da investigação, tal como referido no ponto II.6.

Verifica-se, contudo, que nenhum dos principais indicadores de aderência é plenamente adequado à realização de análises de sensibilidade. Por um lado, os seus valores dependem apenas de um subconjunto das observações (admitindo-se que 15% das comparações podem não respeitar a condição de validação, independentemente da

gravidade dos erros registados); por outro, mesmo em relação ao subconjunto válido, parte dos critérios é insensível à intensidade da discrepância – a previsão do fluxo num movimento de viragem é considerada simplesmente “válida”, quer a diferença tenha sido de 5% ou 20%!

Assim, num ponto prévio da análise de sensibilidade avalia-se o comportamento dos diversos critérios de validação, propondo-se a adopção de um indicador de aderência alternativo, calculado com base na totalidade da amostra através de uma medida estatística com propriedades desejáveis.

O indicador de aderência QGloGEHM (média dos GEH de todas as comparações entre fluxos previstos e observados, incluindo arcos e movimentos de viragem) satisfaz essas condições. A sua aplicabilidade está, no entanto, dependente da existência de critérios de validação adequados, presentemente inexistentes.

IV DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE REFERÊNCIA

IV.1 O modelo de simulação de tráfego SATURN

IV.1.1 Estrutura do modelo

O SATURN (**S**imulation and **A**ssignment of **T**raffic to **U**rban **R**oad **N**etworks) é um conjunto de programas informáticos que têm vindo a ser desenvolvidos desde 1980 pelo Institute for Transport Studies da Universidade de Leeds. Pode ser utilizado de três maneiras fundamentais:

- Para simular com detalhe o funcionamento de cruzamentos individuais;
- Para analisar redes interurbanas de grande dimensão, através de uma forma de modelação “convencional” – macroscópica;
- Como um modelo combinado, associando a componente de atribuição à modelação detalhada das intersecções – modelação mesoscópica.

O modelo é essencialmente um processo de duas fases – *atribuição* e *simulação* – executadas iterativamente. Na rede de simulação cada movimento de viragem é representado por um arco, sendo o cálculo dos parâmetros das curvas fluxo-velocidade respectivas o objectivo da fase de simulação. Estas curvas são utilizadas na fase de atribuição subsequente, permitindo a identificação de trajectos de custo mínimo e o cálculo de fluxos nos arcos e movimentos de viragem. Estes novos fluxos são então levados para o modelo de simulação, que os utiliza para calcular novas curvas fluxo-velocidade representativas dos fluxos conflituantes. O processo iterativo começa com uma atribuição utilizando um conjunto pré-definido de relações fluxo-velocidade e termina quando há uma variação desprezável de fluxos de tráfego entre iterações sucessivas numa determinada percentagem de arcos e movimentos de viragem.

Tradicionalmente, por uma questão de eficiência custo/benefício, opta-se pela codificação da parte mais sensível da área de estudo no modo de simulação, que permite explicitar as demoras nas intersecções, reservando-se o modo de atribuição para codificar a área envolvente, onde se admite que as escolhas de trajectos são essencialmente decididas em função das características das vias.

IV.1.2 Caracterização da procura

O elemento fundamental utilizado para descrever a procura é a matriz origem-destino de deslocações pretendidas num dado período de tempo. O modelo assume que em

períodos relativamente curtos, da ordem dos 30 minutos, o padrão de fluxos de tráfego é constante, o que sustenta a utilização de uma única matriz OD. No caso de períodos de modelação longos, como uma manhã, é possível fraccionar a matriz em segmentos, o que permite simular os efeitos do aumento e diminuição da procura ao longo do período em análise.

O modelo admite ainda o tratamento diferenciado de diversos tipos de utilizadores do sistema, permitindo definir para cada grupo um custo generalizado de viagem, eventuais restrições de circulação e uma matriz origem – destino. Esta é uma importante função, na medida em que permite carregar a rede com um conjunto de utilizadores de características diferenciadas, de acordo com uma distribuição mais próxima da realidade. Possibilita, por exemplo, especificar uma rede apenas acessível aos táxis e transportes colectivos e criar classes de utilizadores com diferentes atitudes relativamente às importâncias relativas das distâncias e tempos dos trajectos.

IV.1.3 Caracterização topológica e funcional da rede

O tipo de dados necessários para modelar as redes viárias difere significativamente consoante se trate de redes de atribuição ou de simulação.

No primeiro caso, o elemento explicitamente codificado é o arco, ficando os nós implicitamente definidos. Cada arco é caracterizado pelos nós inicial e final, pela distância (ou coordenadas), pelas velocidades em condições livres e na saturação e por uma potência utilizada na relação fluxo-velocidade. Pode ainda ser indicado um custo adicional, representativo de uma portagem ou de uma qualquer penalização à deslocação (por exemplo, o mau estado do pavimento).

No caso das redes de simulação, o elemento explicitamente codificado é o nó, ficando os arcos implicitamente definidos. São necessários dados relativos a três níveis: nó, arcos e movimentos de viragem. Dados do primeiro tipo são, por exemplo, o tipo de nó e o número de arcos confluentes. Os dados do segundo tipo – arcos – são, especificamente, o nó de montante, a capacidade de *stockagem* do arco, a velocidade nas condições prevalecentes e o número de movimentos de viragem. Os dados de caracterização dos movimentos de viragem, terceiro tipo, são o fluxo de saturação, a alocação de vias disponíveis para o movimento e ainda um ou mais indicadores do modo de controlo da intersecção. No caso de intersecções semaforizadas, é ainda necessário caracterizar cada uma das fases, nomeadamente com a duração da fase, verde e entreverde e movimentos permitidos.

IV.1.4 Caracterização do potencial de desempenho da rede

IV.1.4.1 Rede de atribuição

O SATURN utiliza as expressões (IV.3) apresentadas no ponto II.2.3 para relacionar o tempo de trajeto com a velocidade. Estas expressões traduzem duas situações distintas.

A primeira ocorre quando a procura é inferior à capacidade da via, sendo o andamento da curva dependente da potência de calibração. A função dessa potência (n) é controlar a forma como o nível de carga afecta a velocidade. Na Figura IV.1 mostra-se que pequenos valores de n fazem com que o tempo de deslocação aumente gradualmente desde as condições livres (T_0) até ao tempo na saturação (T_C), simulando o que se passa em vias de baixa capacidade urbanas ou suburbanas; valores elevados fazem com que a transição se dê de uma forma mais abrupta, simulando as condições de tráfego em estradas multivias.

A segunda situação pretende retratar as demoras sofridas em fila de espera, que ocorrem quando a procura excede a capacidade. É assumida uma relação linear entre as demoras, o grau de saturação e da duração do período modelado (T).

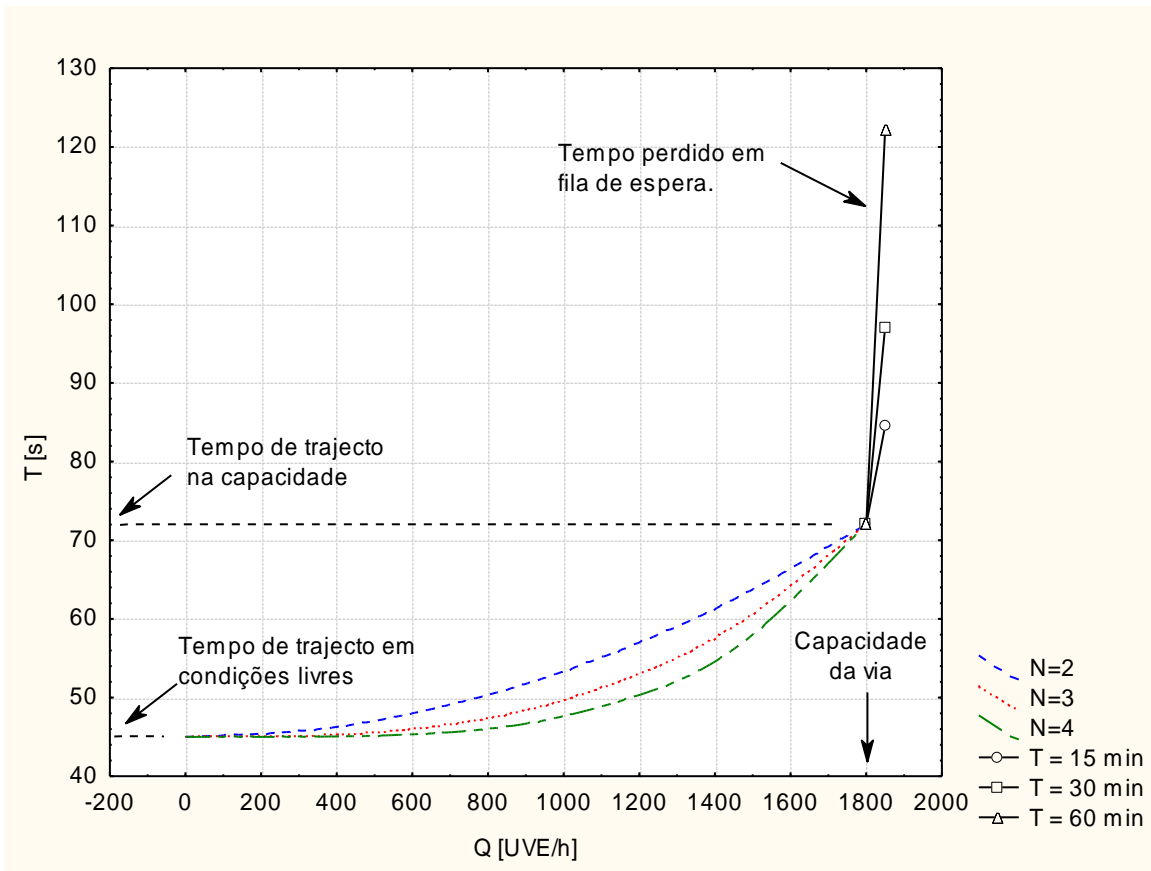


Figura IV.1 - Influência da potência n na relação fluxo-demora

IV.1.4.2 Rede de simulação

- Perfis cíclicos de fluxos

A rede de simulação é constituída por arcos, com custos de deslocação considerados independentes da procura, e por movimentos de viragem, com relações fluxo-velocidade não convencionais.

Para além da assumpção de procura constante durante períodos da ordem dos 30 minutos, é também admitido que, consequência da presença de cruzamentos semaforizados com tempos fixos, existe um padrão cíclico de fluxos e demoras durante o período modelado. A técnica, descrita por Robertson (1974) e empregue no programa TRANSYT, consiste em reduzir o problema de simulação à análise das interações entre veículos que ocorrem num único dos perfis cíclicos de fluxos (PCF), uma vez que os restantes são idênticos. O ciclo é dividido num número finito de intervalos e as interações calculadas em cada um desses intervalos.

Em cada movimento de viragem, do arco i para o arco j , são considerados quatro perfis cíclicos de fluxos:

1. ENTRADA – PCF relativo à secção de montante do arco i ;
2. CHEGADA – PCF relativo à secção de jusante do arco i , obtido do perfil de entrada por um processo de dispersão de pelotões;
3. ACEITAÇÃO – É um perfil deduzido em função do fluxo de saturação e dos fluxos conflituantes, no caso de cruzamentos prioritários e rotundas, ou da programação semafórica, no caso de intersecções ou passadeiras semaforizadas.
4. SAÍDA – É obtido a partir dos perfis de chegada e de aceitação, contribuindo para o PCF de entrada total do próximo cruzamento.

O programa ainda calcula um quinto perfil, FILA, representando a formação e dissipação da fila de espera em cada ciclo. As demoras obtêm-se integrando este perfil ao longo de um ciclo.

Para ilustrar estes conceitos, apresentam-se na Figura IV.2 os perfis cíclicos de fluxos relativos a um movimento de viragem à direita condicionado por programação semafórica. No perfil de chegada torna-se evidente uma certa homogeneização do ritmo de chegadas devido à dispersão dos pelotões originários do nó de montante. O perfil de aceitação está interrompido no período de interverde do semáforo e leva em conta a redução de capacidade devido aos processos de arranque e paragem. O perfil de saída, obtido da combinação do perfil de chegada e de aceitação, evidencia o elevado débito que se segue à abertura do sinal verde e que se prolonga enquanto existe fila de espera.

Quando esta se dissipa, o perfil de chegada passa a coincidir com o perfil de saída. Finalmente, o perfil de fila demonstra o processo de crescimento e dissipação da fila de espera.

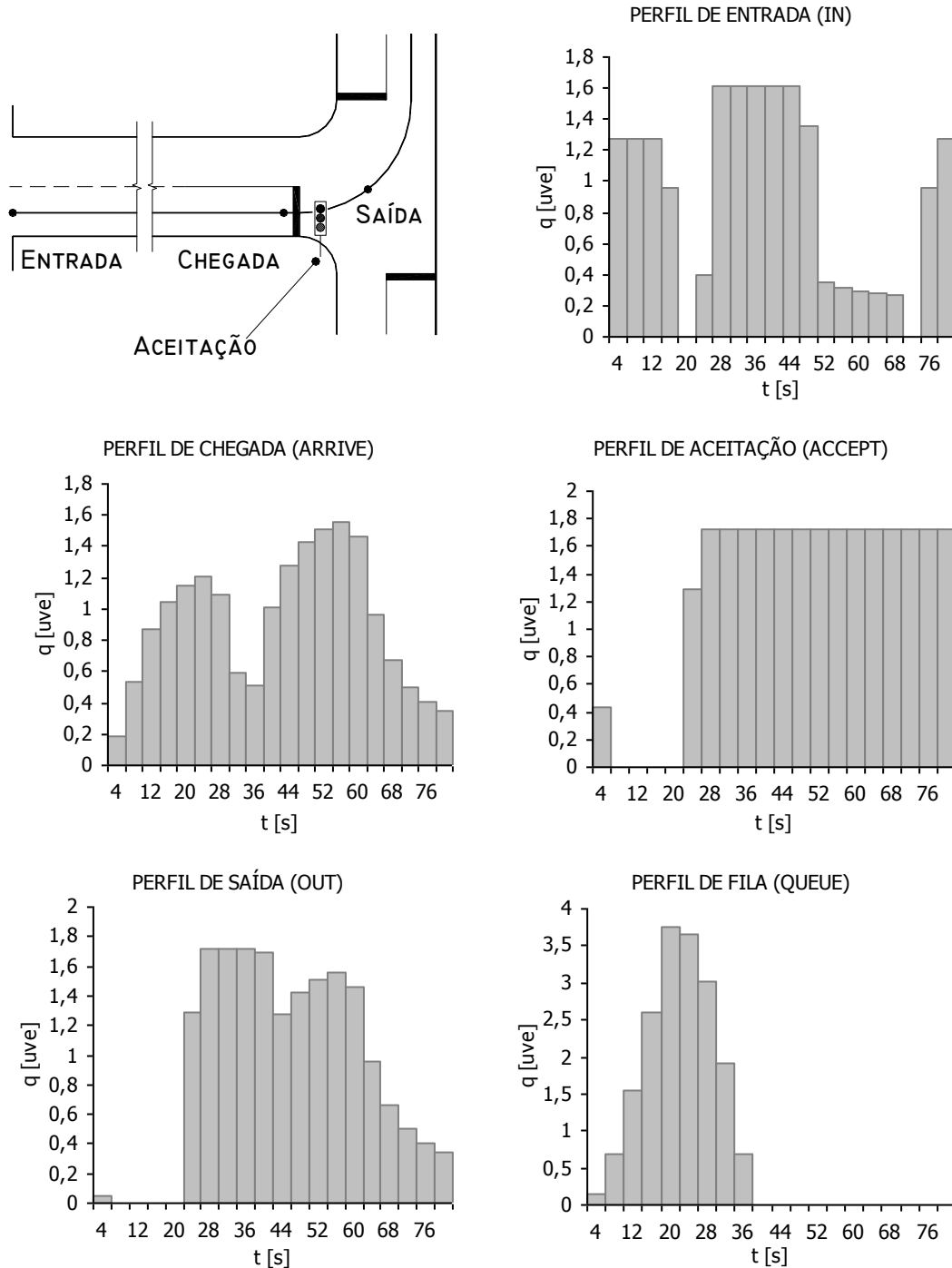


Figura IV.2 - Perfis cíclicos de fluxos

Uma vez que a determinação do perfil de aceitação depende dos fluxos conflituantes (nos cruzamentos prioritários e nas rotundas), que por sua vez dependem dos perfis de saída dos cruzamentos a montante, a determinação dos padrões finais só pode ser feita através de um processo iterativo, sendo os padrões de aceitação na iteração n determinados com base nos fluxos conflituantes resultantes da iteração $(n-1)$, até que não haja variações consideradas significativas nos padrões de saída. No final deste processo, para cada um dos movimentos de viragem são calculadas as demoras para fluxo nulo, na capacidade e para a última estimativa de fluxo. Os três pontos são então utilizados para ajustar uma curva fluxo-velocidade actualizada, na forma indicada na Figura IV.1, que é utilizada nas diversas iterações da fase de atribuição subsequente.

- O tratamento do tráfego em excesso

É ainda importante referir o modo como o SATURN lida com o tráfego em excesso. Na zona de atribuição, os efeitos de restrição da capacidade das vias são tomados em conta apenas no cálculo das demoras. Não é modelada a retenção de fluxos ao longo da rede. Já na zona de simulação, os efeitos de restrição de capacidade são considerados em dois passos: em primeiro lugar, o fluxo máximo a transferir para os nós de jusante é dado pela capacidade do movimento de viragem em causa, o que pode implicar a formação de fila de espera; no segundo passo, caso a fila de espera exceda a capacidade de *stockagem* da via, o modelo simula o efeito de *blocking back*, reduzindo a capacidade dos movimentos de viragem a montante desse arco e impedindo assim que o comprimento da fila exceda a capacidade de *stockagem*.

IV.1.5 Resultados do modelo

De acordo com os seus autores, o SATURN procura responder à questão “como irão variar os fluxos de tráfego numa rede rodoviária⁸ após a implementação de uma medida de gestão de tráfego?” (Hall *et al*, 1980 p.168). Trata-se portanto de um modelo cuja principal vocação é identificar os trajectos utilizados pelos diversos utilizadores da rede, permitindo avaliar medidas com consequências nas escolhas de trajectos, como a introdução de sentidos únicos, proibição de viragens, reformulação de cruzamentos, etc.

Assim sendo, pode considerar-se que a saída mais importante do modelo é o padrão de fluxos de tráfego na rede. Todavia, o cálculo desta distribuição implica a determinação de um conjunto alargado de indicadores relativos ao desempenho das intersecções com importância considerável para o analista (demoras para cada movimento de viragem, perfis cíclicos de fluxos e filas de espera, avisos de congestionamento).

⁸ Apenas foi possível identificar uma publicação onde é referida a utilização do SATURN para representar veículos não motorizados (Sharples, 1993), na qual é evidenciada a inaplicabilidade do modelo para modelar ciclistas (e modos não motorizados em geral).

No que respeita à escolha de trajectos, o modelo permite conhecer para os diversos pares OD as “árvores” e “florestas” e, para um arco ou movimento de viragem em particular, a matriz OD respectiva (matriz em secção).

São ainda de salientar as saídas relativas ao desempenho global do sistema, nomeadamente a matriz de custos (que permite saber quem ganha e quem perde com uma medida de intervenção na rede), a distância total percorrida e a velocidade média e ainda o consumo total de combustível (apenas na zona de simulação).

IV.2 Desenvolvimento do modelo COIMBRA – SAT

IV.2.1 Objectivos genéricos da modelação

Na sequência do que anteriormente foi apresentado, o impacto de erros / imprecisões do modelo na qualidade de representação de um sistema real é avaliado por analogia com os impactos que, em ambiente virtual, são devidos a alterações propositadamente introduzidas num modelo assumido perfeito, porque representativo de uma realidade possível.

Assim, o principal objectivo desta fase foi o de desenvolver o modelo de tráfego de referência, de forma a constituir uma base adequada à realização de um conjunto alargado de análises e que, tanto quanto possível, permitisse a generalização das metodologias utilizadas.

Entendeu-se que, preferencialmente, este modelo deveria possuir as seguintes características fundamentais:

- Representar uma rede viária urbana: é a elevada complexidade das redes viárias neste ambiente que normalmente justifica o desenvolvimento de modelos de simulação. Por outro lado, a codificação das redes urbanas é extremamente exigente no que respeita à quantidade e tipologia de dados, pelo que a fase de recolha de informação consome uma fatia considerável dos recursos alocados ao projecto, sendo assim particularmente relevante que esta seja feita da forma mais produtiva possível;
- Tratar uma área de estudo razoavelmente alargada: pretendeu-se com esta condicionante aumentar a representatividade dos resultados, ao mesmo tempo que se diminuía as ligações da rede com o meio exterior, facilitando a codificação do modelo base.

Da conjugação das condicionantes anteriores, do conhecimento da rede e da disponibilidade de dados, resultou a adopção natural da cidade de Coimbra como área a modelar.

IV.2.2 Caracterização geral da rede viária de Coimbra

Tal como acontece com muitas outras cidades de média dimensão de Portugal, o tecido urbano da cidade encontra-se organizado em redor de uma zona central, fortemente terciarizada e com elevados níveis de atracção de tráfego.

Nos últimos anos assistiu-se à progressiva diminuição da capacidade de resposta das vias radiais à cada vez maior procura, o que justificou a construção de vias de protecção circulares e a desclassificação de algumas vias interiores, em particular no núcleo histórico.

Presentemente, apesar de a rede não apresentar uma estrutura claramente hierarquizada, é possível identificar uma via periférica de função essencialmente colectora – a Circular Interna. Neste eixo, as condições de circulação estão essencialmente condicionadas por dois pontos. O primeiro é o cruzamento do Largo da Portagem, que será evitado com a abertura ao trânsito da Ponte Europa, que fecha a referida circular. O segundo é o cruzamento da Casa do Sal, que terá a sua procura razoavelmente diminuída com a conclusão da circular externa, também em construção.

A existência destes pontos de bloqueio faz com que a capacidade da circular seja insuficiente, com a consequência natural de, em praticamente toda a rede, se verificarem fenómenos do tipo “*rat-running*” e níveis de tráfego tendencialmente excessivos.

IV.2.3 Área de estudo e estrutura da rede

Numa primeira fase, definiu-se uma área de estudo delimitada pela circular interna da cidade, compreendendo a totalidade da malha urbana consolidada na margem direita. Este limite foi posteriormente estendido de forma a serem incluídas importantes vias exteriores à circular interna, diminuindo os pontos de ligação à rede exterior e ainda a facilitar a eventual expansão da rede, de modo a possibilitar a inclusão dos troços em construção / projecto. Daí resultou a área de estudo apresentada no Desenho A-1, em anexo, com aproximadamente 85 km², que abrange ou intersecta a maior parte das estradas do concelho.

Optou-se pela modelação da rede em dois níveis, como é prática comum com este tipo de modelos, distinguindo-se as áreas periféricas das áreas centrais:

- Zona periférica – Aproximadamente 69 km², rede viária esparsa, caracterizada por níveis pouco significativos de congestionamento e por distâncias consideráveis entre intersecções, modelada de forma convencional, no modo de atribuição;

- Zona central – Área com aproximadamente 16 km², rede viária densa, sujeita a congestionamento, com distâncias curtas entre intersecções, codificada com grande detalhe através do modo de simulação.

Esta forma de codificação em dois níveis dá normalmente lugar a que a área de atribuição envolva a área de simulação. No caso particular da rede de Coimbra, tal não acontece, uma vez que se optou pela codificação de duas importantes vias de penetração através do modo de simulação, pelo que nos limites norte e oeste a rede de simulação estabelece a fronteira com o meio exterior (ver a Figura IV.3 e o Desenho A-2, em anexo). Esta opção deveu-se à maior facilidade de codificar os nós de ligação no modo de simulação e à existência de volumes de tráfego particularmente intensos em alguns pontos destas vias, que aconselhavam a consideração dos efeitos de restrição de capacidade.

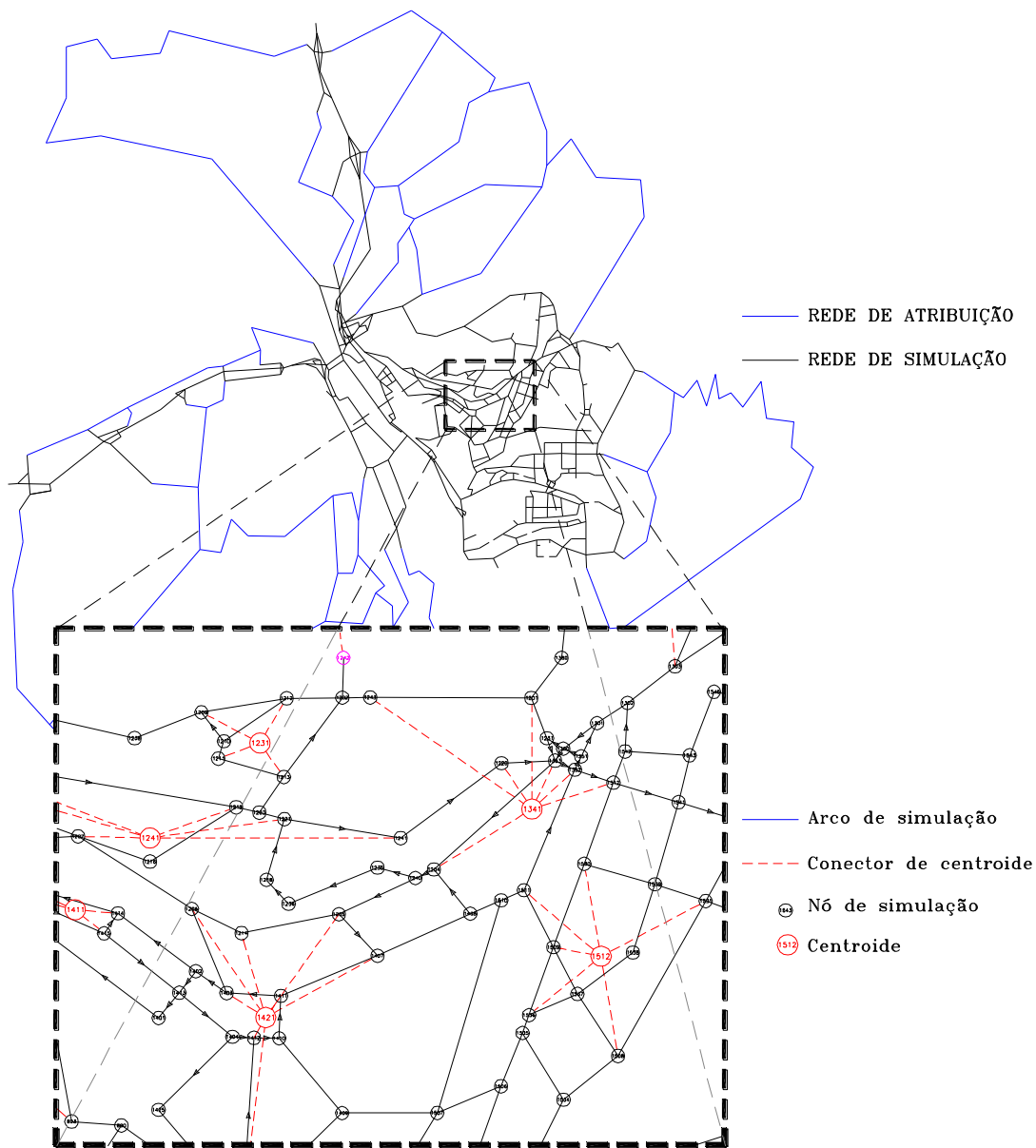


Figura IV.3 – Modelo COIMBRA-SAT: estrutura da rede

A rede viária modelada ficou genericamente representada pelo conjunto de elementos apresentados na Tabela IV.1:

Tabela IV.1 – Características base do modelo COIMBRA-SAT

Tipo de elemento	Quantidade
Cruzamentos prioritários	219
Cruzamentos semaforizados	28
Rotundas	29
Nós externos	48
Nós fictícios	100
Nós de atribuição	167
Zonas	105

A esquematização da rede foi efectuada com um *software* de desenho assistido por computador (AutoCAD), tendo por base cartografia recente à escala 1:1000 e 1:2000. As coordenadas dos nós foram extraídas automaticamente para um ficheiro de texto, que por sua vez integrou o ficheiro de dados do SATURN. Esta medida teve a vantagem de dispensar a medição e a codificação das distâncias dos vários arcos, bem como a codificação explícita das capacidades de *stockagem*, uma vez que o modelo permite o cálculo das distâncias a partir das coordenadas dos nós.

IV.2.4 Codificação da rede de atribuição

A codificação das características funcionais e do potencial de desempenho da rede de atribuição seguiu as recomendações do Departamento de Transportes do Reino Unido (UK DOT, 2002), embora tenham sido assumidas algumas simplificações significativas. Assim, considerou-se que todas as vias apresentavam um desempenho do tipo “cidade de pequena dimensão” (ver a Figura II.4 e a expressão (III.16)). Deste modo assumiu-se uma relação bi-linear entre a velocidade e o fluxo, com ponto de quebra (Q_B e V_B) quando o fluxo é igual a 700 UVE/h e com limite inferior de 30 km/h:

$$\begin{aligned} V &= V_0 - DEVEL/8 - P_{30}/8 - 12Q/1000 & Q < 700 \text{ UVE/h} \\ V &= V_B - 45(Q - 700)/1000 & Q > 700 \text{ UVE/h} \end{aligned} \quad (\text{V.16})$$

sendo:

- V velocidade média no arco
- V_0 velocidade em condições livres
- V_B velocidade no ponto de quebra
- $DEVEL$... percentagem da via com desenvolvimento marginal
- P_{30} percentagem da estrada sujeita ao limite de 30 milhas/h (\cong 50 km/h)
- Q fluxo para o qual se está a calcular a velocidade média.

Face à impossibilidade de, nesta fase, se quantificarem com rigor as variáveis *DEVEL* e *P₃₀*, optou-se por desprezar o seu efeito na redução da velocidade. No que respeita à velocidade livre, foram definidas 5 classes de vias (70, 60, ... , 30 km/h). A atribuição da classe a cada uma das vias (ver Figura IV.4) foi feita após um reconhecimento no local, de automóvel, com registo aproximado da velocidade⁹.

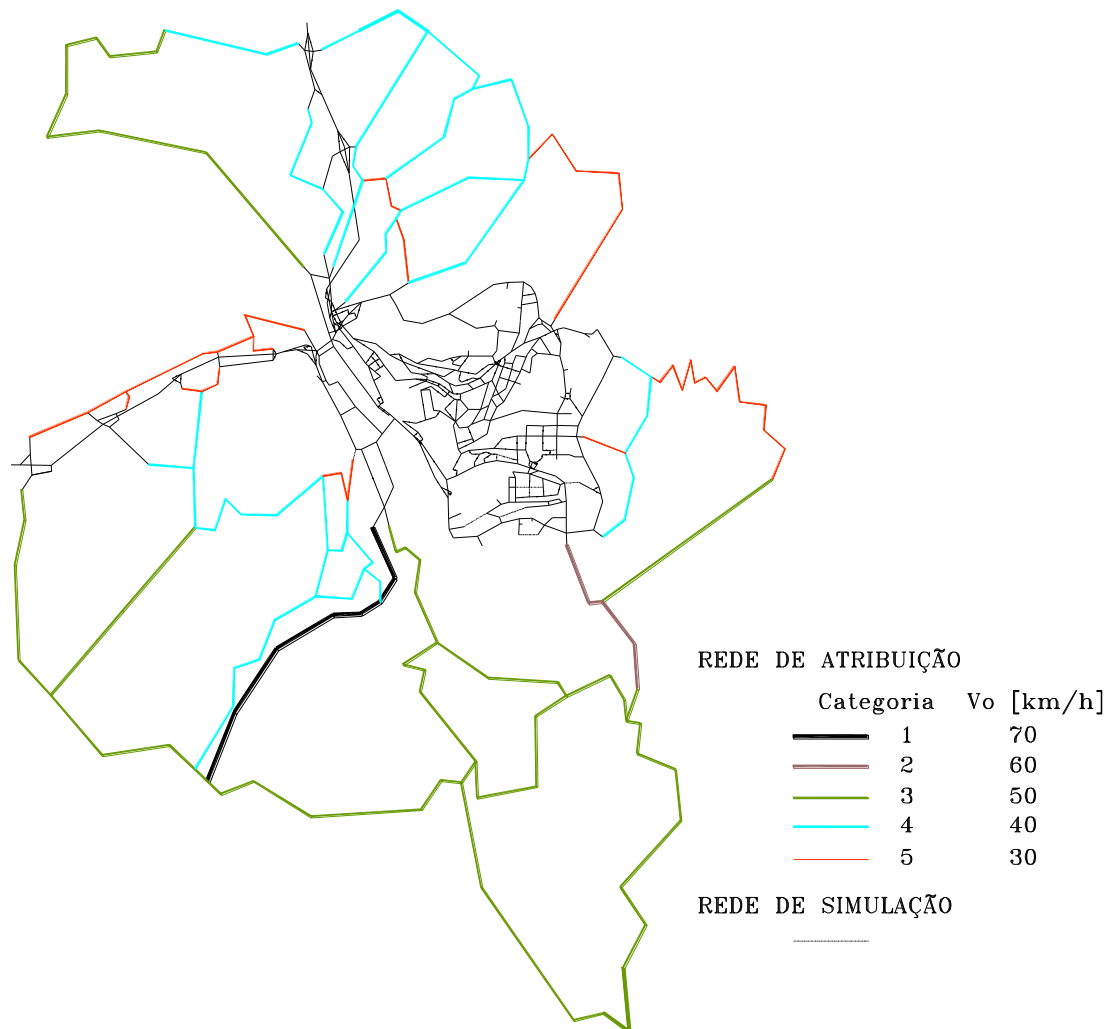


Figura IV.4 – Categorias das vias da rede de atribuição

A aplicação directa da expressão (V.16) não apresenta problemas para as velocidades livres mais elevadas. Contudo, verificou-se que para velocidade livres abaixo dos 60 km/h, são previstas na capacidade ($Q_C=1200$ UVE/h) velocidades abaixo dos 30 km/h, que o método toma como limite inferior para este tipo de vias. Ora, após passagens nos locais, confirmou-se que as velocidades mínimas são, de facto, inferiores a este limite, pelo que se entendeu necessário adaptar as expressões às condições locais. Assim,

⁹ A quantificação mais rigorosa das velocidades livres seria uma tarefa muito trabalhosa e dispendiosa. A variabilidade da velocidade ao longo dos arcos desaconselha a medição de velocidades instantâneas, em pontos fixos. A alternativa natural passaria pelo registo do tempo total de percurso, através do método do observador móvel. Tendo em conta o número de arcos de atribuição, compreende-se que esta é uma medida com aplicabilidade muito limitada.

respeitou-se a forma da relação bi-linear (declives constantes para as diversas velocidades livres, mas substituiu-se o valor da capacidade, tal que a velocidade na capacidade resultasse igual a um valor mínimo considerado razoável.

A incorporação de cada uma destas relações fluxo-velocidade no modelo SATURN é feita através da expressão (III.17):

$$T(Q) = T_0 + \frac{T_C - T_0}{Q_C^n} Q^n \quad Q < Q_C \quad (\text{V.17})$$

sendo:

T_0 tempo de trajecto nas condições livres

T_C tempo de trajecto na saturação

Q_C capacidade da via

n parâmetro de calibração

Não existe nenhum valor de n que estabeleça a equivalência exacta entre as relações bi-lineares fluxo-velocidade e as curvas fluxo-demora. Contudo, Yanaguaya (1994) deduziu a expressão (III.18) para o cálculo do valor óptimo, cuja adopção minimiza as discrepâncias entre os dois modelos:

$$n = \frac{\alpha - \beta}{\frac{Q_B Q_C^{-1}}{\beta^{-1} - \mu^{-1}} \ln\left(\frac{\mu}{\beta}\right) + \frac{1 - Q_B Q_C^{-1}}{\mu^{-1} - \alpha^{-1}} \ln\left(\frac{\alpha}{\mu}\right) - \beta} \quad (\text{V.18})$$

$$\alpha = \frac{1}{V_C} \quad \beta = \frac{1}{V_0} \quad \mu = \frac{1}{V_B}$$

onde os índices das variáveis 0 , B e C representam as condições livres, de quebra de declive e a capacidade, respectivamente. Na Figura IV.5 ilustra-se o processo de conversão para um caso particular, evidenciando-se os erros adicionais introduzidos por esta especificação do SATURN.

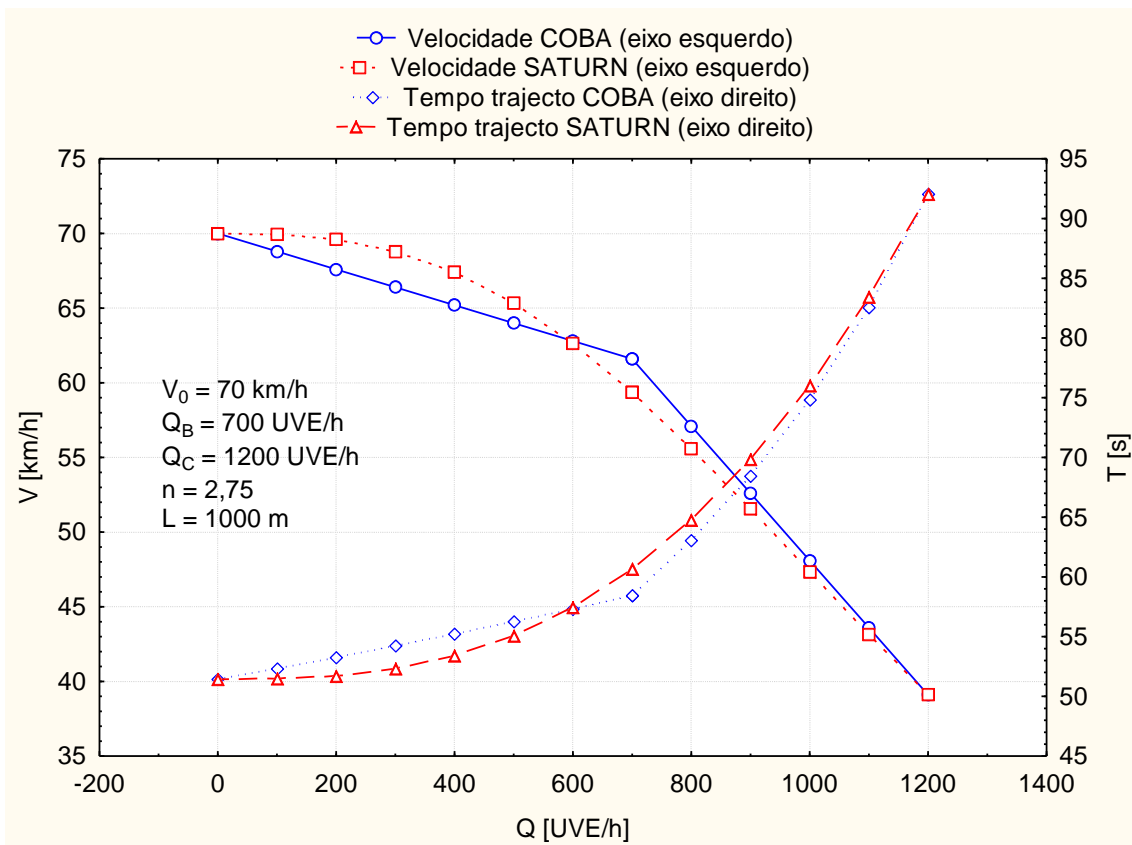


Figura IV.5 – Exemplo de conversão da relação fluxo-velocidade COBA em curva fluxo-demora SATURN

Nas tabelas IV.2 e IV.3 apresentam-se os valores resultantes da aplicação da relação fluxo-velocidade antes e após a correcção da capacidade, respectivamente, assim como das potências (n), decorrentes da utilização da fórmula de conversão de Yanaguaya.

Tabela IV.2 – Parâmetros das curva fluxo-demora sem correcção

V_0	V_B	V_C	Q_B	Q_C	α	β	μ	n
70	61,6	39,1	700	1200	0,03	0,01	0,02	2,75
60	51,6	30	700	1200	0,03	0,02	0,02	3,01
50	41,6	30	700	1200	0,05	0,02	0,02	3,5
40	31,6	30	700	1200	0,11	0,03	0,03	4,89
30	21,6	--	700	1200	--	--	--	--

Tabela IV.3 – Parâmetros das curvas fluxo-demora após correcção

V_0	V_B	V_C	Q_B	Q_C	α	β	μ	n
70	61,6	39,1	700	1200	0,026	0,014	0,02	2,75
60	51,6	30	700	1180	0,033	0,017	0,02	2,97
50	41,6	25	700	1069	0,04	0,02	0,02	3,06
40	31,6	20	700	958	0,05	0,025	0,03	3,08
30	21,6	15	700	847	0,067	0,033	0,05	2,89

Embora a expressão (V.17) esteja expressa em tempos, o SATURN permite que a especificação do potencial de desempenho seja feita em função das velocidades, pelo que os valores de V_0 e V_C , assim como de Q_C e n , foram codificados directamente a partir da Tabela IV.3.

IV.2.5 Rede de simulação

Existem 5 tipos diferentes de nós: externos, prioritários, semaforizados, fictícios e rotundas. Os nós externos e fictícios são auxiliares, sem papel activo no comportamento do modelo. Quanto aos outros tipos, é necessário codificar dados geométricos e operacionais (alocação de vias disponíveis para cada movimento, indicadores de prioridade relativa das diversas correntes de tráfego, programação semafórica, capacidade de *stockagem*), dados funcionais (velocidades nos arcos a montante, fluxos de saturação dos movimentos de viragem) e, em casos particulares, parâmetros de calibração (intervalos críticos de aceitação, demoras aleatórias).

IV.2.5.1 Características geométricas e operacionais

A alocação de vias disponíveis para cada movimento e as prioridades relativas são características que, apesar de justificaram uma visita ao local, não levantaram quaisquer problemas na sua codificação.

Já no que respeita aos cruzamentos semaforizados, com actuação pelos veículos e/ou peões, não foi possível evitar erros de especificação, uma vez que o SATURN apenas permite a modelação de soluções a tempos fixos. A este propósito, é interessante referir a experiência de modelação da rede de Bangkok (May *et al*, 1993), onde se verificavam ciclos entre 3 e 10 minutos (!), tendo-se admitido a existência de um ciclo único de 240 segundos em toda a rede.

IV.2.5.2 Velocidades

É possível utilizar curvas fluxo-velocidade para caracterizar os arcos da zona de simulação. No entanto, os autores do SATURN referem que em condições urbanas, as principais relações entre os fluxos e as demoras ocorrem essencialmente nas intersecções, e são essas relações que o modelo procura representar com rigor. Van Vliet e Hall (1997) sugerem assim o preenchimento deste campo com a velocidade nas condições prevalecentes ou, em alternativa, com a velocidade em condições livres.

Assim, optou-se pela atribuição a cada arco de uma velocidade de circulação fixa, em função de uma apreciação qualitativa de uma série de parâmetros, como a categoria da via, a existência de atrito lateral, a inclinação e extensão. Como forma de manter um

certo controlo sobre este processo, limitou-se a quantidade de valores possível ao conjunto {70, 60, 50, 40, 30, 20}.

IV.2.5.3 Fluxos de saturação

a) Em cruzamentos prioritários e semaforizados

A atribuição dos fluxos de saturação para os movimentos de viragem nos cruzamentos prioritários e semaforizados foi feita tendo como referência a metodologia preconizada pelo Highway Capacity Manual (TRB, 2000).

Segundo este método, o fluxo de saturação de movimento de viragem resulta da multiplicação de um valor de referência por um conjunto de factores de ajustamento que reflectem as condições locais:

$$Q_S = Q_{S0} N f_W f_{HV} f_G f_P f_{BB} f_A f_{LU} f_{RT} f_{LT} f_{LPB} f_{RPB} \quad (V.19)$$

sendo:

- Q_S fluxo de saturação para o movimento de viragem considerado
- Q_{S0} fluxo de saturação para as condições de referência
- N número de vias disponível
- f_W ajustamento dependente da largura das vias
- f_{HV} ajustamento dependente da proporção de veículos pesados
- f_G ajustamento dependente da inclinação das vias
- f_P ajustamento dependente da frequência de manobras de estacionamento
- f_{BB} ajustamento dependente da existência de paragens de autocarro
- f_A ajustamento dependente do tipo de área em que se insere a intersecção
- f_{LU} ajustamento dependente do modo de partilha das vias
- f_{LT} ajustamento para viragens à esquerda
- f_{RT} ajustamento para viragens à direita
- f_{LPB} ajustamento dependente da existência de passadeiras nas viragens à esquerda
- f_{RPB} ajustamento dependente da existência de passadeiras nas viragens à direita

Como se compreende, não é adequada a utilização desta fórmula, tal como se apresenta, ao trabalho de modelação de uma rede como a de Coimbra, onde foi necessário codificar cerca de 1500 fluxos de saturação.

Como forma de simplificar este processo, em função das expressões que dão origem a cada um dos factores de ajustamento, preparou-se um conjunto de tabelas de referência

para um número limitado de casos, sendo os valores resultantes arredondados ao múltiplo mais próximo de 50. Desprezaram-se factores de ajustamento previstos na metodologia, como a influência de peões / ciclistas, a existência de paragens de autocarro e o tipo de área, e procedeu-se ao ajustamento cuidado da capacidade em situações não previstas pela expressão (existência de pavimento degradado, casos extremos de inclinação, estrangulamentos, etc.). A Tabela IV.4 indica os fluxos de saturação adoptados no caso de trainéis com inclinações compreendidas entre -2% e +2%.

Tabela IV.4 – Fluxos de saturação de cruzamentos prioritários e semaforizados (-2% < i < +2%)

Largura da via [m]	Estacionamento [manobras/h]	Fluxo de saturação [UVE/h]	
		Tipo de viragem	
		Frente	Esquerda / direita
3,5	0	1900	1700
	15	1550	1400
	30	1450	1300
3	0	1750	1600
	15	1450	1300
	30	1350	1200

b) Em rotundas

No que respeita ao cálculo das capacidades e demoras em rotundas, o SATURN não diferencia os diversos movimentos de viragem de uma entrada, pelo que o conceito de “fluxo de saturação” se aplica ao conjunto dos movimentos de viragem (capacidade geométrica) e ao fluxo total conflituante de uma determinada entrada. Estes fluxos de saturação são então utilizados na seguinte expressão que devolve a capacidade da entrada respectiva:

$$Q_C = Q_{SE} \left(1 - \frac{Q_F}{Q_{SF}}\right)^{\frac{GAPR \cdot Q_{SF}}{3600}} \quad (V.20)$$

sendo:

Q_C capacidade da entrada

Q_{SE} fluxo de saturação da entrada (capacidade geométrica)

Q_{SF} fluxo de saturação no anel

Q_F fluxo conflituante

$GAPR$.. intervalo crítico de aceitação

Foi, contudo, possível dispensar a estimação destes fluxos de saturação e intervalos críticos, uma vez que se adoptou um método simples de codificação, sugerida no manual do SATURN, e compatível com a metodologia de cálculo de capacidades de rotundas do Reino Unido (UK DOT, 1993)

De acordo com este método, adopta-se para a capacidade geométrica de cada entrada o valor que resulta da aplicação da fórmula preconizada pelo Transport and Road Research Laboratory (TRRL) (Kimber, 1980) a uma rotunda com valores de referência (largura das vias de entrada: 3,5 m, ângulo de entrada: 30°, raio da entrada: 20 m, diâmetro do círculo inscrito: 40m, sem leque), ou seja, 1060 UVE/h por via. Considera-se que a capacidade de circulação no interior da rotunda é superior em 20% ao maior dos valores obtidos para as entradas e finalmente calcula-se o valor de $GAPR = 3600/Q_{SF}$ que compatibiliza os resultados obtidos pelas duas fórmulas (SATURN e TRRL). Os valores resultantes desta metodologia são apresentados na Tabela IV.5, onde o número de vias não inteiro é utilizado para representar entradas com leque.

Tabela IV.5 – Fluxos de saturação de rotundas e valor do parâmetro GAPR

Vias de entrada	Capacidade da entrada [UVE/h]		
	Q_{SE} [UVE/h]	Q_{SF} [UVE/h]	$GAPR$ [s]
1	1060	1272	2,8
1,5	1590	1908	1,9
2	2120	2544	1,4
2,5	2650	3180	1,1
3	3180	3816	0,9

IV.2.5.4 Intervalos críticos de aceitação

Estes parâmetros são utilizados em rotundas, nos cruzamentos prioritários e nos cruzamentos semaforizados, no caso de viragens com oposição.

O critério utilizado para especificar o valor do intervalo crítico em rotundas foi apresentado no ponto anterior. Já no que respeita aos intervalos críticos em cruzamentos, não se afigurou nesta fase aconselhável modificar os valores que o modelo assume por defeito: 5 segundos no caso de cruzamentos prioritários e semaforizados (GAP) e 3 segundos no caso de inserções através de via de aceleração ($GAPM$).

IV.2.6 Matriz origem-destino

IV.2.6.1 A matriz FCTUC

Houve a possibilidade de incorporar neste trabalho de investigação o resultado do complexo e dispendioso processo de construção da matriz origem-destino da cidade, levado a cabo pelo Departamento de Engenharia Civil da FCTUC no âmbito de um protocolo com a Câmara Municipal de Coimbra (Seco e Pinto, 2003).

A matriz FCTUC é constituída por 182 zonas (ver Figura IV.6), está discriminada por hora de viagem, motivo (casa-emprego; emprego-emprego, compras, aulas, saúde, etc.) e por classe de veículos (ligeiros e pesados).

O modelo foi desenvolvido tendo em vista a análise das condições de circulação à hora de ponta da manhã que, no caso da rede de Coimbra, foi assumido correspondente à matriz equivalente horária representativa do período 8:15 – 8:45. Para efeitos de modelação, agregaram-se os motivos de viagens e uniformizaram-se as correntes de tráfego em unidade de veículos equivalentes ligeiros (UVE), considerando que cada veículo pesado equivale a dois veículos ligeiros. A matriz assim obtida, que se apresenta no Anexo B, contém 24343 viagens de veículos equivalentes durante a hora de ponta da manhã.

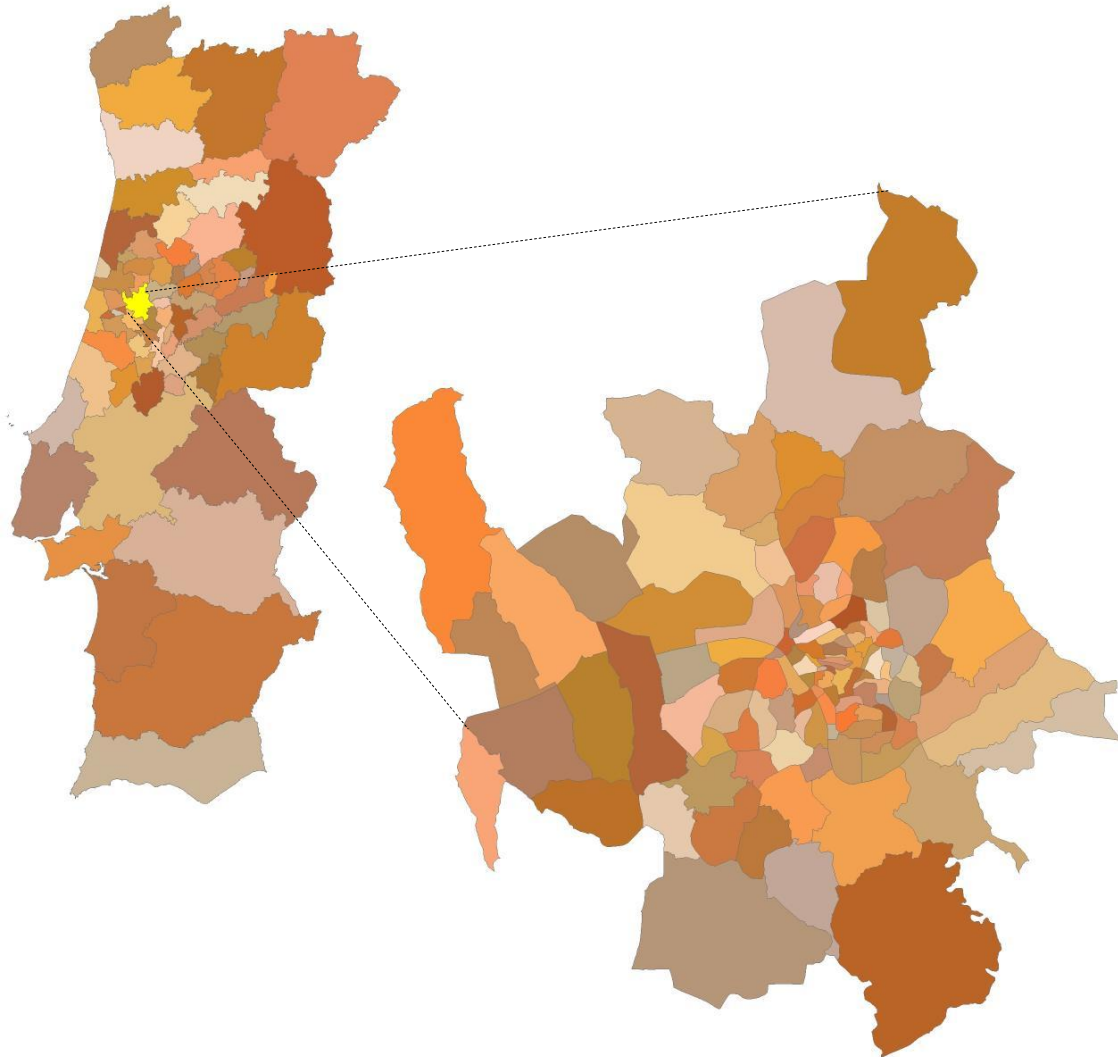


Figura IV.6 – Zonamento FCTUC (Fonte: Seco e Pinto, 2003)

IV.2.6.2 Compatibilização da matriz FCTUC com o modelo COIMBRA-SAT

O zonamento do modelo não é completamente coincidente com o zonamento adoptado para a construção da matriz FCTUC, particularmente no que respeita às viagens com origem ou destino fora da zona de estudo.

De facto, a matriz FCTUC representa as intenções de viajar entre pares de espaços físicos, independentemente dos trajectos disponíveis (Figura IV.7-a); ora, há casos em que, para o mesmo par O-D, uma parte destas viagens entra na área de estudo por um nó externo, e outra parte por outro ou outros. Foi assim necessário determinar estas proporções e desagregar as zonas em causa, o que originou uma matriz com 202 zonas (Figura IV.7-b). Por outro lado, muitas destas 202 zonas partilhavam o mesmo nó externo, o justificava a sua agregação (Figura IV.7-c), do que resultou a matriz SATURN, com 105 zonas.

Cada uma destas zonas foi modelada por um centróide, sendo a ligação destes à rede estabelecida por um ou mais conectores de centróide. Foram ligados 51 centróides aos nós da rede de atribuição e 54 aos arcos da rede de simulação.

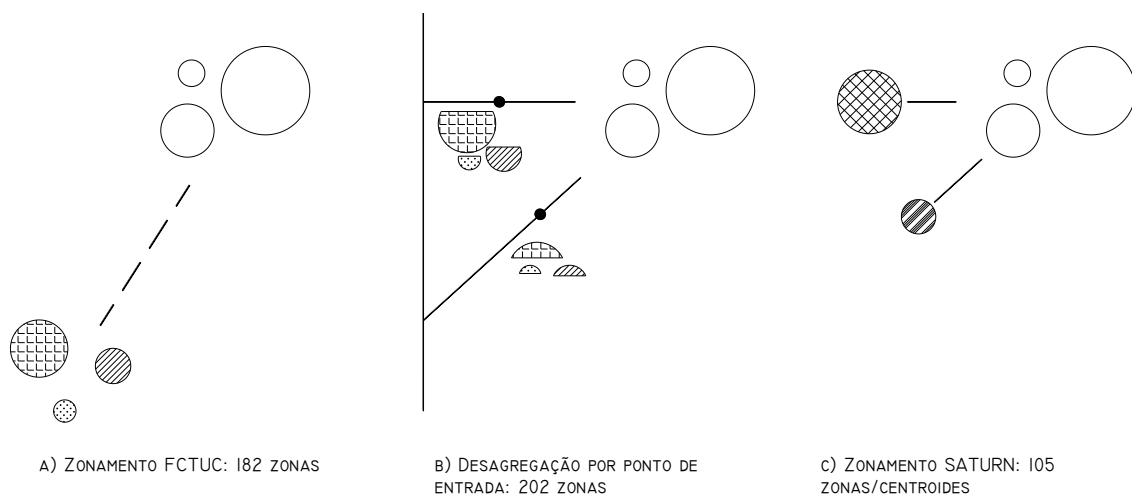


Figura IV.7 – Ilustração do processo de conversão da matriz FCTUC na matriz SATURN

IV.2.7 Avaliação da convergência do modelo

A convergência do modelo foi avaliada de acordo com as recomendações desenvolvidas no âmbito do projecto comunitário MUSIC (Van Vuren, 1996). Foram utilizados indicadores de dois tipos:

- Indicadores desagregados de estabilidade, baseados em variações absolutas de fluxos ou demoras entre iterações sucessivas;
- Indicadores de proximidade, que reflectem a proximidade entre o padrão de fluxos e custos e o objectivo da atribuição.

Do primeiro tipo, adoptaram-se os indicadores AAD (média das variações absolutas de fluxos entre iterações sucessivas) e %FLOW, que representa a proporção de arcos cujos fluxos sofrem uma variação inferior a um valor pré-estabelecido, normalmente 5%, (PCNEAR) entre iterações sucessivas.

Como indicador de proximidade, utilizou-se o *duality gap*, δ . Este indicador exprime a diferença entre o custo total das deslocações na rede para a presente iteração, e o custo total que resultaria se todas as viagens pudessem ser realizadas por trajectos de custos mínimos:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^N c_i(Q_i^n)(Q_i^n - Q_i^{n+1})}{\sum_{i=1}^N Q_i^{n+1} c_i(Q_i^n)} \quad (\text{V.21})$$

onde:

$c_i(Q_i^n)$ é o custo de deslocação na via i em função da estimativa presente de fluxo Q_i^n

Q_i^{n+1} é o fluxo resultante da atribuição tudo-ou-nada seguinte, em função dos custos de deslocação da presente iteração

Apesar de bons graus de convergência implicarem normalmente maiores tempos de execução, procurou-se obter um modelo tão estável quanto possível, com vista a que na análise de sensibilidade este processo não constasse da lista de possíveis factores explicativos da variabilidade dos resultados. Assim, adoptaram-se valores pouco usuais nos parâmetros de regulam este processo, nomeadamente o número máximo de iterações de atribuição e simulação (NITA = 99, de NITS = 99), o número máximo de ciclos (MASL = 99), a percentagem de arcos onde não se admitem variações excessivas entre iterações (ISTOP = 100) e o limite percentual dessas variações (PCNEAR = 1).

Na Tabela IV.6 apresentam-se os critérios de convergência e os resultados obtidos para o modelo COIMBRA-SAT, que demonstram de forma inequívoca a estabilidade do modelo.

Tabela IV.6 – Critérios de convergência e resultados do modelo COIMBRA-SAT

Indicador	Un.	Recomendação (projecto MUSIC)	Obtido
AAD	[UVE/h]	< 1	0,2
%FLOW [*]	[%]	> 95	100
Delta	[%]	< 1	0,1

[*] As recomendações pressupõem o valor usual do parâmetro PCNEAR, ou seja, 5%. Os valores obtidos referem-se a um PCNEAR = 1%, o que reflecte um maior nível de rigor.

IV.2.8 Correção de erros grosseiros e calibração

Durante a codificação da rede foram cometidos diversos erros grosseiros. Alguns impediam a normal execução do processo iterativo atribuição/simulação, sendo

facilmente detectados e corrigidos com o programa SATNET. Outros, como a não codificação de movimentos de viragem ou a troca de algarismos no preenchimento dos fluxos de saturação, representavam realidades possíveis e, como tal, apenas foram detectáveis através de uma análise cuidada.

Foram utilizadas as seguintes técnicas na detecção destes erros:

- Inspeção cuidada da codificação e comparação com a cartografia e esquemas dos cruzamentos;
- Análise de “florestas” entre pares O-D, o que permitiu identificar escolhas de trajectos não naturais, e evidenciou, entre outros, erros ou más opções nas ligações dos centróides à rede.

Após se terem corrigido os erros detectados iniciou-se a fase de calibração. Esta fase teve como objectivo corrigir os valores dos parâmetros de calibração e as estimativas de algumas variáveis independentes, de forma a minimizarem-se as discrepâncias entre os valores previstos e as observações.

IV.2.8.1 Parâmetros de calibração

Os erros cometidos na quantificação das principais variáveis independentes (fluxos de saturação e velocidades) são significativos, pelo que se impôs uma certa contenção no grau de ajustamento dos parâmetros.

Assim, e com a excepção dos parâmetros n (curvas fluxo-demora) e $GAPR$ (rotundas), estimados no ponto anterior, não se alterou nenhum dos outros valores de actuação local assumidos por defeito, uma vez que tal diminuiria o alcance de futuras medidas tomadas no sentido de detectar e corrigir erros de quantificação.

Desta forma, foi apenas equacionada a possibilidade de ajustar o valor da relação de parâmetros PPM/PPK, uma vez que, por um lado, se trata de uma intervenção isolada e perfeitamente controlável, e por outro, há referência de valores óptimos bastante diferentes daqueles que foram assumidos por defeito, PPM/PPK = 1 (no modelo de York (York City Council, 1996) foi obtida a relação PPM/PPK = 0,54 e no modelo de Thessaloniki (TRIAS, 1996) a relação PPM/PPK = 0,20).

Na Figura IV.8 indica-se a relação entre o indicador de aderência QGloGEHM (média dos GEH dos fluxos em toda a rede) e a relação PPM/PPK. Curiosamente, a relação que melhor ajusta as previsões do modelo COIMBRA-SAT às observações é precisamente aquela que é indicada por defeito, ou seja, PPM/PPK = 1.

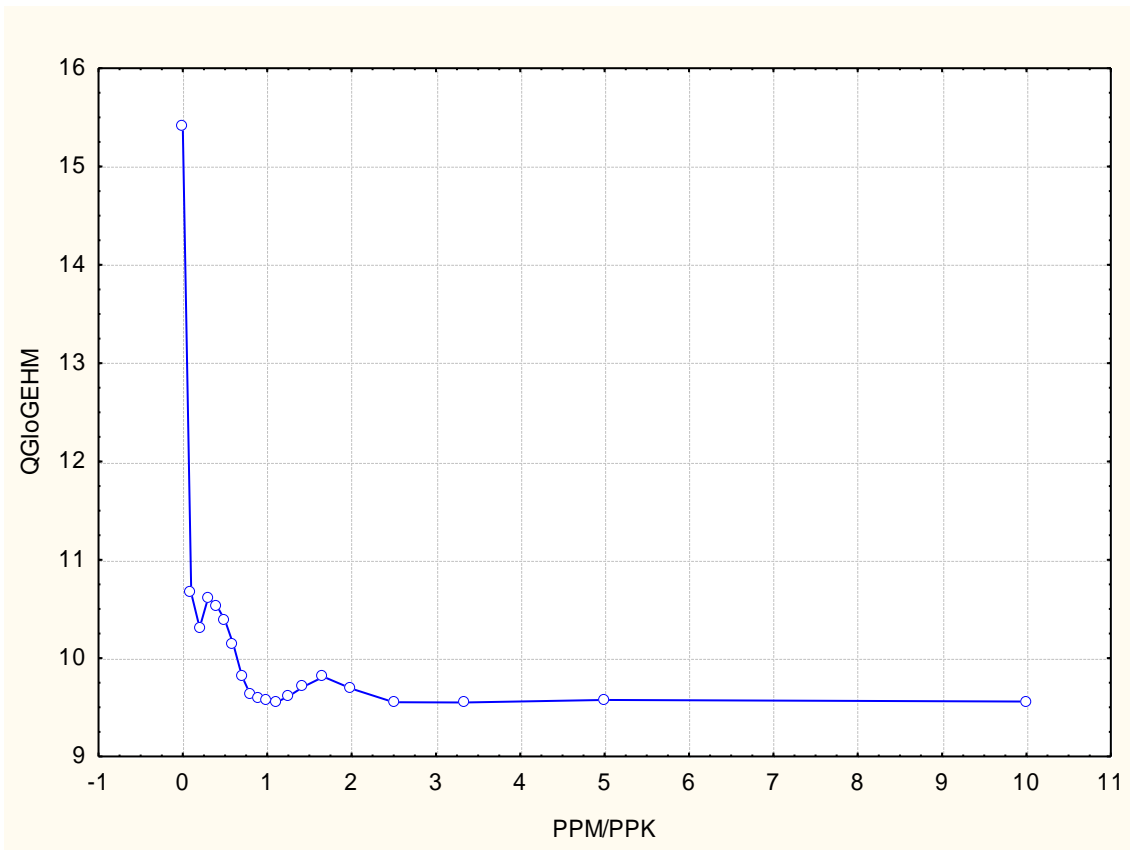


Figura IV.8 – Relação entre o indicador de aderência QGloGEHM e o quociente PPM/PPK.

IV.2.8.2 Variáveis independentes

O ajustamento dos valores das variáveis independentes em causa – fluxos de saturação e velocidades – foi suportado principalmente pela técnica de comparação de matrizes em secção observadas e previstas pelo modelo.

Esta técnica de calibração tem grandes potencialidades, na medida em que permite distinguir os erros devidos a falhas na matriz OD daqueles que se devem ao processo de codificação da rede. Contudo, a sua aplicação não consta geralmente da lista dos processos de calibração e validação: trata-se de um tipo de informação raramente disponível e que levanta algumas dificuldades na sua análise. Procurou-se assim simplificar e automatizar este processo.

Para tal, e após se constatar que a comparação, célula a célula, de matrizes de grande dimensão (105×105) era impraticável, definiu-se um zonamento agregado, com apenas 15 zonas. Tal implicou, para cada secção analisada, a recodificação das matrizes observadas ($182 \rightarrow 202 \rightarrow 105 \rightarrow 15$ zonas) e das matrizes produzidas pelo modelo ($105 \rightarrow 15$ zonas).

Para cada secção foi criada uma ficha (ver a Figura IV.9) onde ficaram evidenciadas as discrepâncias em três níveis – fluxo total (total da matriz), totais das origens e destinos (somadas das linhas e das colunas) e pares OD (células individuais).

O processo foi então automatizado através de um programa em VBA (*visual basic for applications*) que, estabelecendo a ligação entre o SATURN e a folha de cálculo Microsoft Excel, permitia a actualização das fichas sempre que eram introduzidas alterações no modelo.

O caso ilustrado de seguida (Figura IV.9) demonstra o interesse deste método: apesar de a comparação entre fluxos indicar uma boa aderência à realidade (observado: 1106 UVE/h, modelado: 1074, GEH = 0,97), verificaram-se discrepâncias relevantes no que respeita ao tipo de utilizadores do arco.

Através destas comparações constatou-se a necessidade de se introduzirem pequenos ajustamentos ao nível das ligações dos centróides e de se efectuarem correcções criteriosas das velocidades livres e dos fluxos de saturação em alguns arcos e movimentos de viragem. O desempenho do modelo melhorou significativamente após a implementação destas correcções.

Ponderou-se ainda recorrer ao módulo de estimação de matrizes, ME2, para corrigir a matriz origem-destino, ou parte desta. No entanto, tendo em conta os factos de a matriz disponível ser muito precisa, e de os pares O-D não intersectados nos postos de inquérito representarem uma pequena fracção do total de viagens, entendeu-se que esta opção traria benefícios pouco relevantes, ao mesmo que dificultaria uma posterior actualização da matriz com base em inquéritos.

Dado por concluído este processo, persistiram discrepâncias significativas em algumas das secções analisadas. Explicam-se pelo facto de existirem, para alguns pares O-D, trajectos alternativos não congestionados de custo muito semelhante, pelos quais as viagens no sistema real se distribuem. O modelo, através do modo de atribuição adoptado – determinístico, atribui a totalidade das viagens ao trajecto com o menor custo de deslocação. A resolução ou minimização deste problema implicaria assim a alteração das especificações do modelo, nomeadamente através da adopção do modo de atribuição estocástico, o que por sua vez dificultaria a monitorização do processo de convergência.

Posto / ID Matriz:	P23 012-1
Localização:	Av. António Portugal, sentido Descendente
Secção SATURN:	1677 1753
Rede SATURN:	RCO117
Matriz SATURN:	OD105B

Viagens (uve/h)	Destino													Observado		
	Arzila/Ameal/Taveiro	B Matos/Brasil/C.Branca	Baixa/M.Esquerda	C.Bispo/Tovim/Sebastião	Figueira/Mira/Antuzede	Hospitais	Lord./SP Frades/R. Nova	Loreto/Ingote/Adémia	Norte / Nordeste	S.Clara/SMBispo	Solum	Sudeste	Sul		Univ/Celas/D.Silva	V.Flores/ASJoão
Arzila/Ameal/Taveiro	0	15	0	2	0	0	0	0	0	0	16	3	0	0	17	53
B Matos/Brasil/C.Branca	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0	3	9
Baixa/M.Esquerda	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	19	9	0	0	19	53
C.Bispo/Tovim/Sebastião	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	12	3	0	0	3	27
Figueira/Mira/Antuzede	0	9	0	3	0	0	0	0	0	0	24	0	0	3	6	45
Hospitais	0	21	6	9	3	0	0	0	3	0	36	21	0	3	43	145
Lord./SP Frades/R. Nova	0	15	0	0	0	0	0	0	0	3	12	3	0	0	7	40
Loreto/Ingote/Adémia	0	41	6	3	0	0	0	0	3	0	59	6	0	6	12	136
Norte / Nordeste	0	28	15	15	0	0	0	0	3	3	65	29	0	6	45	209
S.Clara/SMBispo	0	6	0	19	0	3	0	0	3	0	73	6	0	0	16	126
Solum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3
Sudeste	0	0	0	0	0	3	0	0	3	0	6	0	0	0	3	15
Sul	3	0	0	10	0	0	0	0	3	0	10	0	0	0	22	48
Univ/Celas/D.Silva	0	36	12	3	3	3	0	3	0	6	52	24	6	0	46	194
V.Flores/ASJoão	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3
Total Geral	3	180	39	70	6	12	0	3	18	12	390	104	6	21	242	1106

Viagens (uve/h)	Destino													Saturn		
	Arzila/Ameal/Taveiro	B Matos/Brasil/C.Branca	Baixa/M.Esquerda	C.Bispo/Tovim/Sebastião	Figueira/Mira/Antuzede	Hospitais	Lord./SP Frades/R. Nova	Loreto/Ingote/Adémia	Norte / Nordeste	S.Clara/SMBispo	Solum	Sudeste	Sul		Univ/Celas/D.Silva	V.Flores/ASJoão
Arzila/Ameal/Taveiro	0	12	0	4	0	0	0	0	0	0	57	0	0	0	1	74
B Matos/Brasil/C.Branca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Baixa/M.Esquerda	0	6	0	2	0	0	0	0	0	0	5	6	0	0	4	23
C.Bispo/Tovim/Sebastião	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	3	0	0	2	11
Figueira/Mira/Antuzede	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	11
Hospitais	0	21	0	21	0	0	0	0	0	0	84	48	0	0	57	231
Lord./SP Frades/R. Nova	0	29	9	2	0	0	0	0	0	0	43	2	0	0	17	102
Loreto/Ingote/Adémia	0	8	0	7	0	0	0	0	0	0	95	3	0	0	9	122
Norte / Nordeste	0	10	0	16	0	0	0	0	0	0	124	1	0	0	5	156
S.Clara/SMBispo	0	14	0	8	0	0	0	0	0	0	83	0	0	0	0	105
Solum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sudeste	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sul	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Univ/Celas/D.Silva	0	38	0	1	0	0	6	0	0	0	93	30	0	0	72	238
V.Flores/ASJoão	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total Geral	0	138	9	61	0	0	6	0	0	0	601	93	0	0	168	1074

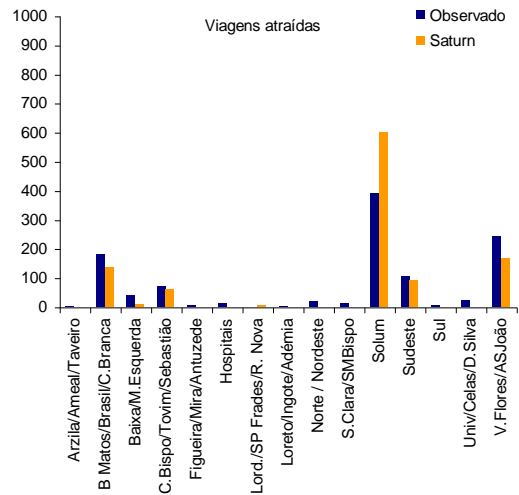
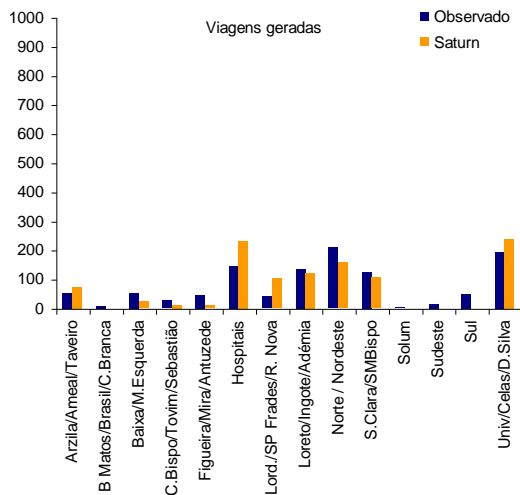


Figura IV.9 – Exemplo de ficha para comparação de matrizes em secção

IV.2.9 Validação

A avaliação objectiva da qualidade do modelo foi efectuada através de comparações entre fluxos de tráfego e tempos de trajecto, de acordo com as recomendações introduzidas no âmbito do projecto MUSIC (Van Vuren, 1996), as quais constituem uma adaptação às redes urbanas das recomendações britânicas já referidas.

IV.2.9.1 Fluxos de tráfego

Foram feitas contagens em 75 arcos e em 62 movimentos de viragem. Os resultados das comparações entre os fluxos observados e modelados são apresentados na Figura IV.10 e na Tabela IV.7. A análise do gráfico de dispersão sugere um erro sistemático de subestimação de fluxos, comprovado pelo declive da recta de regressão, $m = 0,85$.

O modelo não cumpre os critérios de validação, qualquer que seja o indicador adoptado.

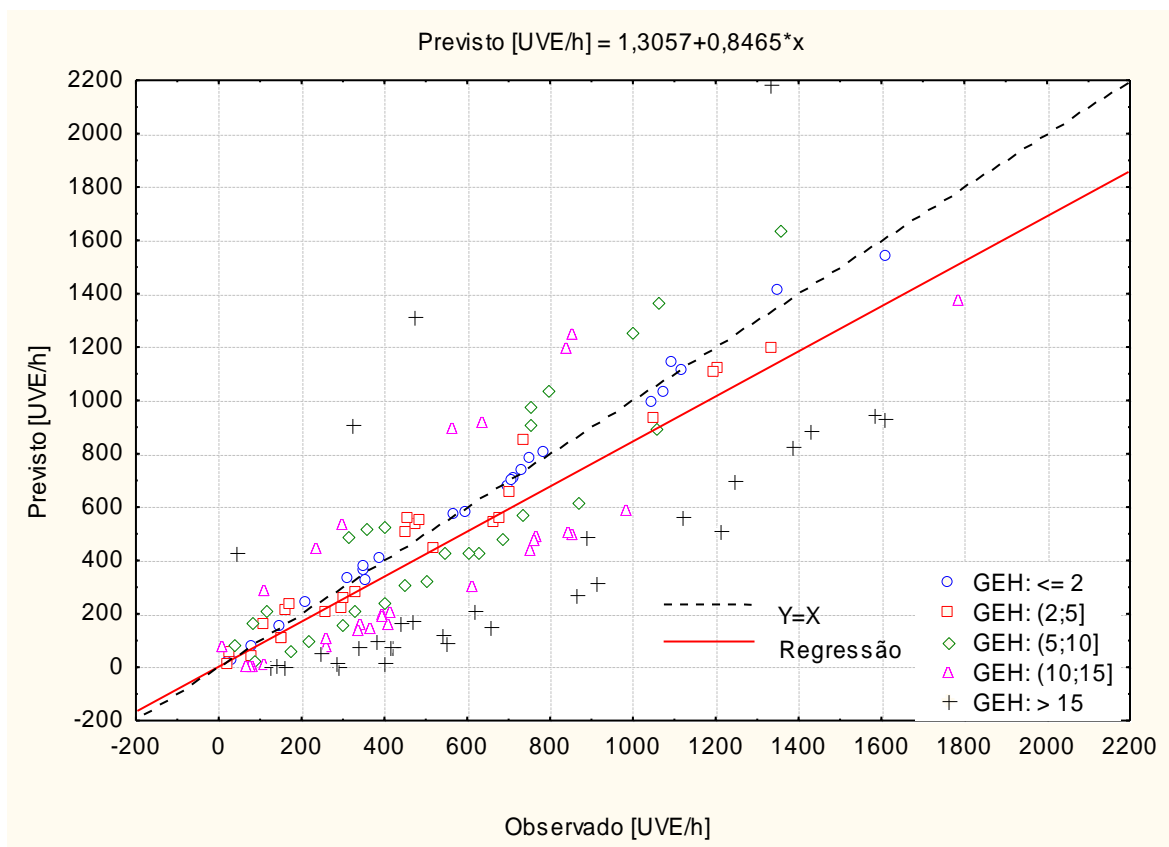


Figura IV.10 - Modelo COIMBRA-SAT: comparação entre fluxos observados e previstos

Tabela IV.7 – Validação: comparação de fluxos

Indicador	Notação	Recomendação (projecto MUSIC)	COIMBRA-SAT
<i>Arcos e movimentos de viragem (137)</i> Dif. absoluta < 100 (Q < 700 UVE/h) ou Dif. relativa < 15% (Q > 700 UVE/h)	--	> 85%	39%
Percentil para GEH = 5 ou GEH para percentil 85	-- QGloP85	> 85% < 5	36% 17,9
GEHM 85% melhores comparações	QGloGEHM85	< 2	7,4
GEHM amostra total	QGloGEHM	--	9,6
Coefficiente de determinação <i>r</i>	--	> 0,9	0,81
Declive da recta de regressão, <i>m</i>	--	[0,9 - 1,1]	0,85
<i>Arcos (75)</i> Dif. absoluta < 100 ou Dif. relativa < 15%	QArcOP15	> 85%	48%
<i>Movimentos de viragem (62)</i> Dif. absoluta < 100 ou Dif. relativa < 25%	QMovOP25	> 85%	35%

IV.2.9.2 Tempos de trajecto

Foram definidos cinco percursos na rede de simulação, representativos de três níveis hierárquicos de vias. Percursos 1A e 1B, em vias colectoras; percursos 2A e 2B, predominantemente em vias distribuidoras principais e percurso 3, ao longo de vias distribuidoras locais (ver a Figura IV.11).

Cada um dos percursos foi realizado sensivelmente entre as 8h00 e as 9h00 de um dia típico, em sequência¹⁰. Para além do tempo total foi registado o tempo de passagem em pontos-chave (ver a Figura IV.12, relativa ao percurso P1A).

O processo de validação foi realizado a dois níveis. No primeiro, discutiu-se a validade das próprias observações para validar modelos de simulação de tráfego. No segundo, face a observações representativas (validadas no primeiro nível) avaliou-se a capacidade do modelo para prever as durações dos trajectos.

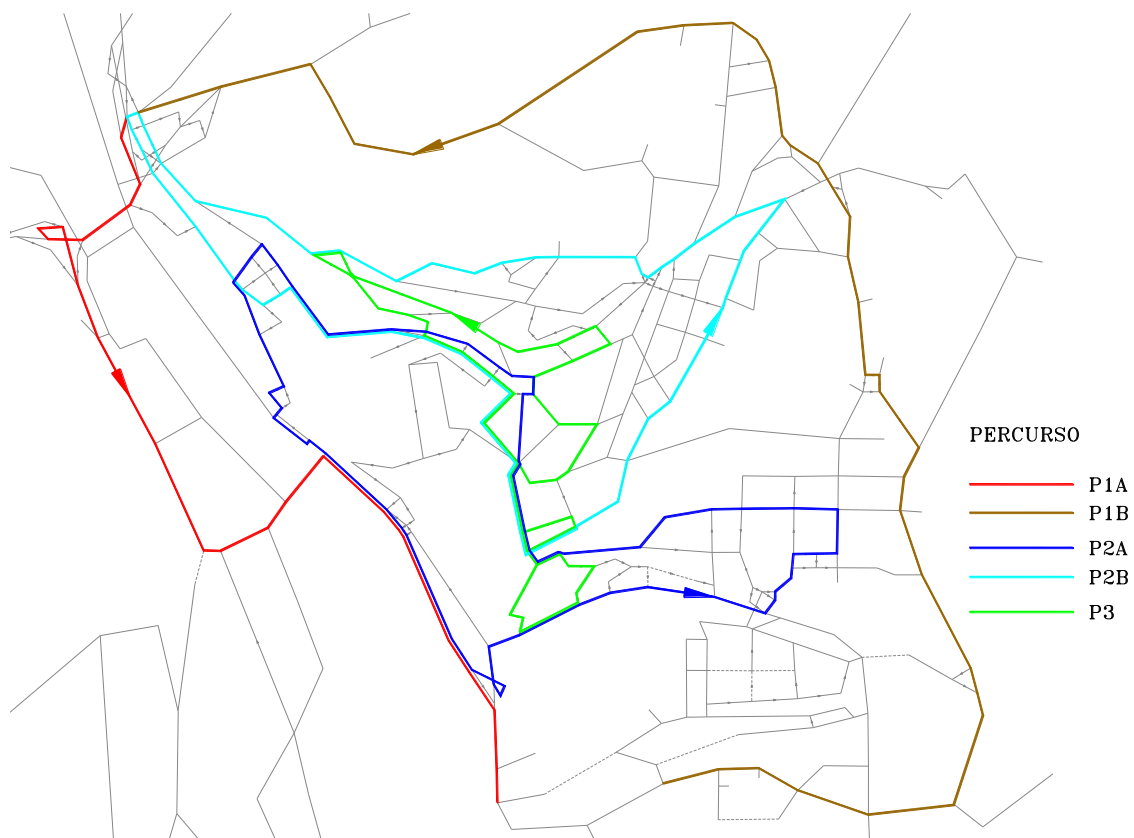


Figura IV.11 – Percursos adoptados para validar o modelo

¹⁰ Os percursos P1A e P1B formam um circuito e, como tal, foram realizados no mesmo dia.

PERCURSO 1A – 27/11/2002 Início: 7h45

Nó A	Nó B	Nó C	Local	Tempo de passagem (s)			
				COIMB. SAT	Pass. 1	Pass. 2	Pass. 3
410	409	418	ROT. C. SAL / F. MAGALHÃES	0	0	0	0
108	209	210	ROT. GUARDA INGLESA	160,6	95	110	102
209	210	205	ROT. P. PEQUENITOS	189,2	166	339	536
205	206	207	JOÃO REGRAS/INÊS DE CASTRO	565,8	300	541	747
207	1000	702	PORTAGEM	873,7	420	681	881
707	708	714	PARQUE (GALP)	925,1	476	739	935
2002	2004	2201	URBANO DUARTE/C. SEIXAS	1006,9	573	856	1062

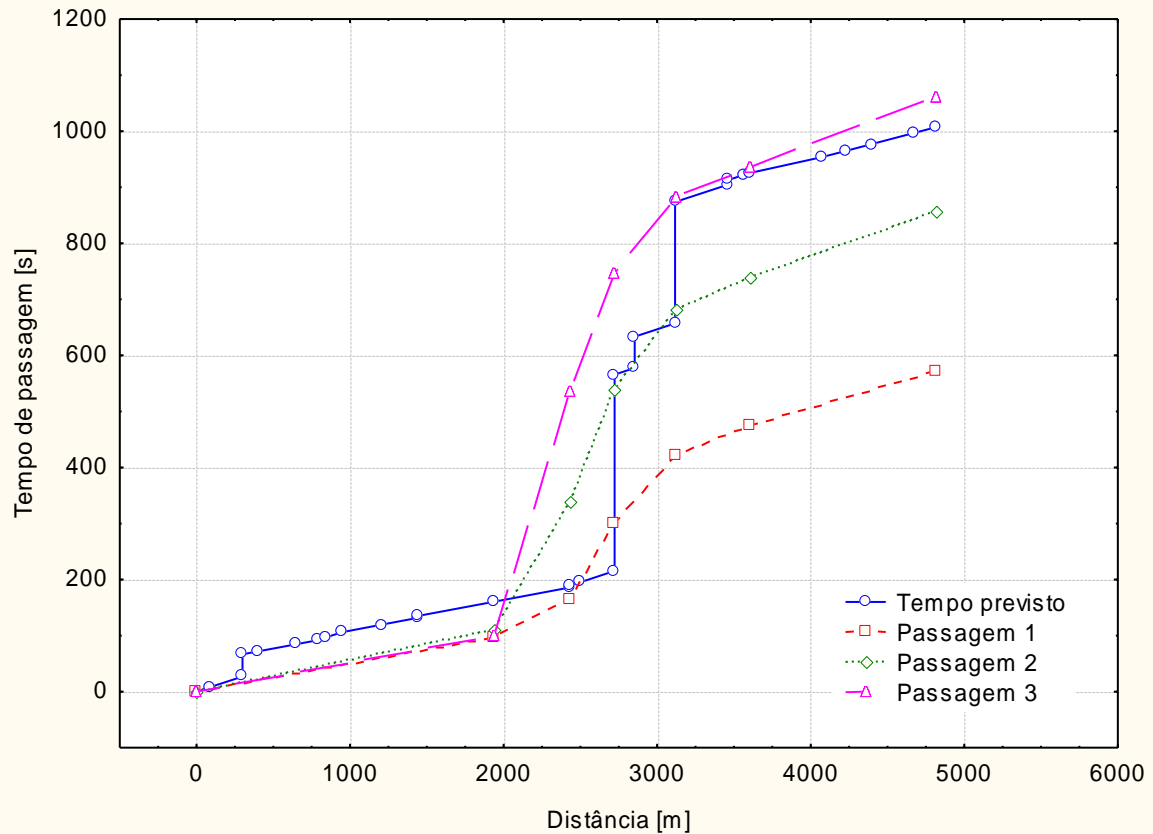


Figura IV.12 – Percurso P1: Comparação entre tempos de percurso observados e previstos pelo modelo

a) *Validação dos dados*

De acordo com as recomendações britânicas (UK DOT, 2002), seria razoável pretender uma precisão de $\pm 10\%$ na estimativa do tempo médio de deslocação relativo à população dos condutores, com um nível de confiança de 95%.

O erro máximo da estimativa e a precisão são dados, respectivamente, pelas fórmulas (III.22) e (III.23):

$$E = t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (\text{V.22})$$

$$p = \frac{E}{\bar{x}} \quad (\text{V.23})$$

onde $t_{\alpha/2}$ é o valor crítico da distribuição t de Student para o intervalo de confiança de 95% ($\alpha=0,05$) e s , \bar{x} e n são, respectivamente, o desvio padrão, a média e o tamanho da amostra de tempos de percurso.

Na Tabela IV.8 indicam-se, para os diversos percursos, as precisões das estimativas. Verifica-se que não respeitam o valor de referência, pelo que seria necessário efectuar mais observações. Contudo, aponta-se o facto de que o número de corridas necessárias para reduzir o erro ao limite de $\pm 10\%$ seria impraticável, face à variabilidade observada (por exemplo, no percurso P2A seriam necessárias 24 corridas).

Tabela IV.8 – Precisão da estimativa da média do tempo de percurso

Percurso	Tempos totais de percurso [s]				Média	Desvio Padrão	Precisão
	Pass. 1	Pass. 2	Pass. 3	Pass. 4			
P1A	573	856	1062	--	830,3	245,5	73%
P1B	773	860	923	--	852,0	75,3	22%
P2A	1360	1950	2225	--	1845,0	442,0	59%
P2B	1490	1672	1477	--	1546,3	109,0	18%
P3	980	1634	1260	1235	1277,3	269,4	34%

b) *Validação do modelo*

Tendo em conta os objectivos deste trabalho, admitiu-se que a precisão das estimativas dos tempos de percurso é adequada. Na Tabela IV.9 e na Figura IV.13 comparam-se estes tempos de percurso com as previsões do SATURN. Os resultados obtidos são reveladores da pouca robustez do modelo, na medida em que apenas com o percurso P2B foi respeitado o critério de validação – diferença inferior a 15% ou um minuto (recomendações MUSIC - Van Vuren, 1996).

Tabela IV.9 – Validação: comparação de tempos de percurso

Percurso	Tempos totais de percurso [s]					SATURN
	Média	Tolerância 1 min.		Tolerância 15 %		
		[-]	[+]	[-]	[+]	
P1A	830,3	770,3	890,3	705,8	954,9	1006,7
P1B	852,0	792,0	912,0	724,2	979,8	617,9
P2A	1845,0	1785,0	1905,0	1568,3	2121,8	1057,2
P2B	1546,3	1486,3	1606,3	1314,4	1778,3	1333,3
P3	1277,3	1217,3	1337,3	1085,7	1468,8	926,9

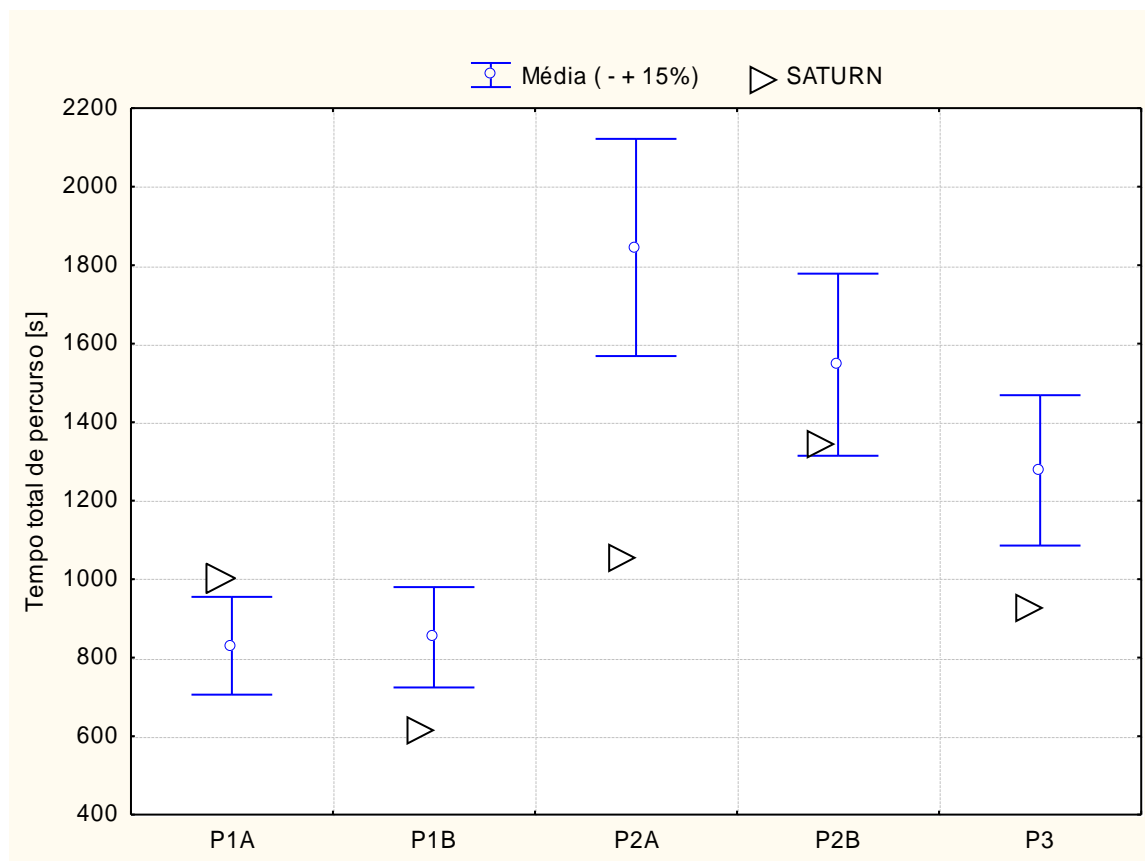


Figura IV.13 – Validação: Comparação de tempos de percurso

IV.2.10 Conclusões

O modelo COIMBRA-SAT não respeita os critérios de validação referenciados anteriormente, pelo que é inadequada a sua utilização em processos de planeamento e gestão da rede. Entende-se, contudo, que com uma quantificação mais rigorosa de algumas variáveis e o conseqüente processo de calibração será possível obter uma ferramenta válida para esses fins.

Já no que respeita à aplicabilidade do modelo à presente investigação, considera-se que é plenamente adequado. Por um lado, a condição de ser “perfeito” é respeitada, uma vez que não há necessidade de que o modelo represente uma realidade específica e pré-determinada, bastando que se trate da representação perfeita de uma realidade possível e não muito distinta daquela que se pretendia simular. Por outro lado, é diversificado em termos de tipologias de vias e de intersecções, de graus de congestionamento, e tem uma dimensão apreciável, condições que permitem a realização de uma grande variedade de análises.

V ANÁLISE DAS RELAÇÕES ENTRE ERROS DE QUANTIFICAÇÃO E O DESEMPENHO DOS MODELOS

V.1 Introdução e metodologia geral

No Capítulo III apresentaram-se as linhas gerais de uma metodologia de análise da sensibilidade de modelos de simulação de tráfego a erros de quantificação. Essa metodologia pressupõe a existência de uma base de trabalho, um modelo “perfeito”, cujo desenvolvimento foi descrito no Capítulo IV e de que resultou o modelo COIMBRA-SAT.

No presente capítulo, o teste da metodologia passou por uma análise das condições de aplicabilidade de um conjunto de indicadores de aderência referenciados nas recomendações britânicas.

Posteriormente, de entre os problemas identificados ao nível da possível ocorrência de erros de quantificação, e passíveis de análise, foi seleccionado um conjunto considerado representativo das diferentes tipologias (ver a Tabela V.1).

Para cada caso começaram por se especificar as características concretas dos diferentes tipos de erros e a forma como podem ser modelados. Foram depois desenvolvidos programas específicos, em VBA (*visual basic for applications*) que permitiram a automação de todas as fases do processo, nomeadamente a geração dos erros e a criação dos respectivos ficheiros de dados, a execução em modo *batch* do SATURN e a conversão em folhas de cálculo Microsoft Excel dos resultados das simulações, para posterior análise (ver o Anexo C, onde se apresenta a “ficha de trabalho” que discrimina os passos envolvidos numa análise específica).

Tabela V.1 – Tipos de problemas/análises

1. Avaliação do impacto dos erros de quantificação na qualidade global do modelo	Variáveis de ocorrência singular – erros sistemáticos	V.3.1
	Variáveis de ocorrência múltipla – erros aleatórios	V.3.2
	Variáveis de ocorrência múltipla – combinação de erros aleatórios e sistemáticos	V.3.3
2. Avaliação do desempenho do modelo em função da quantidade de erros que se cometem na quantificação de uma variável de ocorrência múltipla		V.4

3. Análise de eventuais efeitos de potenciação / compensação de impactos quando são cometidos erros de quantificação em duas ou mais variáveis simultaneamente		Não realizada
4. Identificação e caracterização dos elementos da rede que mais condicionam a qualidade do modelo	a. Identificação e caracterização os elementos da rede cuja má caracterização mais condiciona o desempenho do modelo	V.5.2
	b. Estudo da relação entre o grau de susceptibilidade dos diferentes elementos da rede e as suas características básicas	V.5.3
5. Avaliação da importância da inter-relação espacial dos elementos onde são cometidos os erros de quantificação		V.6
6. Avaliação dos eventuais efeitos de degradação espacial dos impactos		V.7
7. Importância do ambiente rodoviário	a. Estrutura da rede	Não realizada
	c. Grau de congestionamento	V.8.2
	d. Valorização relativa do tempo/distância	0
8. Importância do contexto de modelação		Não realizada

V.2 Avaliação do comportamento dos indicadores de aderência à realidade

V.2.1 Objectivos e metodologia

No ponto III.5.4 referiu-se que as mais recentes recomendações britânicas, tomadas como referência para esta investigação (Van Vuren, 1996), envolvem a utilização de dois indicadores do estado do sistema – fluxos de tráfego e tempos de trajecto – e diversos critérios de validação (rever as tabelas IV.7 e IV.9). Observou-se também que nenhum dos critérios de validação preconizados por essas recomendações é plenamente adequado à realização de análises de sensibilidade. Para esse efeito interessa adoptar um único indicador, dependente de todos os elementos da rede e sensível à totalidade das discrepâncias registadas, independentemente do seu valor. O indicador QGloGEHM respeita essas condições.

Como ponto prévio da análise de sensibilidade estudou-se, assim, o comportamento dos principais indicadores de aderência e critérios de validação associados (os indicadores QArcOP15, QMovOP25, QGloP85, QGloGEHM85 e, em particular, o QGloGEHM, para comparações de fluxos de tráfego, e o indicador VR15, para comparações de tempos de trajecto).

Essa análise foi feita com referência a uma única tipologia de erros – erros aleatórios em todas as ocorrências de uma variável. Tal como referido no ponto III.4.4, esta tipologia é representativa dos processos de estimação de variáveis que recorrem a observações ou a sub-modelos devidamente calibrados (que não introduzem desvios sistemáticos).

Para proceder a esta avaliação foram simulados erros de quantificação naquelas que, pela quantidade de vezes que são aplicadas na caracterização das redes, são consideradas as variáveis da rede de simulação com maior importância no desempenho do modelo. São, nomeadamente, as velocidades de circulação nos arcos de simulação (934 ocorrências) e os fluxos de saturação dos movimentos de viragem (1487 ocorrências).

Para cada uma destas variáveis, foram introduzidos em todos os elementos da rede erros de intensidade variável, tal que a sua distribuição seguia a lei Normal e que o erro médio era nulo. Assim, cada valor foi substituído por outro extraído aleatoriamente de uma população normalmente distribuída, cuja média era o próprio valor inicialmente codificado e com coeficiente de variação (CV) constante em toda a rede. Concluídas as alterações, correu-se o modelo sobre a rede alterada e registaram-se os resultados (fluxos e tempos, nos arcos e nos movimentos de viragem).

O processo foi repetido a dois níveis: o primeiro, para o mesmo coeficiente de variação, um número de vezes que se entendeu adequado para compreender a variabilidade dos resultados relativamente à forma de distribuição dos erros pelos diferentes elementos da rede (20 vezes). O segundo, para diferentes coeficientes de variação, tal que ficasse evidenciada a sensibilidade do modelo face a diferentes intensidades do erro (de 2 a 30%, com incrementos de 2%). Para cada uma das análises, e com estes parâmetros em particular, foram necessárias 300 corridas.

V.2.2 Resultados obtidos

Nas Figuras V.1 e V.2 apresenta-se a evolução dos indicadores QArcOP15 e QMovOP25 (ordem percentual dos arcos e movimentos de viragem em que se registam variações de fluxos inferiores a, respectivamente, 15% e 25%, ou 100 UVE/h) para diferentes graus de precisão na quantificação das variáveis “fluxos de saturação” (Figura V.1) e “velocidades nos arcos de simulação” (Figura V.2), destacando-se os seguintes aspectos:

- O comportamento dos indicadores, no intervalo considerado, é bem ajustado por curvas polinómicas de segundo grau;
- O indicador QArcOP15 é ligeiramente mais exigente do que o indicador QMovOP25. Tendo como referência os erros nos fluxos de saturação, em média é respeitada a condição de validação até um CV de 20,5% no caso do primeiro e de 25,0% no caso do segundo.

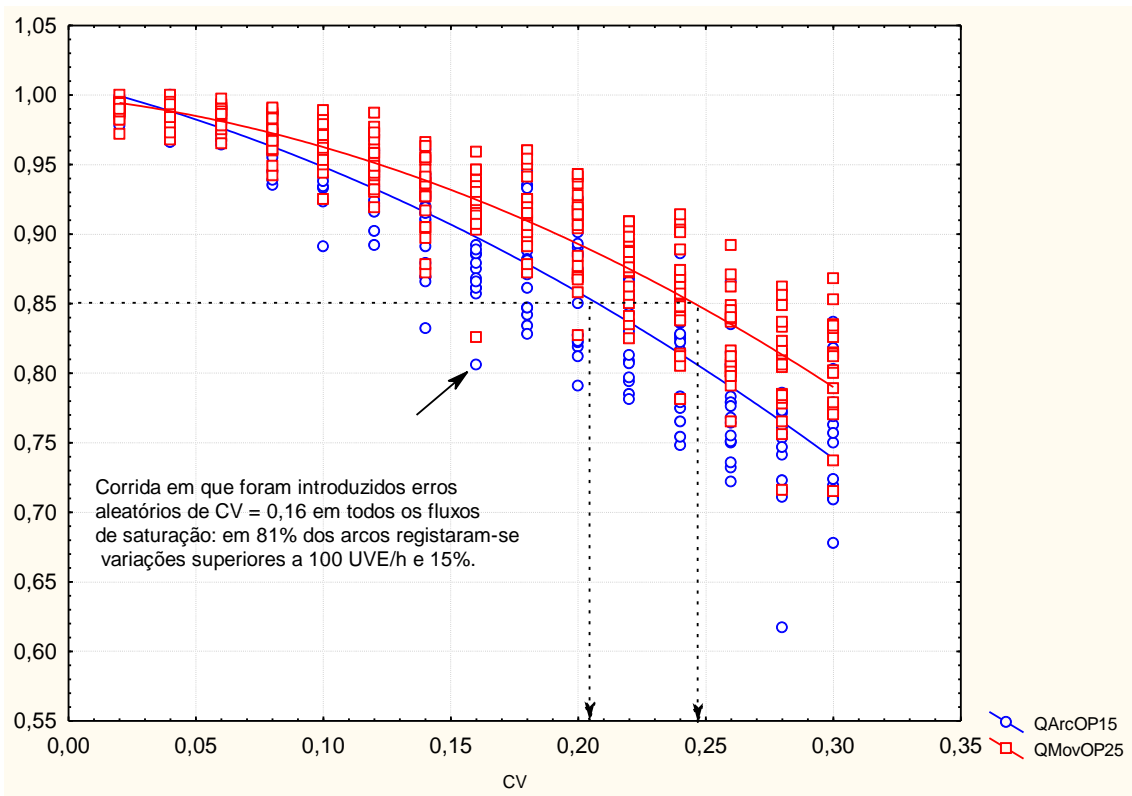


Figura V.1 – Erros aleatórios nos fluxos de saturação em toda a rede de simulação: Indicadores QArcOP15 e QMovOP25

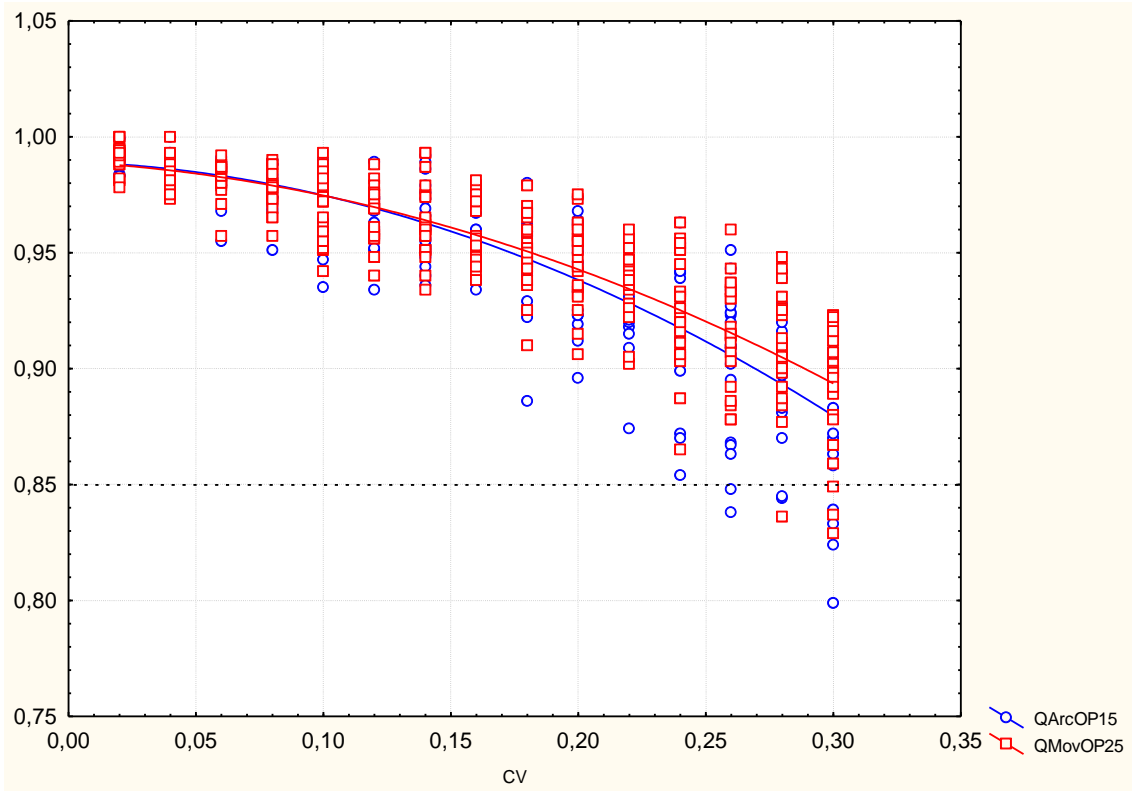


Figura V.2 – Erros aleatórios nas velocidades em toda a rede de simulação: Indicadores QArcOP15 e QMovOP25

As sensibilidades dos indicadores QGloP85 (GEH correspondente ao percentil 85 das variações de fluxos, na globalidade dos arcos e movimentos de viragem), QGloGEHM (GEH médio das variações de fluxos, na globalidade dos arcos e movimentos de viragem) e QGloGEHM85 (GEH médio das variações de fluxos, na globalidade dos arcos e movimentos de viragem, relativamente às 85% melhores previsões) aos erros aleatórios nas variáveis “fluxos de saturação” e “velocidades nos arcos de simulação” são indicadas, respectivamente, nas Figuras V.3 e V.4, das quais se pode constatar que:

- Os impactos dos erros tendem a aumentar com o coeficiente de variação, de uma forma aproximadamente linear no primeiro caso (fluxos de saturação), e exponencial no segundo (velocidades);
- O indicador QGloP85 apresenta quase invariavelmente valores superiores ao indicador QGloGEHM85 bem como uma maior variabilidade, particularmente para os maiores coeficientes de variação; O indicador QGloGEHM enquadra-se, tanto ao nível da “reactividade” como da variabilidade, entre os dois primeiros;
- O grau de exigência deste grupo de indicadores é da mesma ordem de grandeza que a do grupo {QArcOP15; QMovOP25};
- Os três indicadores apresentam andamentos muito semelhantes, o que sugere a oportunidade de utilização de apenas um deles.

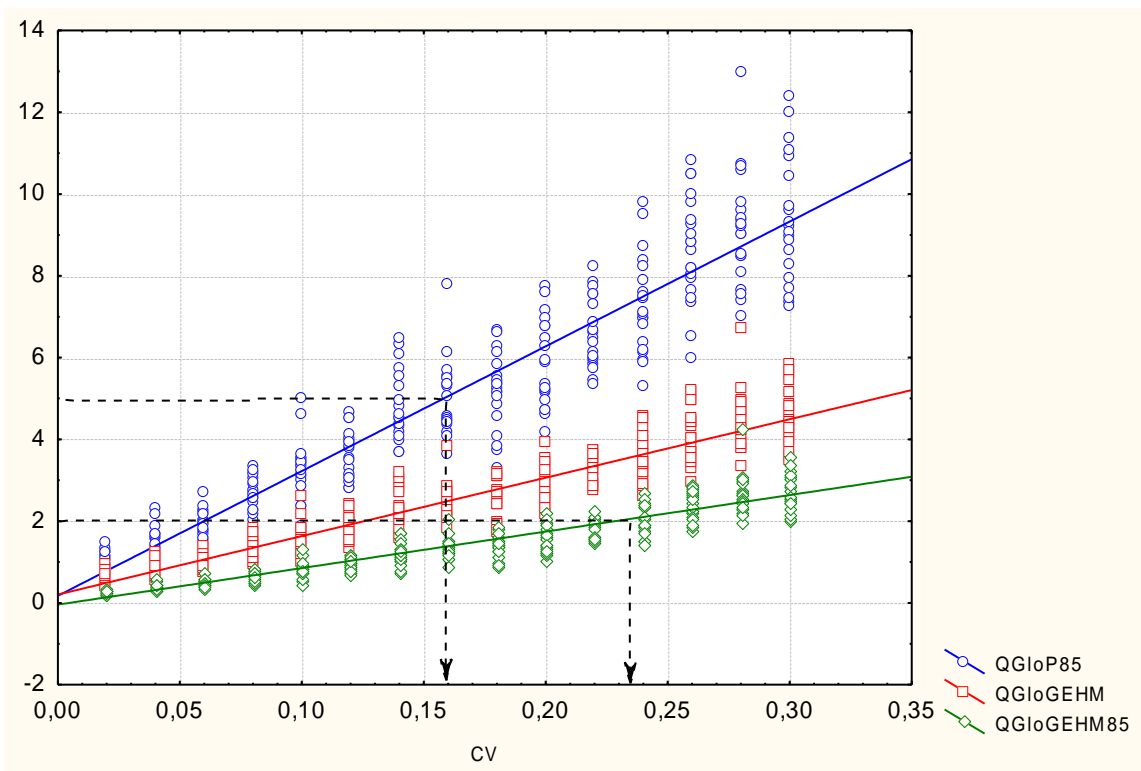


Figura V.3 – Erros aleatórios nos fluxos de saturação em toda a rede de simulação: Indicadores QGloP85, QGloGEHM e QGloGEHM85

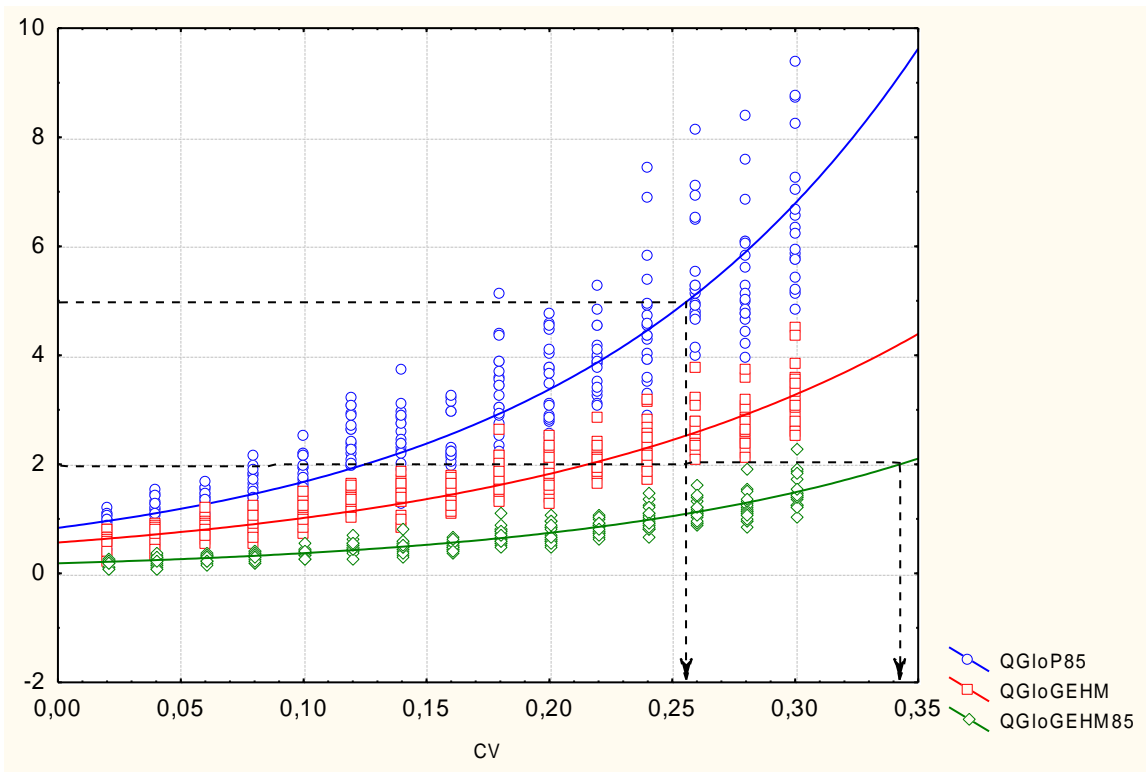


Figura V.4 – Erros aleatórios nas velocidades em toda a rede de simulação: Indicadores QGloP85, QGloGEHM e QGloGEHM85

Para testar a última constatação procedeu-se à análise do nível de correlação entre os indicadores QGloP85, QGloGEHM85 e QGloGEHM.

Essa correlação constata-se nas Figuras V.5 e V.6, para as duas variáveis onde foram introduzidos os erros. Parece assim razoável a expectativa de que seja possível a adopção de um único indicador, designadamente o QGloGEHM, para avaliar o desempenho do modelo.

Infelizmente, as discrepâncias nos graus de exigência dos indicadores preconizados pelas normas britânicas dificultam a fixação de um valor de referência. Tendo o caso dos erros na variável “fluxos de saturação” como referência, e relativamente ao indicador QGloP85, um modelo é válido para até $QGloGEHM = 2,5$ e, relativamente ao indicador QGloGEHM85, o modelo é válido até $QGloGEHM = 3,6$. Este facto leva a que este problema só possa vir a ser completamente resolvido através da realização de análises semelhantes aplicadas a um número razoável de outras modelações.

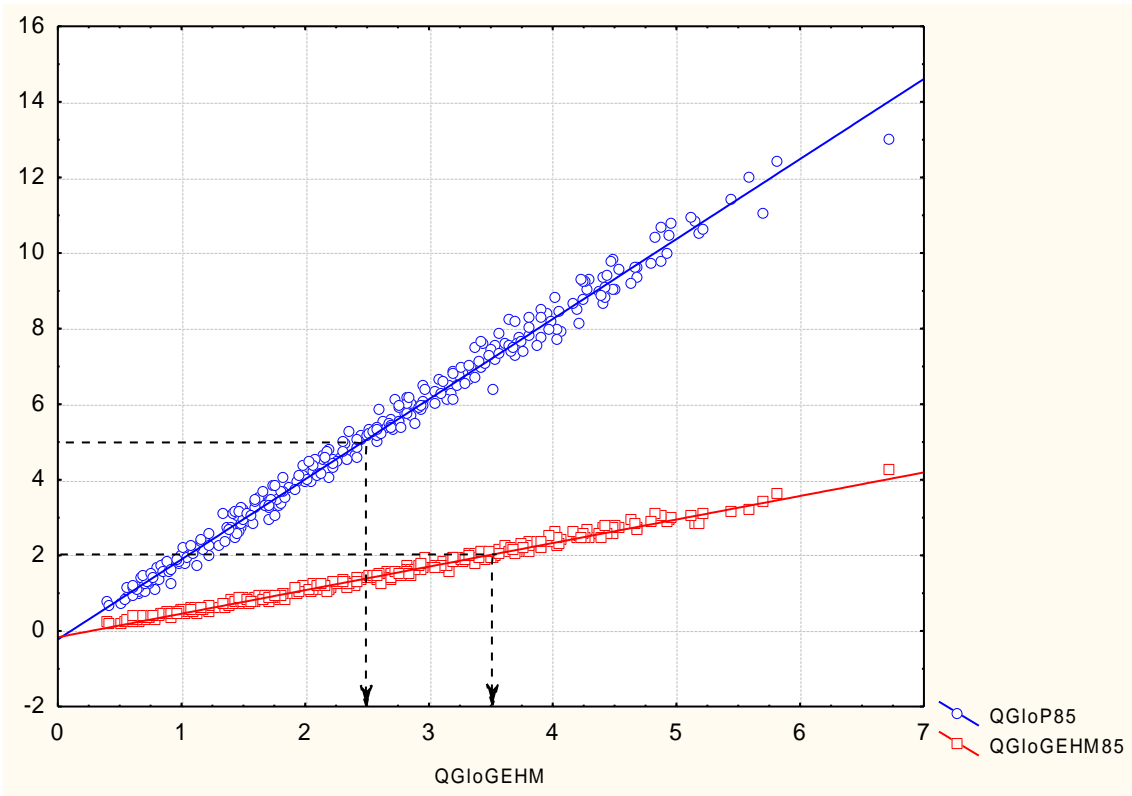


Figura V.5: Erros aleatórios nos fluxos de saturação em toda a rede de simulação: correlação entre os indicadores QGloGEHM, QGloP85 e QGloGEHM85.

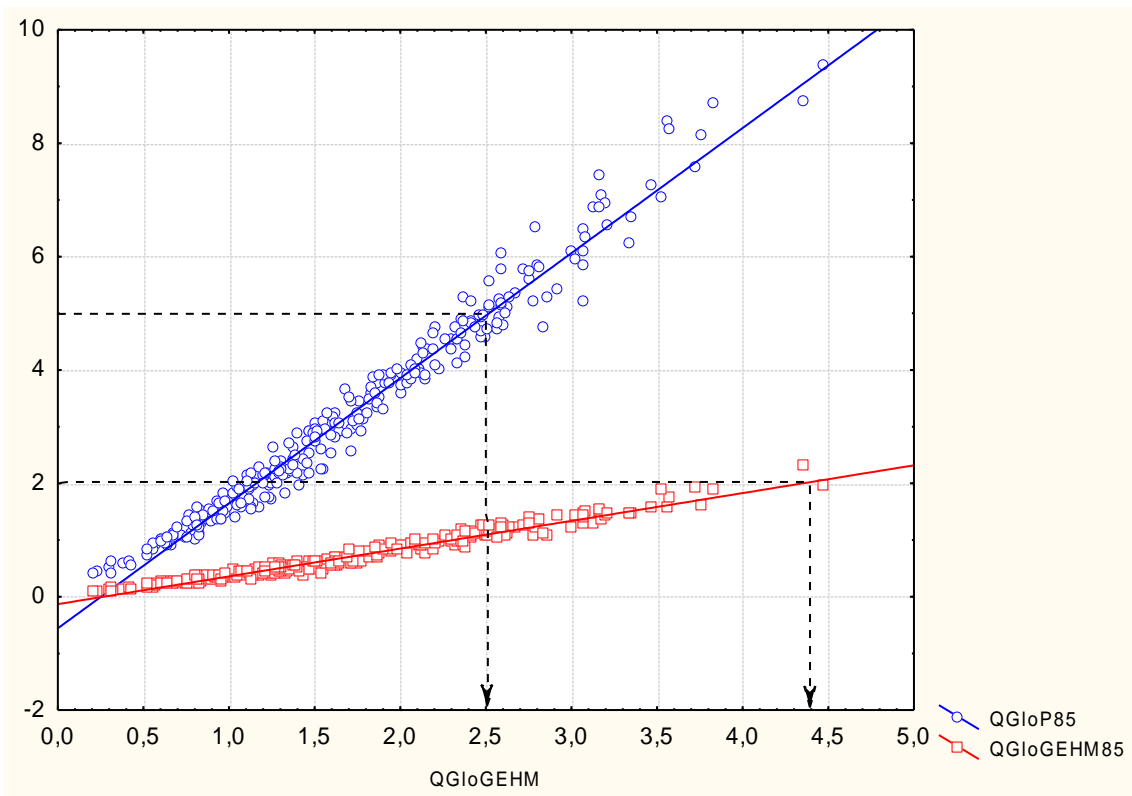


Figura V.6: Erros aleatórios nas velocidades em toda a rede de simulação: correlação entre os indicadores QGloGEHM, QGloP85 e QGloGEHM85.

Finalmente, avaliou-se a variação dos tempos de trajecto com a intensidade dos erros na quantificação dos fluxos de saturação (Figura V.7), verificando-se que o indicador de aderência “tempos de percurso – variação relativa (VR15)” é aproximadamente da mesma ordem de exigência do indicador QGloGEHM, sendo atingido o valor de referência (15%) quando o coeficiente de variação toma valores aproximadamente iguais a 20%.

Refira-se, contudo, que este indicador reporta aos “melhores 85% percursos”, pelo que constitui um critério de aplicação muito limitada quando são apenas considerados cinco percursos.

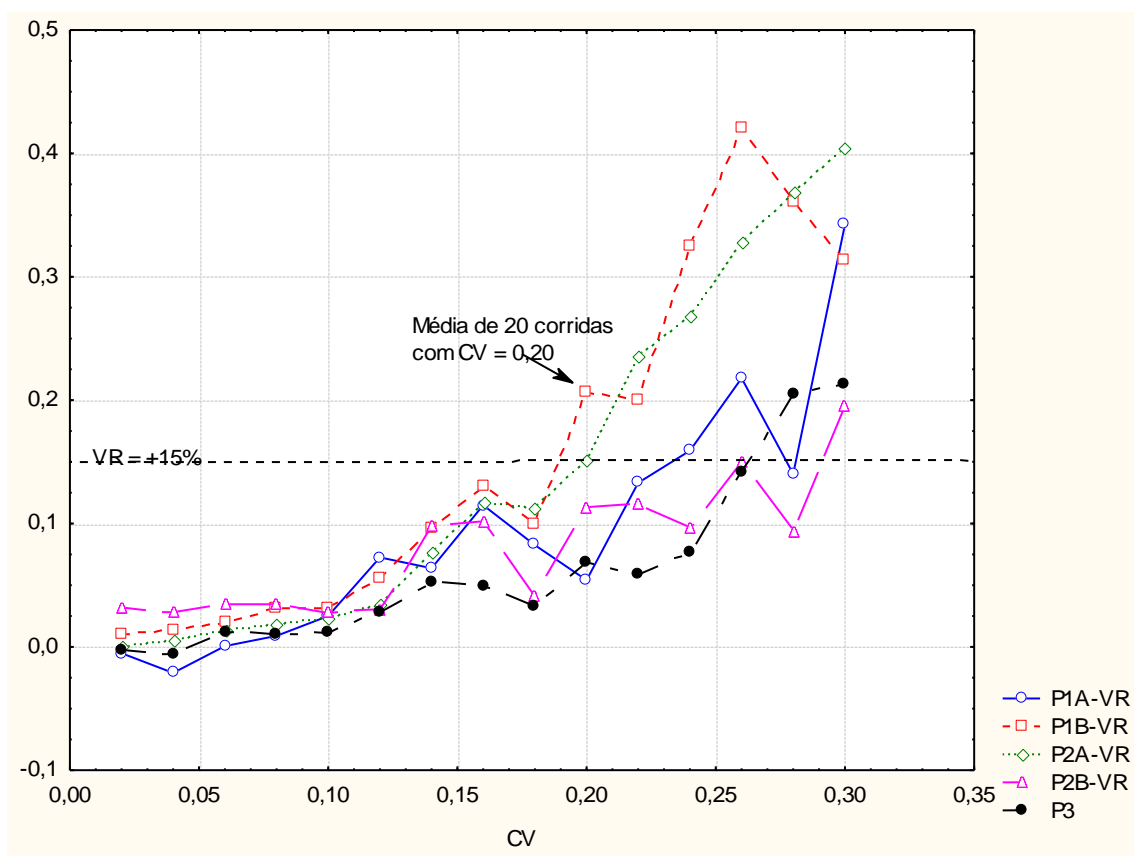


Figura V.7 – Erro aleatório nos fluxos de saturação em toda a rede de simulação: Indicador “Variação dos tempos de percurso”

V.2.3 Síntese

Tendo em conta os resultados das análises realizadas, merecem destaque os seguintes aspectos:

- Relativamente aos indicadores globais QGloGEHM85, QGloGEHM e QGloP85, verificou-se uma forte correlação, qualquer que fosse a variável independente

(fluxos de saturação ou velocidades na zona de simulação). É defensável, e potencialmente muito interessante, a utilização de apenas um destes indicadores;

- Passa-se sensivelmente o mesmo relativamente ao grupo de indicadores QArcOP15 e QMovOP25. Contudo, não se pode afirmar que existe irrelevância de um destes indicadores relativamente ao outro já que, em aplicações reais, é frequente haver necessidade de calibrar / validar o modelo com os dois tipos de contagens;
- O indicador “variação de tempo de percurso” não parece ser o mais adequado para este tipo de análises uma vez que integra um número limitado de elementos da rede. Admite-se contudo que seja adequado a processos reais de calibração / validação “fina”, onde é interessante avaliar, arco a arco, as diferenças entre os sistemas real e virtual.

Do que foi exposto, pareceu razoável para o presente estudo simplificar a análise limitando a avaliação da sensibilidade do modelo a um único indicador. A escolha recaiu sobre o segundo grupo, e em particular sobre o indicador QGloGEHM, uma vez que conjuga uma série de propriedades desejáveis (ver o ponto III.5.3) com o facto de ser o único que depende da totalidade dos elementos da rede – arcos e movimentos de viragem, condições que facilitam o desenvolvimento das sucessivas análises. Em qualquer um dos casos aqui tratados existe uma correspondência entre a intensidade dos erros que geram um QGloP85 = 2 e um QGloGEHM = 2,5, pelo que se assumiu este como o valor de referência para este indicador.

V.3 Análise do impacto de erros de quantificação na qualidade global do modelo

Nesta secção pretendeu-se obter indicações acerca da forma como evolui o desempenho *global* do modelo COIMBRA-SAT, quantificado pelo indicador QGloGEHM, na presença de erros de quantificação.

V.3.1 Variáveis de ocorrência singular – erros sistemáticos

Com esta primeira análise avaliou-se a sensibilidade do modelo a erros na estimação de variáveis de ocorrência singular – parâmetros globais, cuja alteração afecta o modelo no seu todo. As variáveis seleccionadas foram o “nível global de carregamento da rede” e a relação de parâmetros “custo do tempo / custo da distância”.

Tal como foi referido no ponto III.4.2.2, estes *inputs* podem ser tratados como variáveis independentes, quantificados através de sub-modelos ou observações, ou como parâmetros de calibração, sendo o seu valor estimado no processo de calibração, de forma a minimizar as diferenças entre os sistemas real e modelado.

Entende-se, contudo, que a simulação dos erros decorrentes do processo de calibração seria uma tarefa muito complexa e dependente do problema em causa. Assim, assumiram-se os parâmetros como variáveis independentes, e avaliou-se o desempenho do modelo para uma gama de valores que representam desvios de intensidade variável relativamente aos valores “exactos” dos parâmetros em causa: GONZO¹¹ – factor de ajustamento do carregamento global da rede, e PPM/PPK – relação entre a valorização do tempo e da distância (no modelo de referência GONZO = 1 e PPM/PPK = 1).

V.3.1.1 Sensibilidade do modelo a erros de quantificação do parâmetro GONZO

Na Figura V.8 representa-se a sensibilidade do modelo a erros na quantificação do parâmetro GONZO, tanto de subestimação como de sobrestimação.

Foram realizadas 10 corridas, correspondentes a erros de -50% a +50%, com incrementos de 10%. No estabelecimento destes limites atendeu-se a que, por um lado, são suficientes para permitir compreender a importância da precisão com que se quantifica o nível global da procura e, por outro, ao facto de a partir de valores de GONZO = 1,2 começarem a surgir dificuldades em garantir os mesmos níveis de convergência que foram obtidos para o modelo base. Refira-se ainda que não serão de esperar, em exercícios sérios de modelação, erros na estimação deste parâmetro acima dos 10 ou 15%.

Da análise da figura destacam-se os seguintes aspectos:

- Erros aparentemente pouco importantes na quantificação do número total de viagens da matriz são suficientes para pôr em causa a validade do modelo. Por exemplo, um erro de $\pm 10\%$ origina um $Q_{GloGEHM} \cong 2,6$, valor que já não respeita as recomendações britânicas.
- Os erros de sobrestimação tendem a ser menos gravosos que os erros de subestimação, embora esta diferenciação apenas surja para erros de gravidade não natural. Isto deve-se certamente a uma especificação do modelo: quando as filas de espera atingem os conectores de centróide ou os nós de montante, os veículos deixam de ser admitidos na rede ou no arco em causa, o que significa que a partir de um certo grau de congestionamento, o fluxo em muitos arcos atinge o valor máximo e, como tal, torna-se independente da procura potencial.

¹¹ A especificação de um valor do parâmetro GONZO diferente de 1 implica que o modelo passa a tomar como *input* uma matriz que resulta da factorização uniforme da matriz O-D original por esse valor de GONZO.

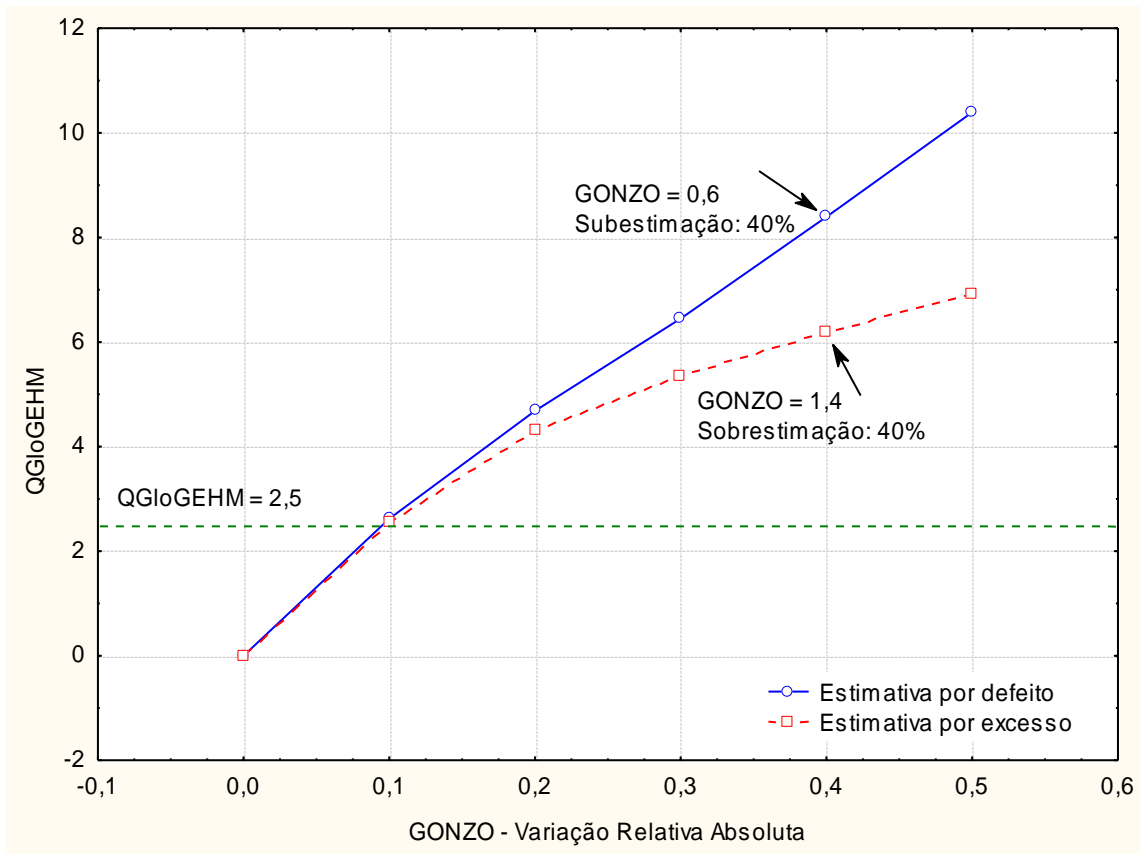


Figura V.8 – Sensibilidade do modelo a erros na avaliação do volume total de viagens na matriz origem-destino

V.3.1.2 Sensibilidade do modelo a erros de quantificação da relação de parâmetros PPM/PPK

Testou-se a sensibilidade do modelo a erros na relação de parâmetros PPM/PPK, tanto de subestimação como de sobrestimação, através da realização de 19 corridas (ver a Tabela V.2).

Tabela V.2 – Sensibilidade do modelo à relação PPM/PPK: parâmetros testados

	Erros de subestimação									
PPM	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
PPK	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
PPM/PPK	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
VRA (-)	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
	Erros de sobrestimação									
PPM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
PPK	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
PPM/PPK	1	1,111	1,25	1,429	1,667	2	2,5	3,333	5	10
VRA (+)	0%	11,1%	25,0%	42,9%	66,7%	100%	150%	233%	400%	900%

Verifica-se, na Figura V.9, que a função QGloGEHM tende para dois valores máximos. O primeiro, quando $PPM/PPK = 0$, corresponde a uma atribuição tudo-ou-nada, onde apenas são escolhidos os trajectos mais curtos. O segundo, ocorre quando $PPK/PPM = 0$ e representa uma rede em que o único critério de escolha de trajectos é o tempo percorrido.

O modelo é razoavelmente sensível a este conjunto de parâmetros, particularmente quando os erros são por defeito. De acordo com as recomendações britânicas ($QGloGEHM = 2,5$), seriam admissíveis erros de subestimação até 50% ($PPM/PPK = 0,5$), se a verdadeira relação PPM/PPK fosse 1,0, e seriam suportados quaisquer erros de sobrestimação.

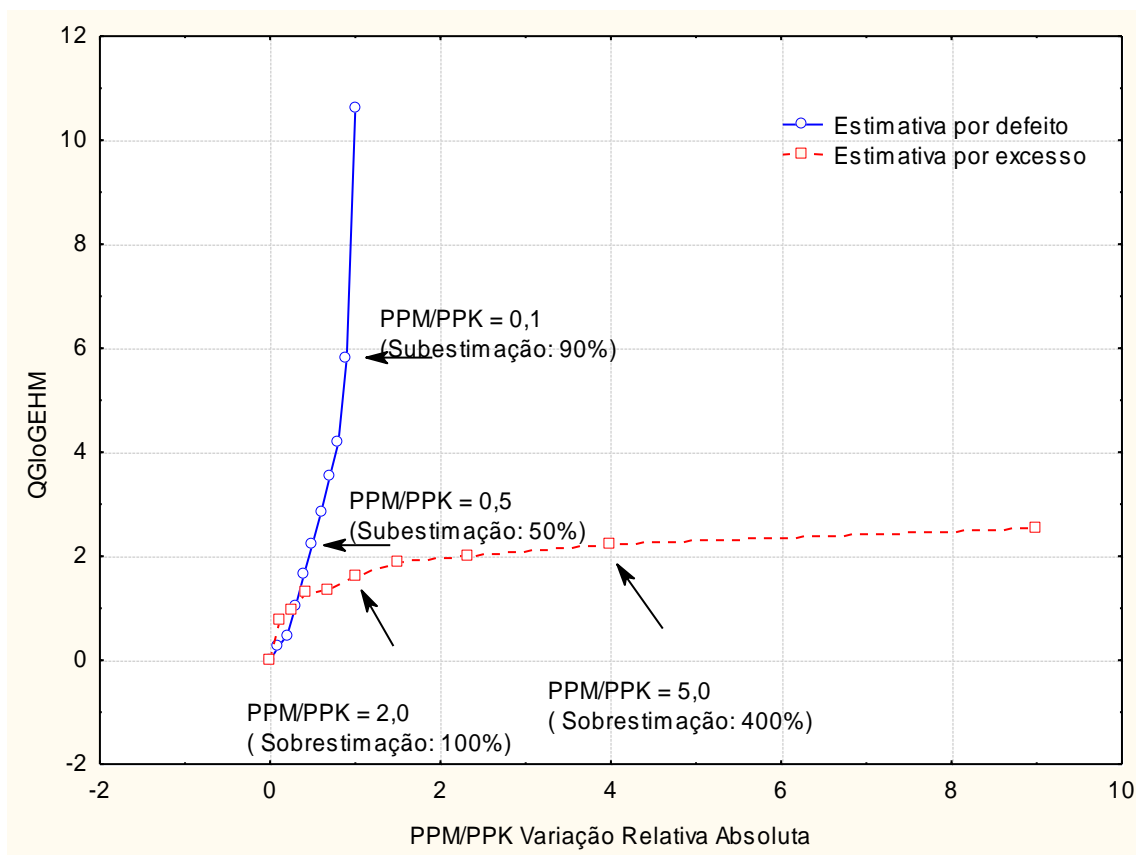


Figura V.9 – Sensibilidade do modelo a erros na avaliação da relação de parâmetros PPM/PPK

V.3.2 Variáveis de ocorrência múltipla – erros aleatórios

Esta análise teve como objectivo avaliar a sensibilidade do modelo a erros cometidos na quantificação de variáveis múltiplas, ou seja, aquelas que podem tomar diferentes valores consoante o elemento do modelo a que estão associadas. Seleccionaram-se como variáveis a estudar os fluxos de saturação e as velocidades na zona de simulação.

Como hipótese simplificativa admitiu-se que todas as ocorrências destas variáveis foram quantificadas através de observações. Assim, é legítimo utilizar o método de geração de erros já descrito no ponto V.2.1, o qual introduz em cada ocorrência da variável um erro aleatório sem componente sistemática.

V.3.2.1 Fluxos de saturação nos movimentos de viragem

Na Figura V.10 apresenta-se a evolução da qualidade global do modelo quando sujeito a erros aleatórios na quantificação dos fluxos de saturação dos movimentos de viragem. Da análise da figura retiram-se as seguintes conclusões:

- Existe uma relação aproximadamente linear entre o desempenho do modelo e a gravidade dos erros aleatórios;
- Tomando como referência o ajuste linear e o critério de validação baseado no indicador QGloGEHM definido anteriormente para esta análise, erros de quantificação caracterizados por coeficientes de variação de 0,16 são suficientes para que o modelo COIMBRA-SAT não respeite os critérios de validação.

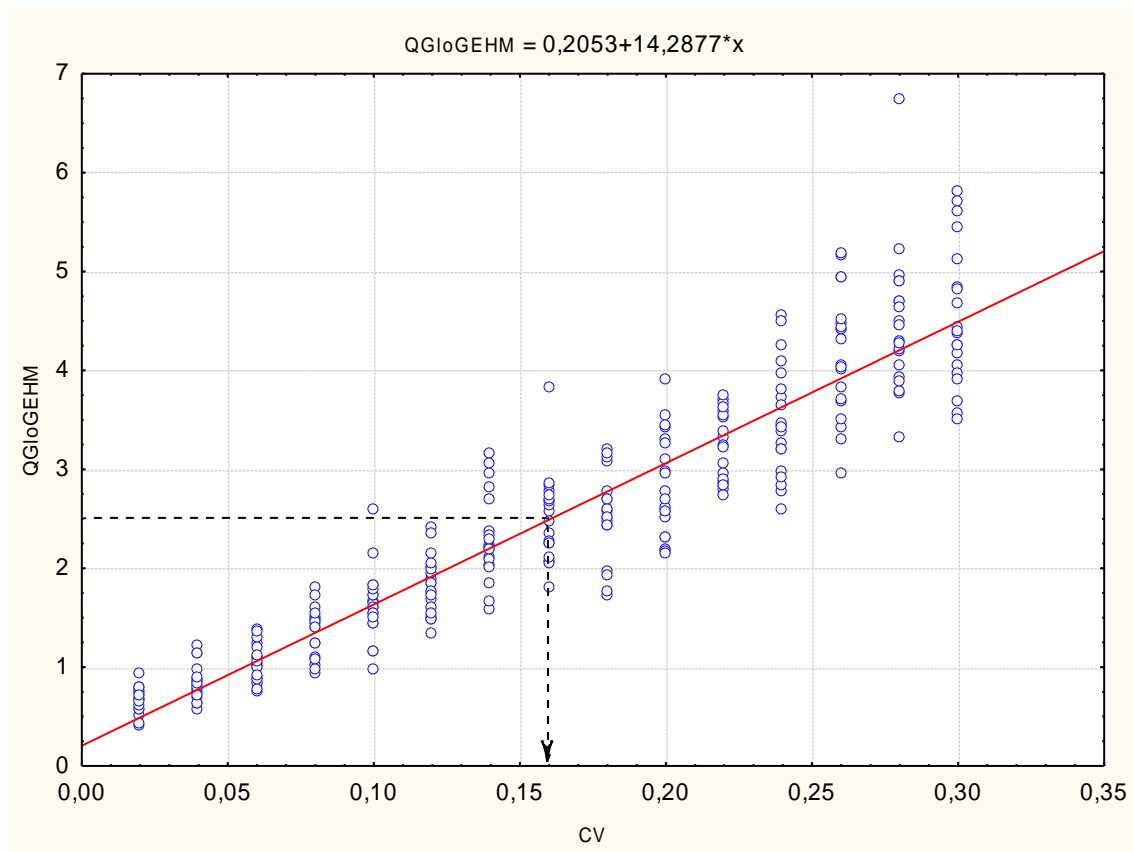


Figura V.10 – Sensibilidade do modelo a erros aleatórios na quantificação dos fluxos de saturação dos movimentos de viragem

V.3.2.2 Velocidades nos arcos da zona de simulação

O desempenho do modelo COIMBRA-SAT face a erros aleatórios na quantificação das velocidades nos arcos de simulação é representado na Figura V.11. Destacam-se os seguintes aspectos:

- A relação entre o desempenho do modelo e a gravidade dos erros aleatórios é bem ajustada por um modelo exponencial; no Anexo D demonstra-se que quando são cometidos erros aleatórios puros na quantificação das velocidades, tal significa que, em termos médios, os tempos de trajecto aumentam. O comportamento observado poderá dever-se, assim, ao facto de não haver uma completa compensação de erros ao nível desta última grandeza, que intervém directamente no custo de deslocação;
- Na inexistência de quaisquer outros tipos de erros, imprecisões na quantificação das variáveis caracterizáveis por coeficientes de variação de 0,26 são suficientes para impedir a validação do modelo.

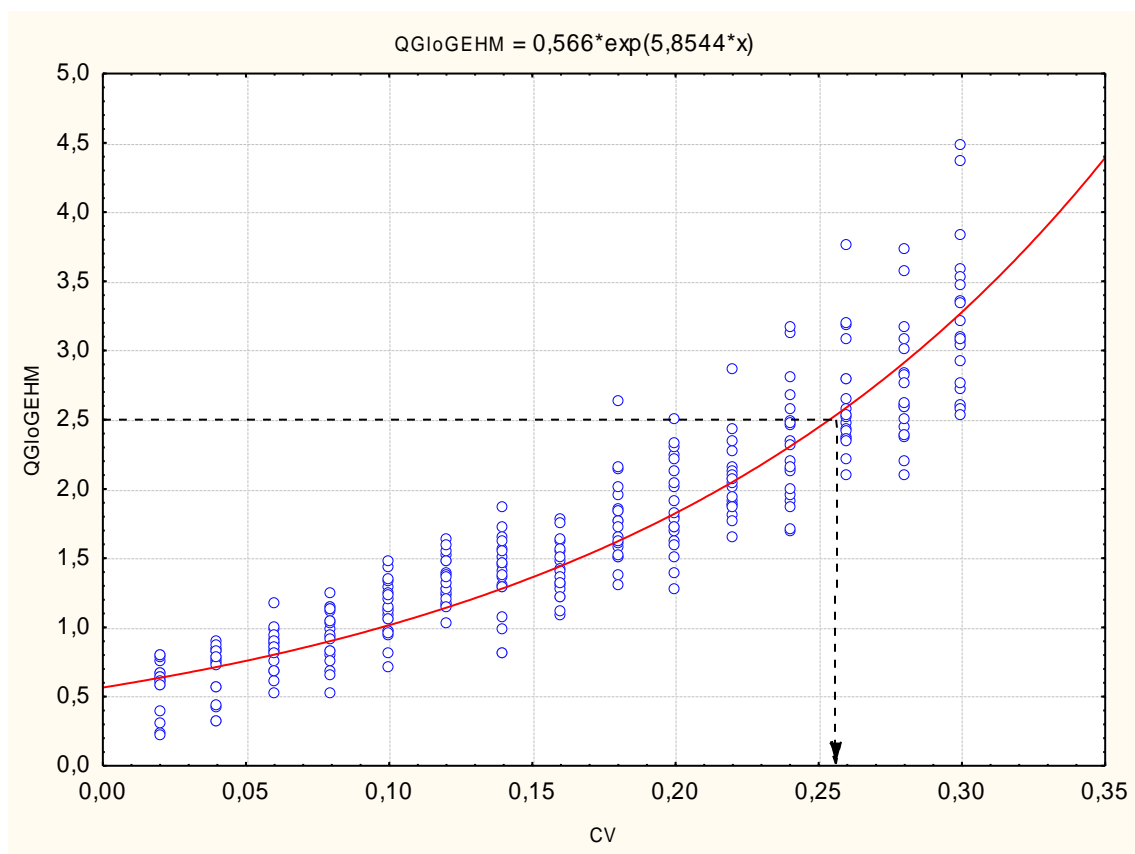


Figura V.11 – Sensibilidade do modelo a erros aleatórios na quantificação das velocidades nos arcos de simulação

V.3.3 Variáveis de ocorrência múltipla – combinação de erros aleatórios e sistemáticos

Com esta análise específica pretendeu-se determinar a sensibilidade do modelo a erros devidos à utilização de sub-modelos na quantificação das variáveis de ocorrência

múltipla. Admitiu-se que estes podem levar à introdução de erros sistemáticos (ES), de sub ou sobrestimação, de gravidade (desvio percentual) constante em toda a rede, e são acompanhados por erros aleatórios, de gravidade (coeficiente de variação) também constante em toda a rede.

A metodologia seguida para introduzir a componente aleatória dos erros é a mesma que já foi descrita no ponto V.2.1. Assim, para um determinado erro sistemático e coeficiente de variação, substituiu-se cada um dos fluxos de saturação por outro extraído aleatoriamente de uma população normalmente distribuída cuja média resulta da correcção do fluxo base com o erro sistemático em causa. Concluídas as alterações, correu-se o modelo sobre a rede resultante e registaram-se as alterações. O processo foi repetido a três níveis: o primeiro, para o mesmo coeficiente de variação, um número de vezes suficiente para, em termos médios, ficar clara a importância da componente aleatória; o segundo, para o mesmo erro sistemático, com diferentes intensidades do erro aleatório (coeficiente de variação); finalmente, para diferentes erros sistemáticos.

No que respeita ao número de repetições para o mesmo erro sistemático e coeficiente de variação, não foi possível manter o número adoptado nas análises anteriores, uma vez que tal implicaria um tempo de execução impraticável no âmbito do presente trabalho. A redução de 20 para 5 do número de repetições (496 corridas) faz com que o erro máximo da estimativa da média do QGloGEHM aumente significativamente (ver quadro seguinte). Contudo, esta análise é essencialmente qualitativa, pelo que se considerou tal aceitável.

Estimativa da média do indicador QGloGEHM: margens de erro para 20 e 5 corridas

No ponto 5.2 descreveu-se uma análise em que, para cada coeficiente de variação, se realizaram 20 corridas, cada uma das quais caracterizada por um determinado impacto. Tomando como referência o conjunto de corridas relativas ao coeficiente de variação CV=0,10, obtiveram-se os seguintes valores para a média e para o desvio padrão da variável QGloGEHM:

$$\bar{x} = 1,625 \text{ e } s = 0,345$$

Como $t_{0,025}$ para $20 - 1 = 19$ graus de liberdade é igual a 2,093 (valor tabelado), para um nível de confiança de 95% obtém-se o seguinte erro máximo:

$$E = 2,093 \cdot \frac{0,345}{\sqrt{20}} = 0,161 \quad E = 0,161 / 1,625 = 9,9\%$$

Para $5 - 1 = 4$ graus de liberdade, $t_{0,025} = 2,776$. Assim, o erro máximo é dado por:

$$E = 2,776 \cdot \frac{0,345}{\sqrt{5}} = 0,428 \quad E = 0,428 / 1,625 = 26,3\%$$

Na Figura V.12 representa-se a relação entre o andamento do indicador de aderência QGloGEHM com as diferentes intensidades de erros sistemáticos e aleatórios.

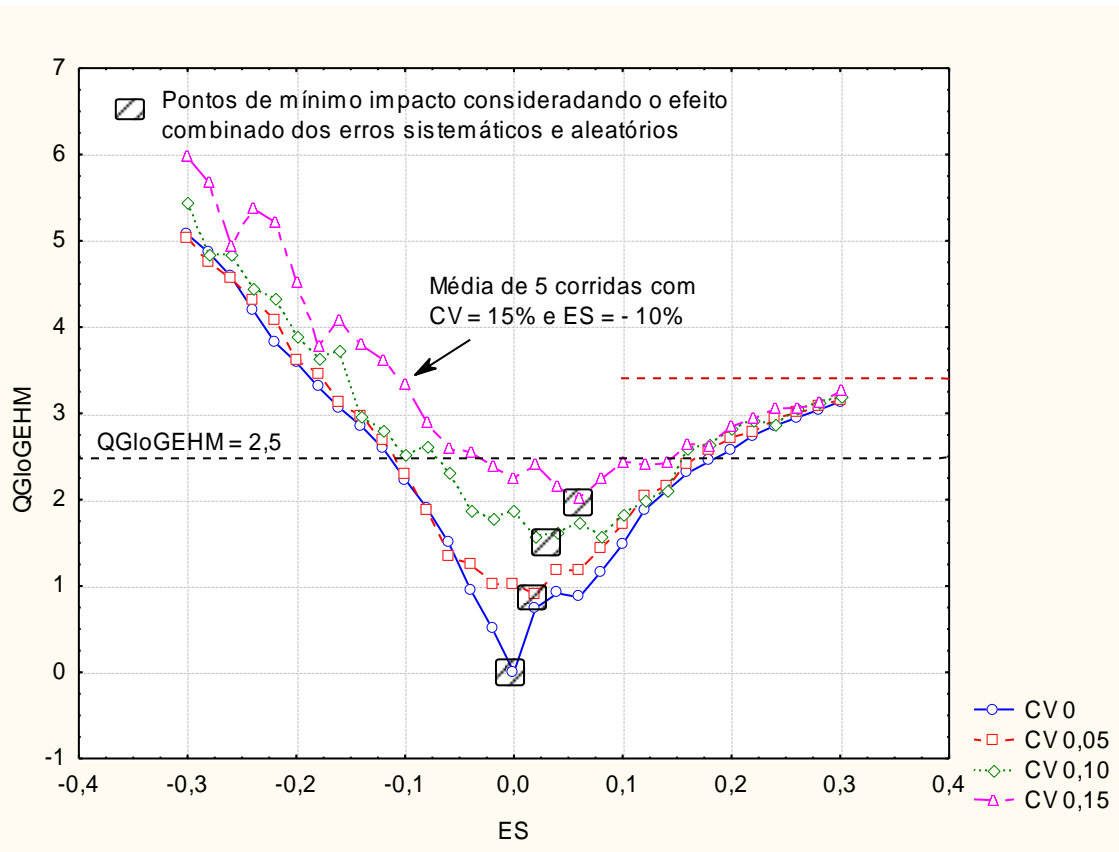


Figura V.12: Erro sistemático com componente aleatória: Relação entre o erro sistemático, o coeficiente de variação e o indicador de aderência QGloGEHM

Da análise da figura constata-se os seguintes aspectos:

- Os erros por defeito tendem a ter um impacto superior aos erros por excesso. Este comportamento deverá estar relacionado com a introdução de erros em movimentos de viragem não congestionados: o acréscimo de capacidade não reduz o tempo necessário para efectuar o movimento. Mas se o erro for no sentido de congestionar o movimento, o tempo de atravessamento começa a aumentar rapidamente, especialmente se a fila atingir o cruzamento de montante, causando *blocking-back* (rever a Figura V.7).
- O indicador QGloGEHM tende para uma assíntota horizontal quando o erro sistemático aumenta, esbatendo-se a importância dos erros aleatórios. Este facto deve-se à progressiva eliminação dos pontos de bloqueio da rede, fazendo com que acréscimos adicionais da capacidade dos cruzamentos não impliquem reafecção de tráfego.
- Para erros sistemáticos por defeito parece haver uma tendência para que os impactos dos erros aleatórios cresçam mais que linearmente com o coeficiente de variação;

- A introdução de erros aleatórios puros nos fluxos de saturação tende a deteriorar as condições de circulação, promovendo a reafecção. No entanto, se simultaneamente forem introduzidos erros sistemáticos positivos (acréscimo dos fluxos de saturação), dá-se uma certa compensação de erros e o estado do sistema aproxima-se do sistema base. Assim, à medida que o coeficiente de variação aumenta, o impacto mínimo combinado (erros sistemáticos e erros aleatórios) ocorre para erros sistemáticos superiores a zero.

Esta análise sugere o interesse de incorporação no *software* utilizado de um parâmetro que permita a correção sistemática de todos os fluxos de saturação. Tendo como referência o caso em que foram introduzidos erros aleatórios com coeficiente de variação $CV = 0,15$, a simples correção uniforme dos fluxos de saturação em +5% permitiria a melhoria do indicador de aderência QGloGEHM de 2,20 para 2,00.

V.3.4 Síntese

Com as duas primeiras análises descritas nesta secção avaliou-se, de forma simples, a importância dos erros de quantificação em variáveis de diversos tipos. Essa informação, conjugada com o conhecimento dos recursos necessários para quantificar as variáveis com um certo nível de precisão, poderá facilitar a otimização da relação custo-benefício dos processos de recolha e tratamento de dados.

Com a última análise avaliou-se o desempenho do modelo na presença de erros de quantificação com componente sistemática e aleatória, constatando-se a ocorrência de efeitos de compensação de impactos.

V.4 Avaliação do desempenho do modelo em função da quantidade de erros que se cometem na quantificação de uma variável

Com esta análise avaliou-se a influência da quantidade ou proporção de erros no desempenho do modelo, em função de diferentes intensidades do erro. Em cada corrida introduziu-se um erro sistemático negativo (de sub-estimação – situação mais desfavorável) no fluxo de saturação de um conjunto aleatório de movimentos de viragem. Concluídas as alterações, correu-se o modelo com a rede resultante e registaram-se as alterações. O processo foi repetido a três níveis: o primeiro para o mesmo conjunto de elementos da rede, com erros de diferentes intensidades (5 intensidades: -3%, -6%, -9%, -12% e -15%); o segundo, para o mesmo número de elementos, com diferentes conjuntos de movimentos de viragem (10 conjuntos); finalmente, para diferentes percentagens de elementos da rede sujeitos a erro (11 proporções). Foram assim necessárias 550 corridas.

Na Figura V.13 pode verificar-se que:

- A introdução de um conjunto limitado de alterações promove a variação inicial “dura” do indicador de desempenho. Este aspecto é discutido na secção seguinte;
- O desempenho do modelo aumenta de forma não completamente linear com a quantidade de erros sistemáticos cometidos, qualquer que seja a gravidade desses erros;
- Uma relação semelhante é encontrada, para qualquer das proporções, quando se avalia o desempenho do modelo em função da intensidade dos erros (esta tendência pode ser confirmada através da Figura V.12, relativamente ao caso em que $CV = 0$).

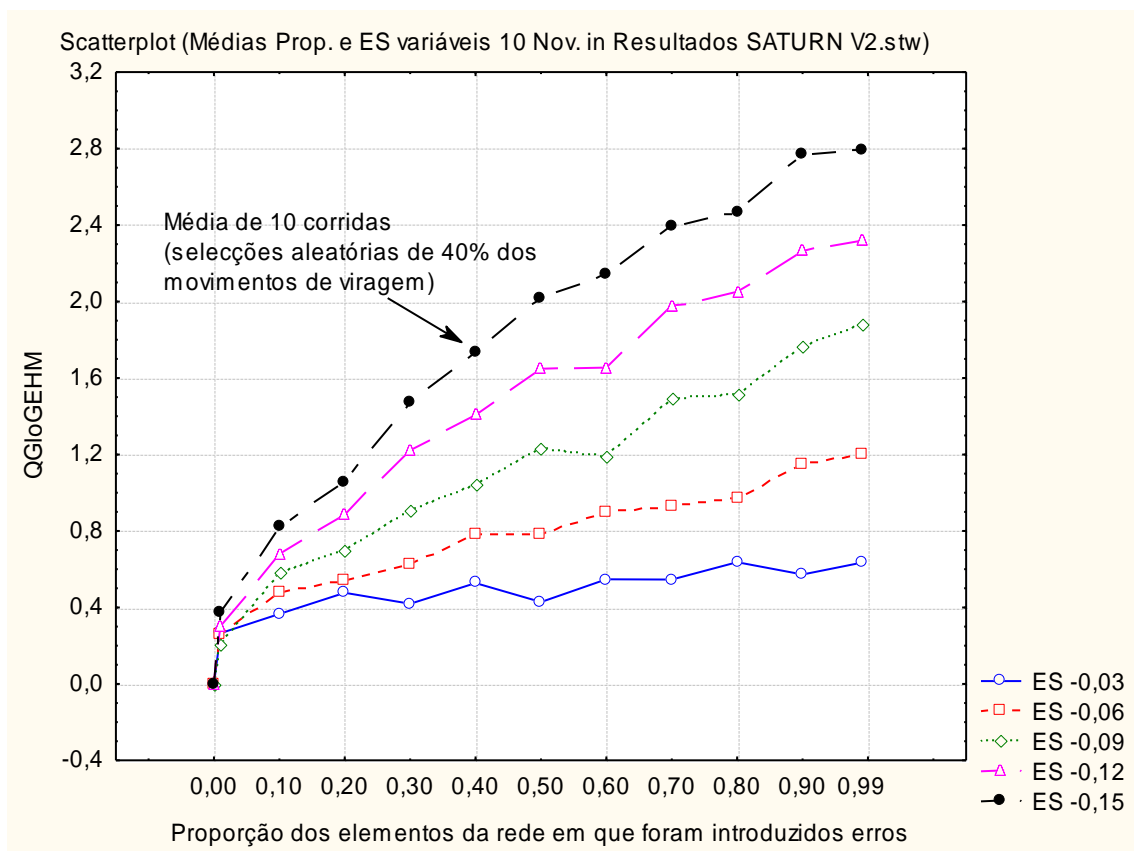


Figura V.13 – Erro sistemático numa proporção de elementos da rede: Relação entre a proporção de elementos, a intensidade do erro sistemático e o indicador QGloGEHM

V.5 Identificação e caracterização dos elementos da rede que mais condicionam a qualidade do modelo

Descrevem-se neste ponto dois tipos de análises que, tal como exposto no ponto III.3, tiveram como objectivo fundamental identificar e caracterizar os elementos da rede com particular relevância no desempenho do modelo.

Com o primeiro tipo procurou-se investigar a existência de relações entre as características intrínsecas dos elementos onde são cometidos os erros de quantificação e o impacto global desses erros.

Com o segundo tipo de análises, procurou-se identificar relações entre o grau de susceptibilidade dos diferentes elementos da rede perante erros ocorridos noutra local, e as suas características básicas.

V.5.1 Variáveis explicativas

Tomaram-se como possíveis variáveis explicativas do desempenho do modelo algumas propriedades dos elementos onde, no primeiro caso, são introduzidos os erros – movimentos de viragem – e, no segundo, dos elementos onde são registadas as discrepâncias entre modelo e realidade – os movimentos de viragem e os arcos.

a) Variáveis explicativas dos elementos da rede onde são cometidos os erros

Considerou-se que o nível da procura, devido ao número de viagens passíveis de reafecção, e o grau de saturação, devido à grande variabilidade das demoras com a procura em movimentos saturados, são os factores que apresentam um maior potencial para explicar o impacto dos erros de quantificação. Para além disso considerou-se também o tipo de intersecção, como variável de categorização adequada.

Especificamente foram seleccionadas as variáveis “Q”, “Q/Qc” e “Nó”, que se apresentam de seguida e cuja variabilidade ao longo da rede COIMBRA-SAT modelada é a que se apresenta nas figuras V.14, V.15 e V.16.

Q [UVE/h] – Fluxo de chegada: representa o número de veículos equivalentes que chega ao movimento de viragem considerado durante o período de modelação; no histograma não são indicados os movimentos excluídos da análise, ou seja, aqueles que ao longo das várias corridas nunca foram carregados.

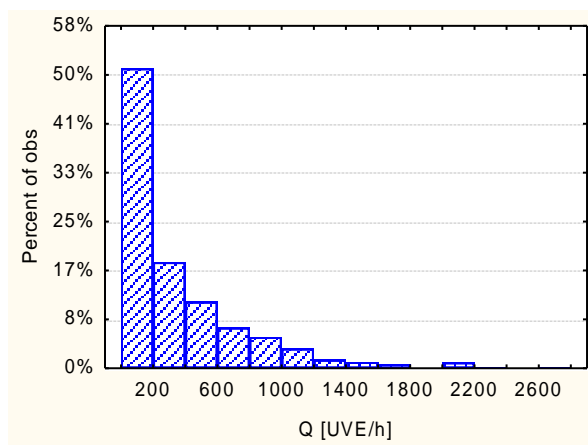


Figura V.14 – Distribuição da variável explicativa “fluxo de chegada” no modelo de referência

Q/Q_C – Taxa de saturação: é o quociente entre o fluxo de chegada e a capacidade do movimento de viragem; A maioria dos movimentos de viragem está com folga de capacidade, estando pouco mais de 4% dos elementos num estado de saturação.

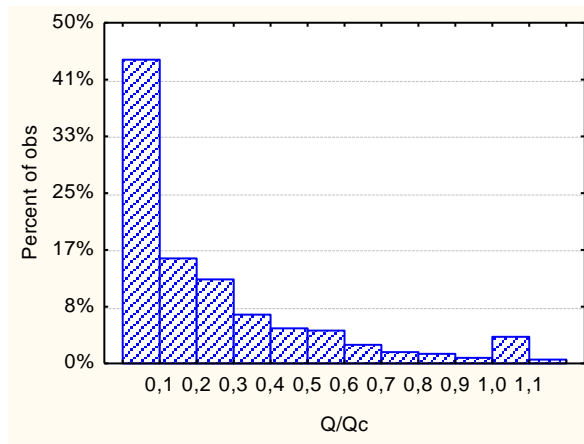


Figura V.15 – Distribuição da variável explicativa "taxa de saturação" no modelo de referência

Nó – Tipo de nó: tal como visto no capítulo anterior, o SATURN distingue 5 tipos de nós. Na codificação da rede dispensou-se a utilização do tipo "rotunda sem possibilidade de inversão" e, uma vez que o modelo não considera limitações de capacidade nos nós fictícios, apenas interessaram para a análise aqueles que representam os cruzamentos prioritários, semaforizados e as rotundas como possibilidade de inversão. Salienta-se, contudo, que não existe uma verdadeira correspondência entre os cruzamentos prioritários, da rede viária real, e os nós do tipo prioritário, no modelo. Isto porque este tipo de codificação é utilizado para modelar um conjunto diversificado de elementos do sistema real, como rampas de aceleração, desaceleração, ou mesmo rotundas de grandes dimensões.

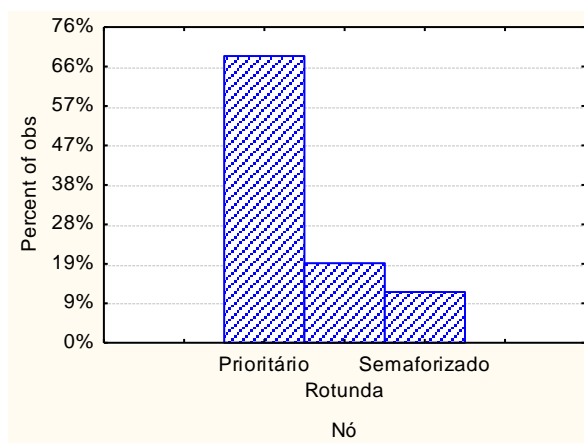


Figura V.16 – Distribuição da variável explicativa "tipo de nó"

b) *Variáveis explicativas dos elementos da rede onde são avaliadas as diferenças entre os fluxos observados e previstos*

Optou-se pela caracterização dos elementos da rede com as mesmas variáveis explicativas que foram utilizadas na análise anterior (tipo de nó, fluxo de chegada e taxa de saturação), com aplicação aos movimentos de viragem, e foi ainda introduzida a variável “classe hierárquica da via”, aplicada exclusivamente aos arcos (ver a Figura V.17), numa tentativa de identificar eventuais tendências de absorção desproporcionada de erros por determinados níveis hierárquicos.

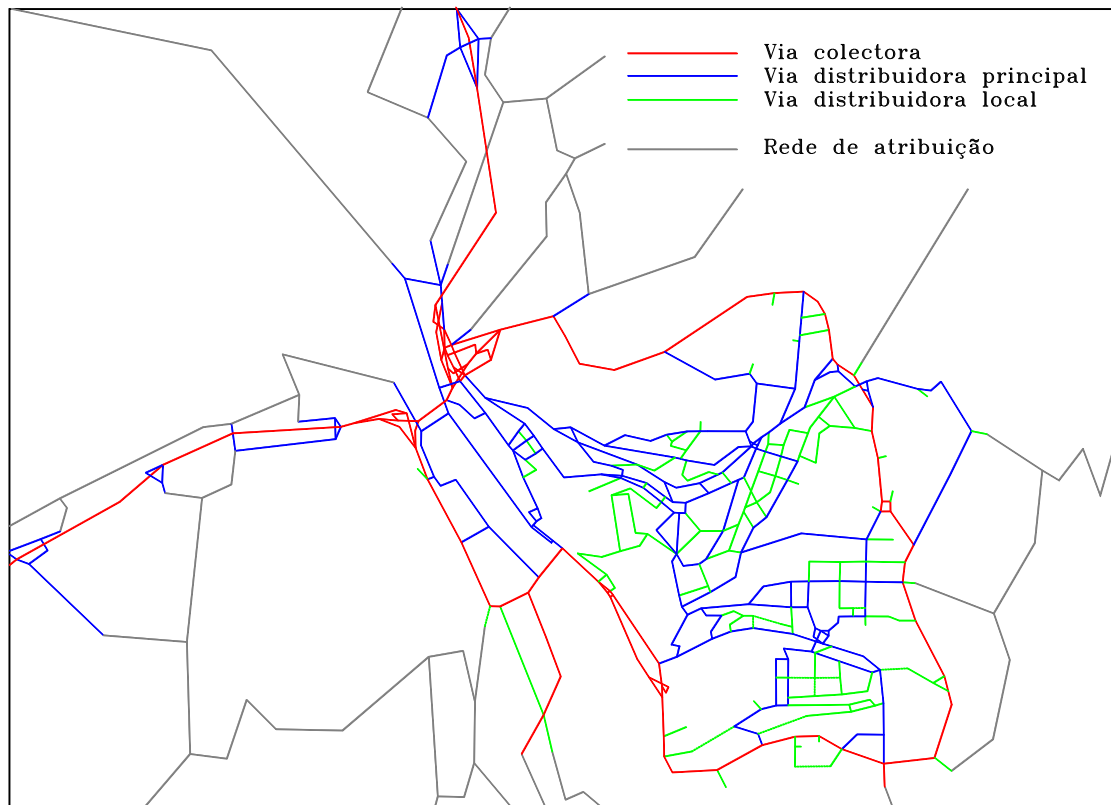


Figura V.17 – Classe hierárquica dos arcos na zona de simulação

V.5.2 Relação entre o desempenho do modelo e as características dos movimentos de viragem onde são cometidos os erros

Em cada corrida introduziu-se um erro sistemático negativo (sub-estimação em 30%) no fluxo de saturação de um único movimento de viragem seleccionado aleatoriamente sem repetição. Correu-se o modelo com a rede alterada e registaram-se os erros. O processo foi repetido 500 vezes, o que representa aproximadamente um terço dos elementos passíveis de sofrerem alterações.

Na Figura V.18 evidencia-se a relação entre o impacto na rede (QGloGEHM), o grau de saturação do movimento de viragem onde foi introduzido o erro, e ainda o tipo de nó respectivo.

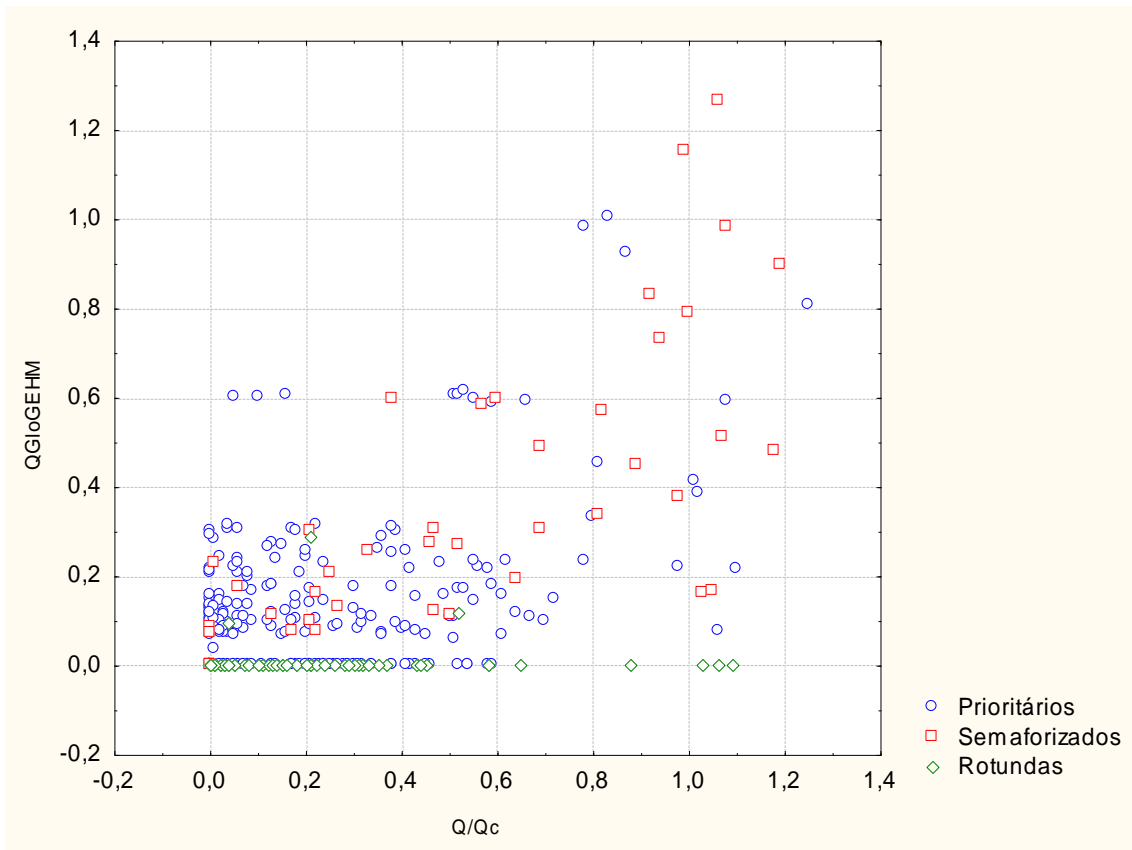


Figura V.18 – Relação entre a taxa de saturação, o tipo de nó do movimento onde foi introduzido o erro e o impacto global resultante

Verifica-se que, apesar de os erros terem sido introduzidos em locais aleatórios, a distribuição da intensidade dos impactos é “quase discreta”, havendo uma evidente concentração dos valores do indicador QGloGEHM entre 0,1 e 0,3, bem como um grande número de corridas com impacto nulo e outras com um QGloGEHM aproximadamente igual a 0,6. Esta distribuição é significativa e justificou uma análise específica, antes de serem inferidas quaisquer relações entre as variáveis explicativas e o indicador de aderência.

Para investigar este efeito calculou-se para cada corrida o custo global de deslocação para o conjunto dos condutores, dado pela expressão $CUSTO [UVE.h] = (TTTT.60 + TTDT)/60$, onde TTTT [UVE.h] é o tempo total de trajeto e TTDT [UVE.km] é a distância total percorrida (Figura V.19).

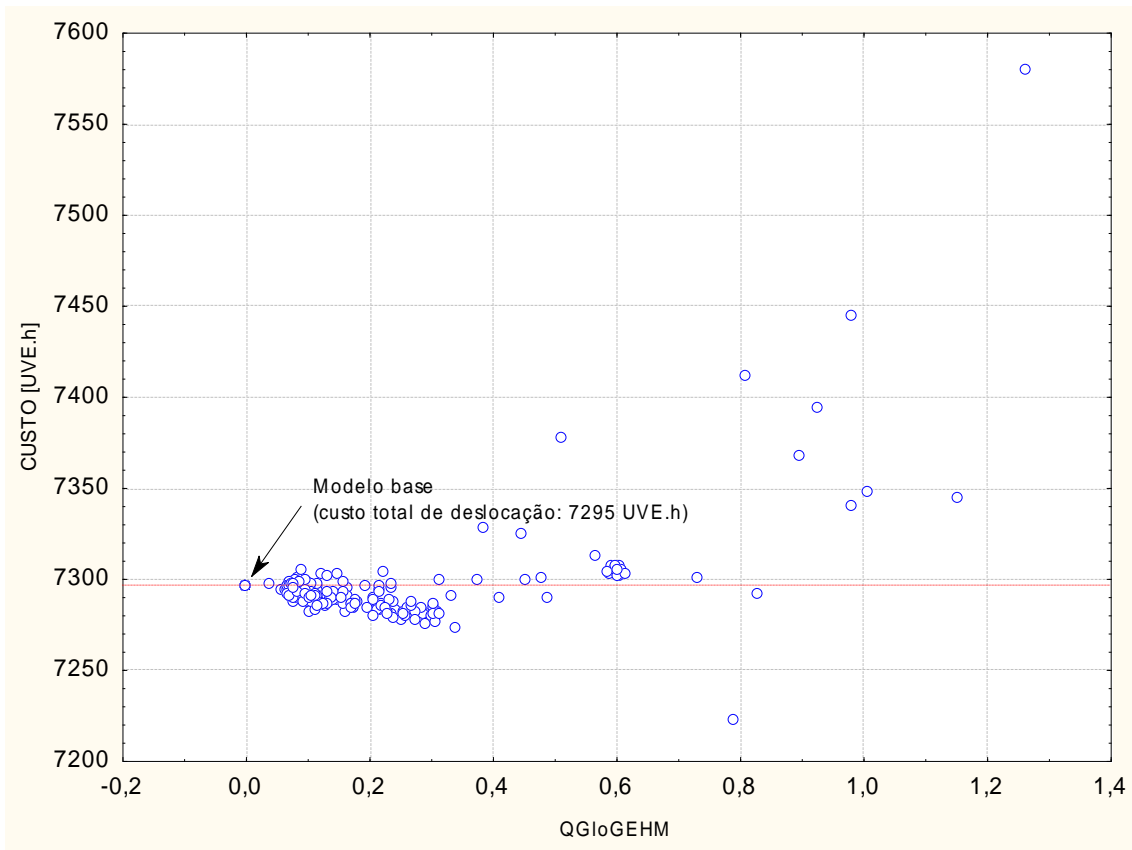


Figura V.19 – Custo total de deslocação para o conjunto dos condutores

Não obstante o erro aplicado em cada corrida consistir na redução do fluxo de saturação de um determinado movimento de viragem (deterioração das condições de circulação), houve um número muito significativo de corridas (31,8%) em que o custo total de deslocação diminuiu. Esta diminuição está associada a pequenos ajustamentos dos padrões de fluxos na rede, constatando-se que a partir de um certo volume de alterações ($QGloGEHM \geq 0,4$) o efeito perde relevância.

Há dois factores que podem estar na origem desta tendência. O primeiro é a existência de falhas no processo de convergência que originou o estado de equilíbrio do modelo base, já que pequenas perturbações nessa rede são suficientes para conduzir a padrões de deslocações com menores custos globais (embora essas reduções sejam muito limitadas, abaixo de 1%). O outro factor poderá ser o próprio comportamento dos condutores que, ao procurar minimizar o custo individual de deslocação, originam estados de equilíbrio não óptimos para a comunidade. Este comportamento poderá mesmo, em caso particulares, dar origem ao “*Paradoxo de Braess*” (Braess, 1969), que traduz o fenómeno de deterioração das condições globais de circulação após a implementação de medidas de beneficiação da rede (ou a situação oposta).

Tendo em conta o custo total de deslocação (igual, inferior ou superior ao do modelo base - MB) e a amplitude das alterações registadas em cada corrida, considera-se

adequada a divisão da amostra em seis grupos, já que tal corresponde a diferentes “estados” do sistema (ver a Tabela V.3 e a Figura V.20):

Tabela V.3 – Segmentação da amostra em função do custo total de deslocação e da amplitude das alterações registadas

Grupo	Custo total de deslocação	QGloGEHM		Número de corridas	
1	MB	0		284	56,8%
2	< MB	e	< 0,5	157	31,4%
3		e	≥ 0,7 [*]	2	0,4%
4	> MB	e	< 0,5	33	6,6%
5		e	[0,5 - 0,7[15	3,0%
6		e	≥ 0,7	9	1,8%

[*] Nenhuma corrida satisfaz a condição $[0,5 \leq QGloGEHM < 0,7$ e $Custo < MB$]

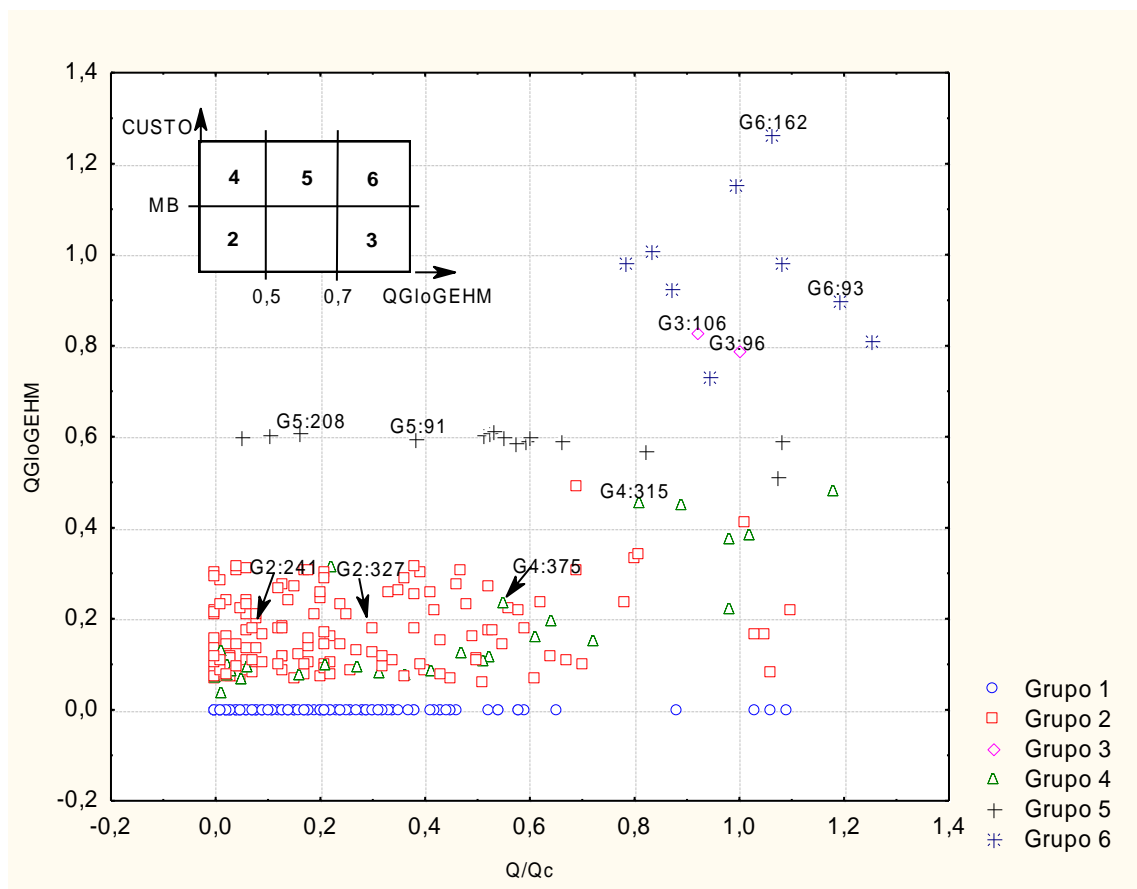


Figura V.20 – Segmentação da amostra em função do custo total de deslocação e da amplitude das alterações registadas

Relativamente ao Grupo 1, o erro introduzido não foi suficiente para criar um estado de equilíbrio diferente do modelo base ($QGloGEHM = 0$). Esta situação ocorre principalmente nas rotundas mas também nos cruzamentos prioritários. Relativamente às rotundas, os resultados devem-se a uma deficiência do algoritmo utilizado para introdução de erros: apesar de o utilizador ter que codificar as capacidades dos diversos

movimentos de viragem de cada uma das entradas, o SATURN assume para a “capacidade geométrica” da entrada o maior dos valores codificados, pelo que a redução do fluxo de saturação num único movimento de viragem apenas tem influência em casos muito particulares (rotundas de três braços e sentido proibido para um deles). Quanto aos cruzamentos prioritários, importa lembrar que a redução do fluxo de saturação dos movimentos prioritários é normalmente inconsequente: o modelo apenas aplicaria demoras a estes movimentos se o fluxo de chegada excedesse o fluxo de saturação, situação que na prática raramente acontece. As corridas deste grupo não foram consideradas nas análises subsequentes.

As corridas do Grupo 2 resultaram num custo global de deslocação inferior ao do modelo base. Os padrões de fluxos são muito semelhantes entre si, e sem qualquer relação aparente com as características do movimento de viragem onde foi subestimado o fluxo de saturação. Os estados de equilíbrio atingidos correspondem essencialmente à reafecção de um número considerável de viagens que, no modelo base, utilizam a Av. Aeminium, para a R. do Padrão (ver dois casos típicos na Figura V.23).

Atendendo ao pouco significativo impacto global das alterações introduzidas e à tipologia dos padrões de fluxos resultantes, parece seguro atribuir este comportamento a características intrínsecas do processo de convergência do modelo.

Quando se analisam os padrões de fluxos das duas corridas do Grupo 3 (ver as figuras V.21 e V.24), constata-se que o modelo responde adequadamente à alteração introduzida, reflectindo as escolhas naturais de trajectos que os condutores adoptariam face às restrições de capacidade em causa. Estes novos padrões de fluxos representam, contudo, uma diminuição dos custos globais de deslocação – a comunidade de condutores beneficia com a restrição introduzida. São, assim, situações em que ocorreu o Paradoxo de Braess.

No que respeita às corridas dos grupos 4 e 5, o modelo responde naturalmente à perturbação introduzida, na medida em que um erro de subestimação da capacidade de um movimento de viragem está associado a um acréscimo do custo total de deslocação. Contudo, quando se analisa a variação de volumes de tráfego relativamente ao modelo base, verifica-se que, mais uma vez, esta é praticamente independente da localização do erro introduzido (Figura V.25 e Figura V.26). A perturbação é apenas suficiente para que o modelo convirja para um novo estado de equilíbrio e que, essencialmente, consiste na atribuição de um grande número de viagens que utilizavam o IC2 a trajectos alternativos, nomeadamente a Estrada de Eiras e a antiga EN1, para além das alterações já referidas em relação às corridas do Grupo 2.

Finalmente, as corridas do Grupo 6 (ver a Figura V.21 e a Figura V.27) originam padrões de fluxos razoavelmente distintos do original e, como seria esperado, correspondem a um acréscimo do custo total de deslocação. À semelhança das corridas

do Grupo 3, os padrões de fluxos são, em traços gerais, consentâneos com o tipo de erro introduzido.

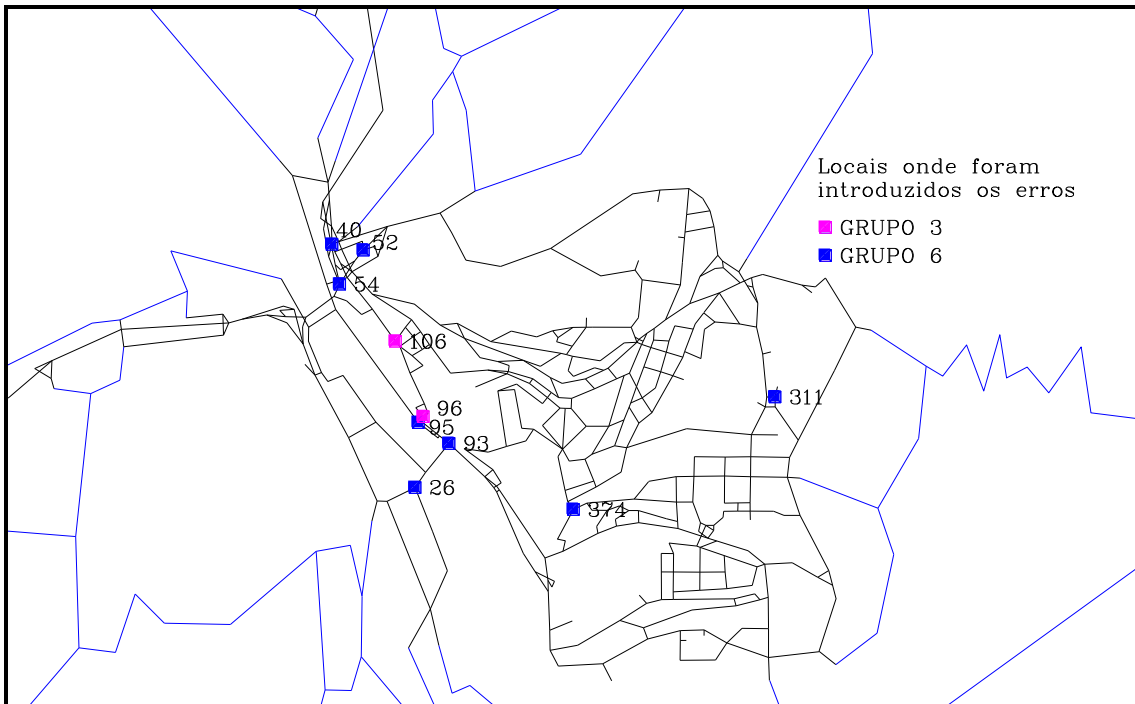


Figura V.21 – Locais onde foram introduzidos os erros (corridas dos grupos 3 e 6)

Da análise da Figura V.22 constata-se que valores elevados do “fluxo de chegada” e da “taxa de saturação” dos movimentos de viragem onde se introduzem os erros são condições necessárias, ainda que não suficientes, para que os erros de quantificação produzam os impactos mais significativos – corridas dos grupos 3 e 6.

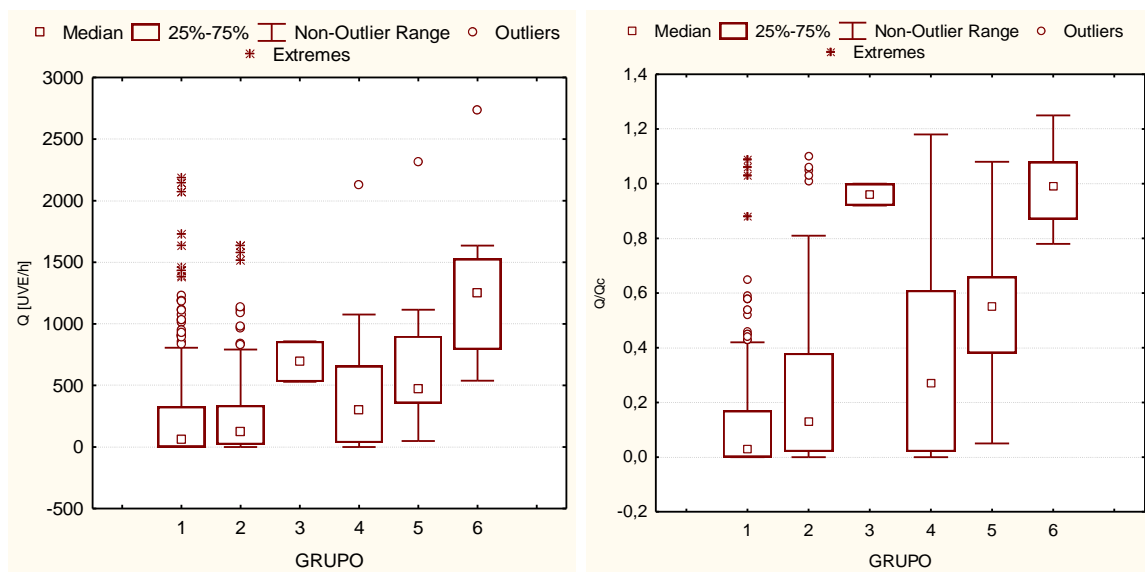


Figura V.22 – Características dos movimentos de viragem correspondentes aos diferentes grupos de corridas

Já quando se procura explicar a variabilidade dos resultados a um nível mais desagregado, dentro de cada grupo, surgem algumas dificuldades: por um lado, no que respeita às corridas dos grupos 2, 4 e 5, parece pouco razoável procurar identificar relações entre as características dos movimentos de viragem onde foram introduzidos os erros e o desempenho do modelo, uma vez que o padrão de deslocações, entre as corridas de cada grupo, é praticamente invariável; por outro, as nove corridas do Grupo 6, são insuficientes para permitirem a obtenção de resultados estatisticamente significativos (ver a Tabela V.4).

Tabela V.4 – Características dos movimentos de viragem com mais influência no desempenho do modelo (corridas do grupo 4)

ID	Q [UVE/h]	Ordem percent.	Q/Q _C	Ordem percent.	Tipo	QGlo GEHM	Local
162	1635,6	98%	1,06	98%	Semaf.	1,265	Fucoli - C. Semaf.- HUC
374	791,7	87%	0,99	97%	Semaf.	1,155	R. Comb. - Arcos do Jardim
311	1328,0	96%	0,83	95%	Prior.	1,007	Quinta Maia- Av. A. Portugal
54	2734,9	100%	0,78	94%	Prior.	0,982	IC2: Coimbra B-Açude-Ponte
26	1247,5	95%	1,08	99%	Semaf.	0,981	Av. Inês Castro- Pte Sta Clara
52	1528,9	97%	0,87	95%	Prior.	0,927	Açude-Ponte – Fucoli
93	569,3	82%	1,19	100%	Semaf.	0,899	Av. E. Navaro - Pte. Sta Clara
95	538,6	81%	1,25	100%	Prior.	0,810	R. Aeminium– Portagem
40	817,9	88%	0,94	96%	Semaf.	0,733	Fucoli – C. Sal – Açude-Ponte

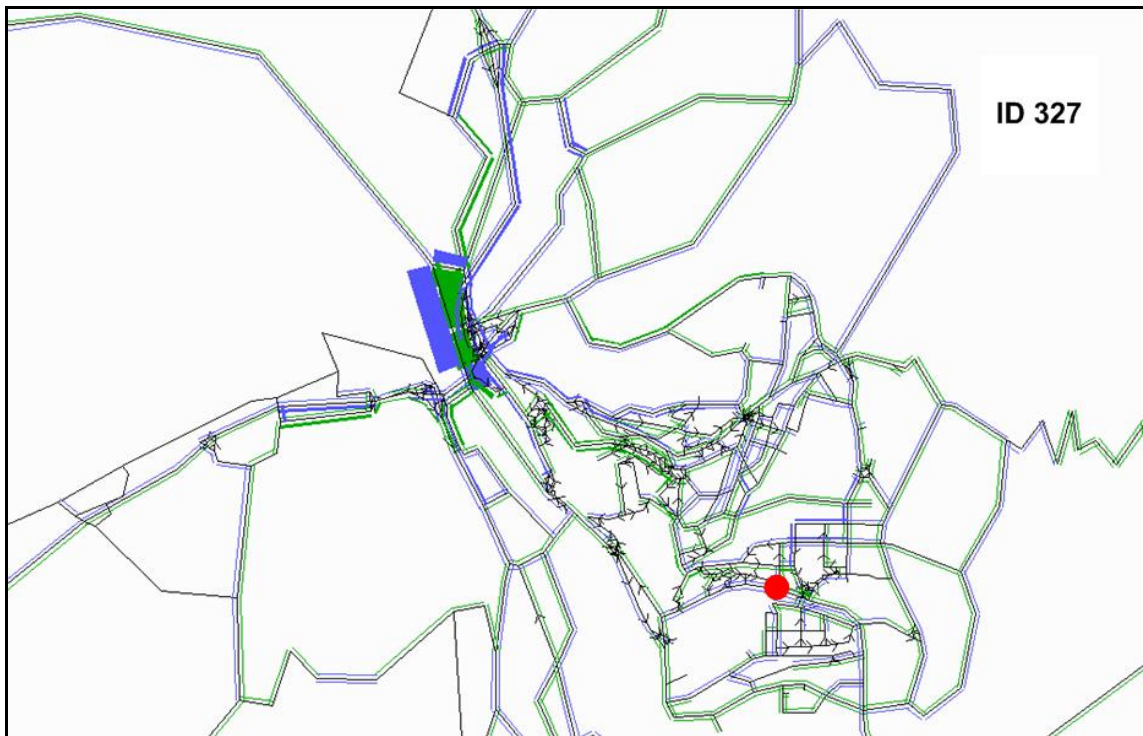
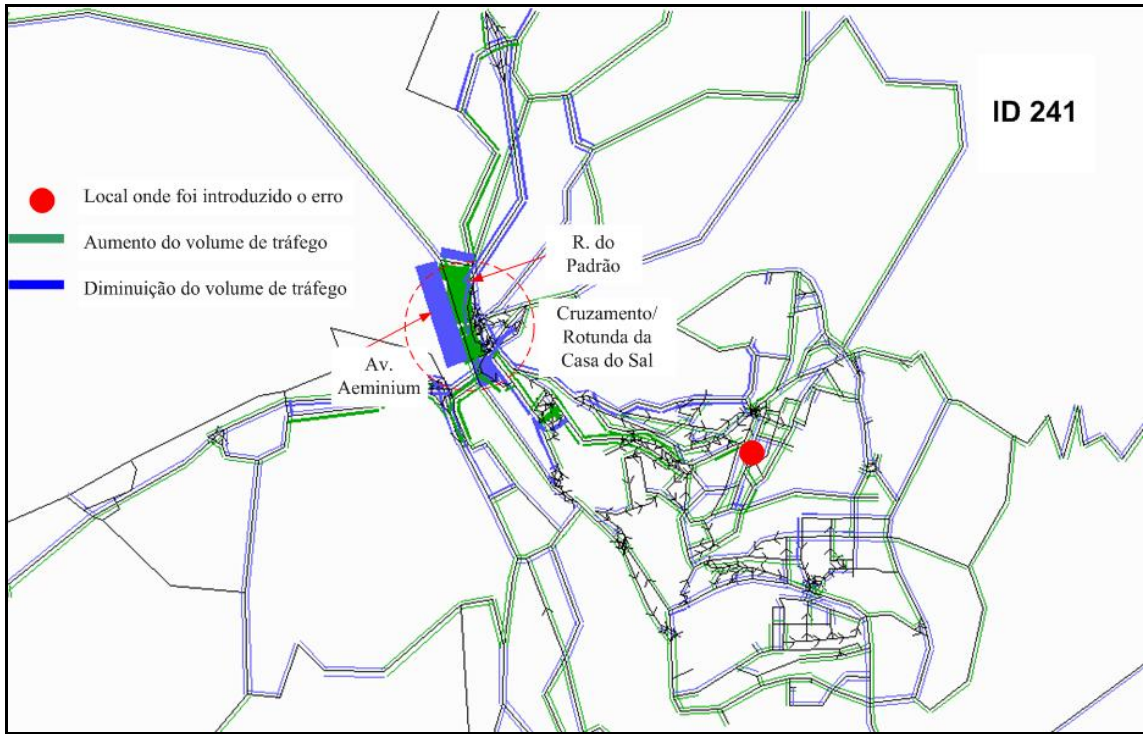


Figura V.23 – Padrões de fluxos típicos de corridas do Grupo 2

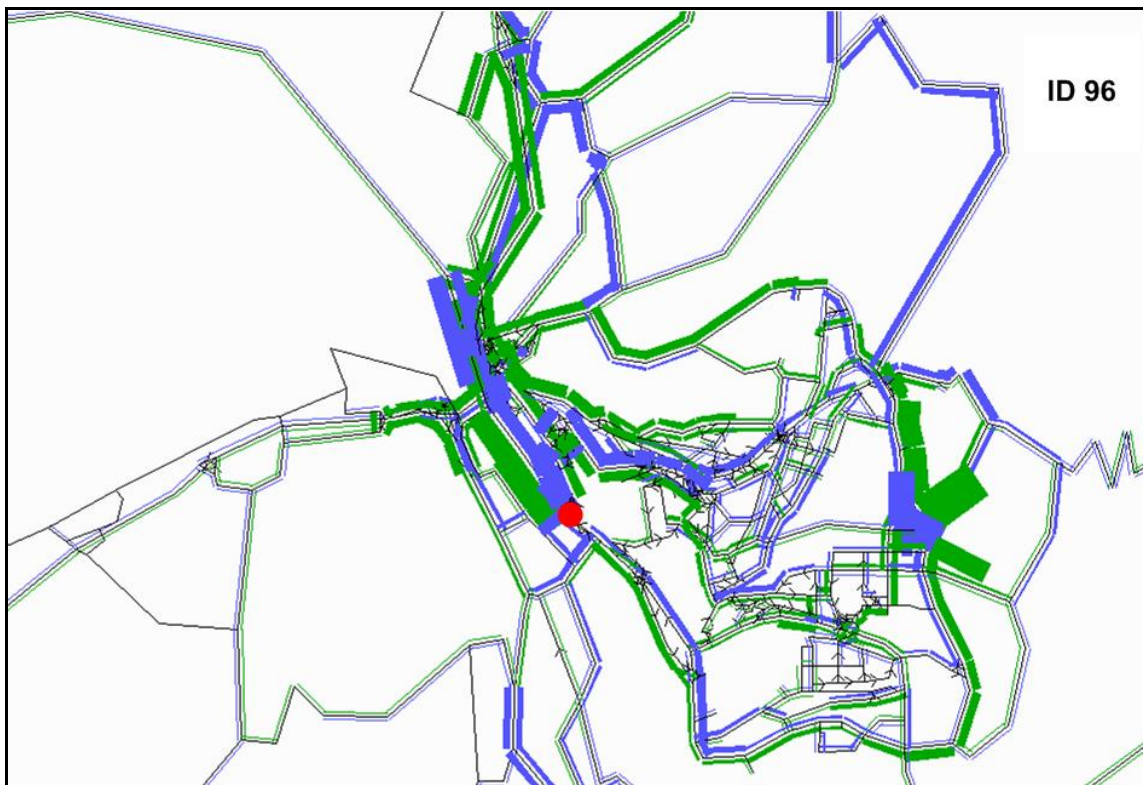
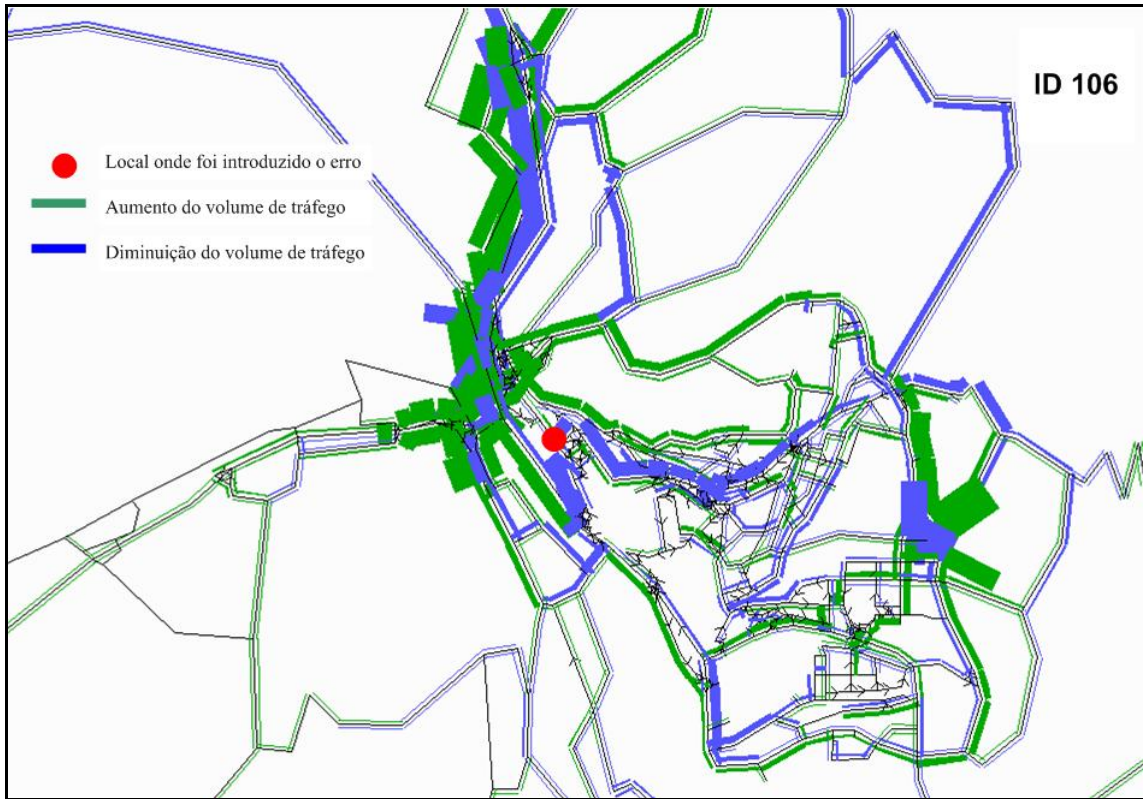


Figura V.24 – Padrões de fluxos das corridas do Grupo 3

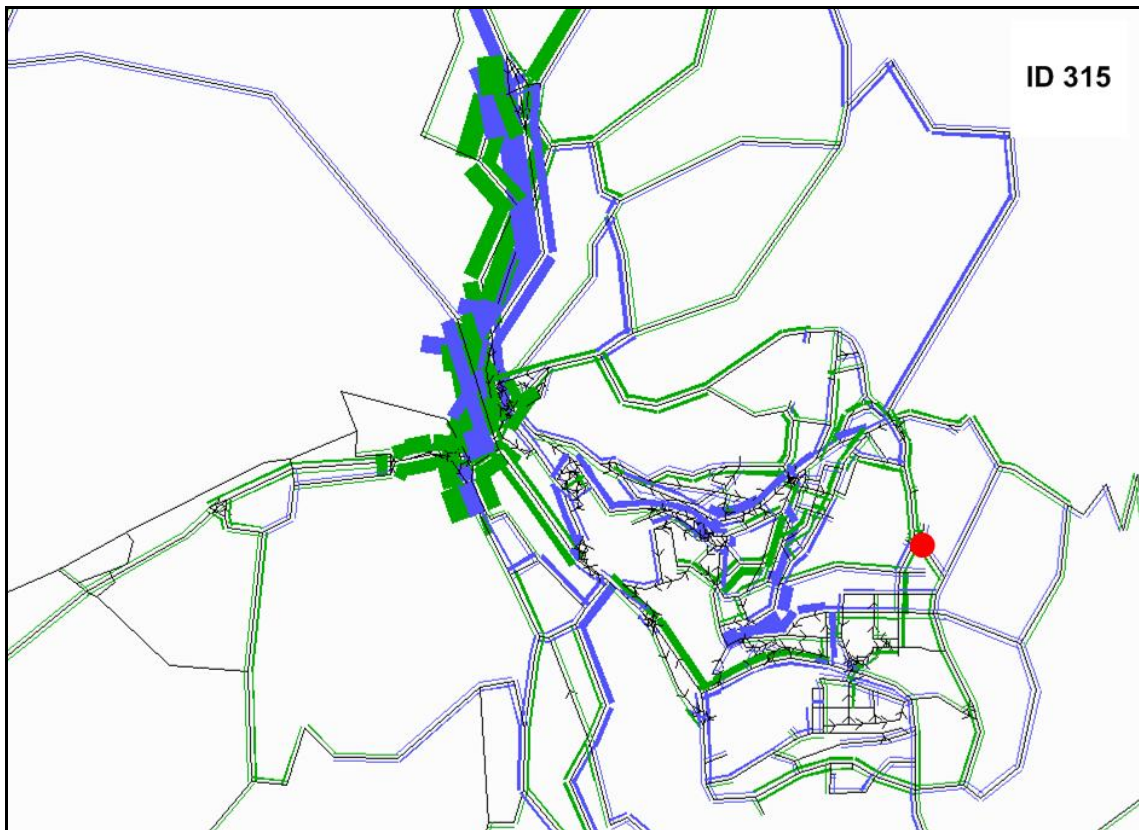
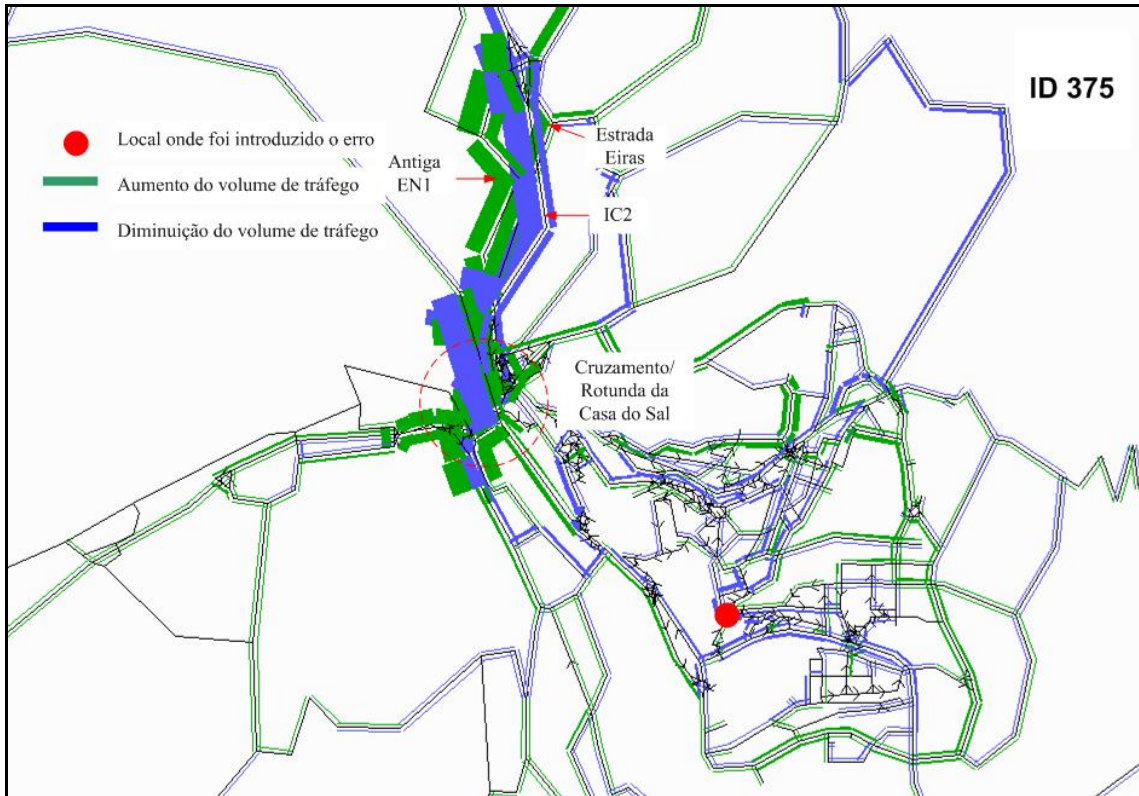


Figura V.25 – Padrões de fluxos típicos de corridas do Grupo 4

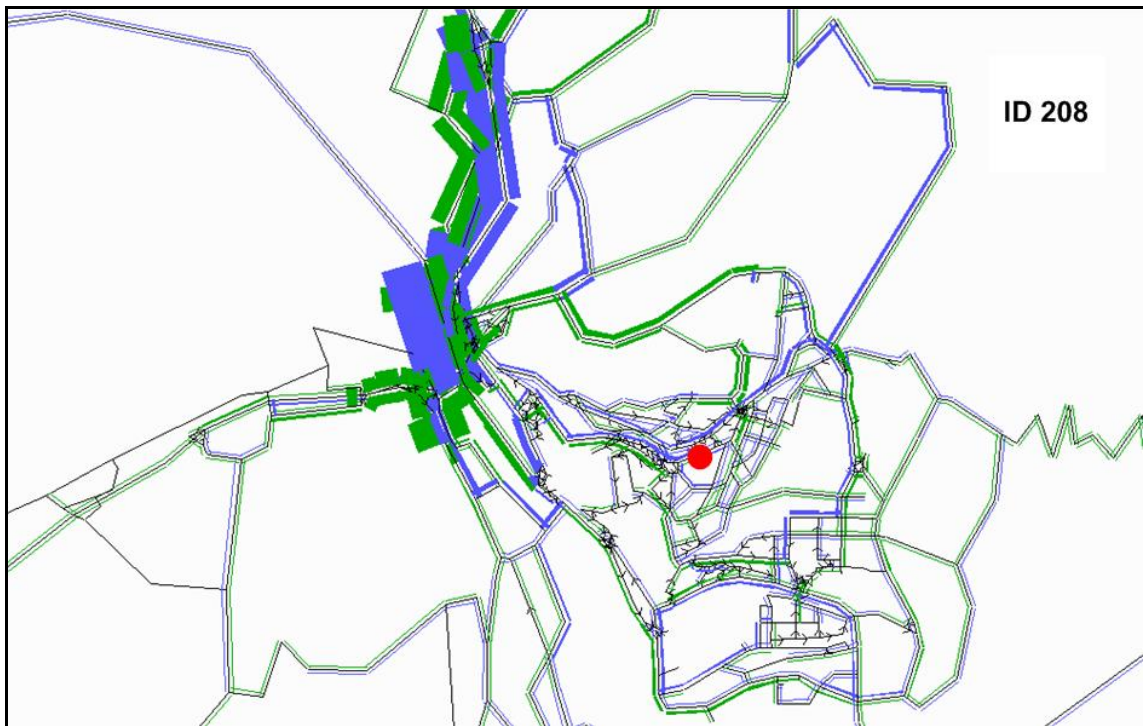
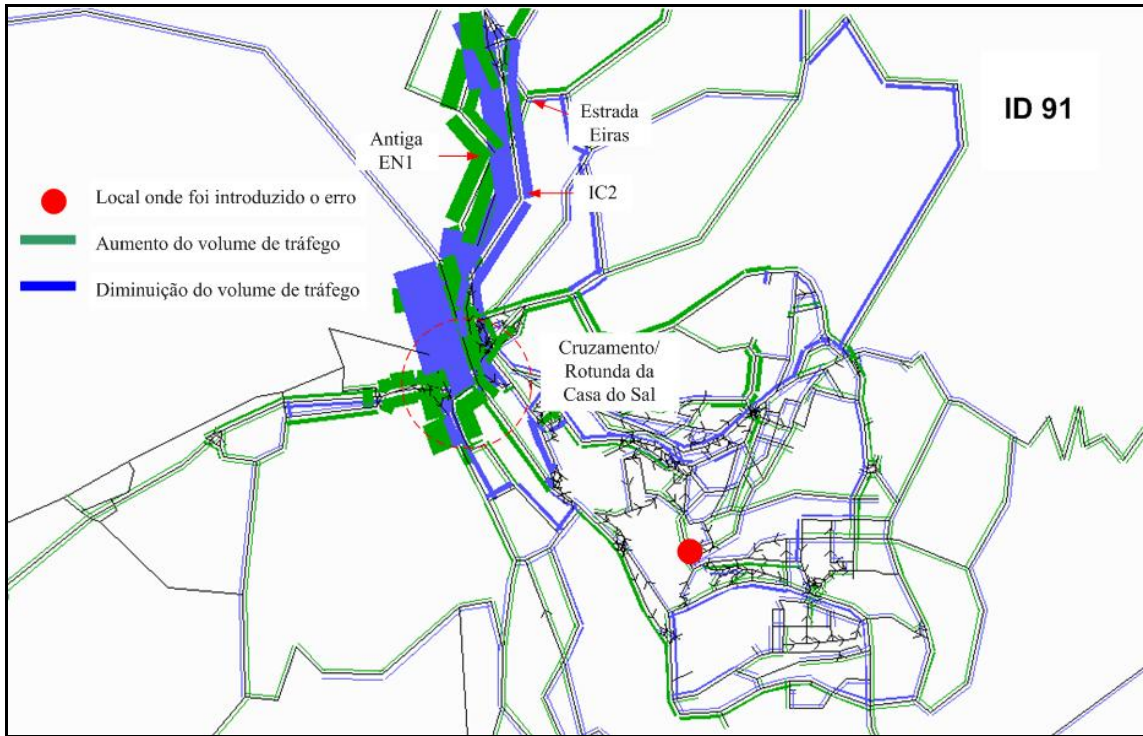


Figura V.26 – Padrões de fluxos típicos de corridas do Grupo 5

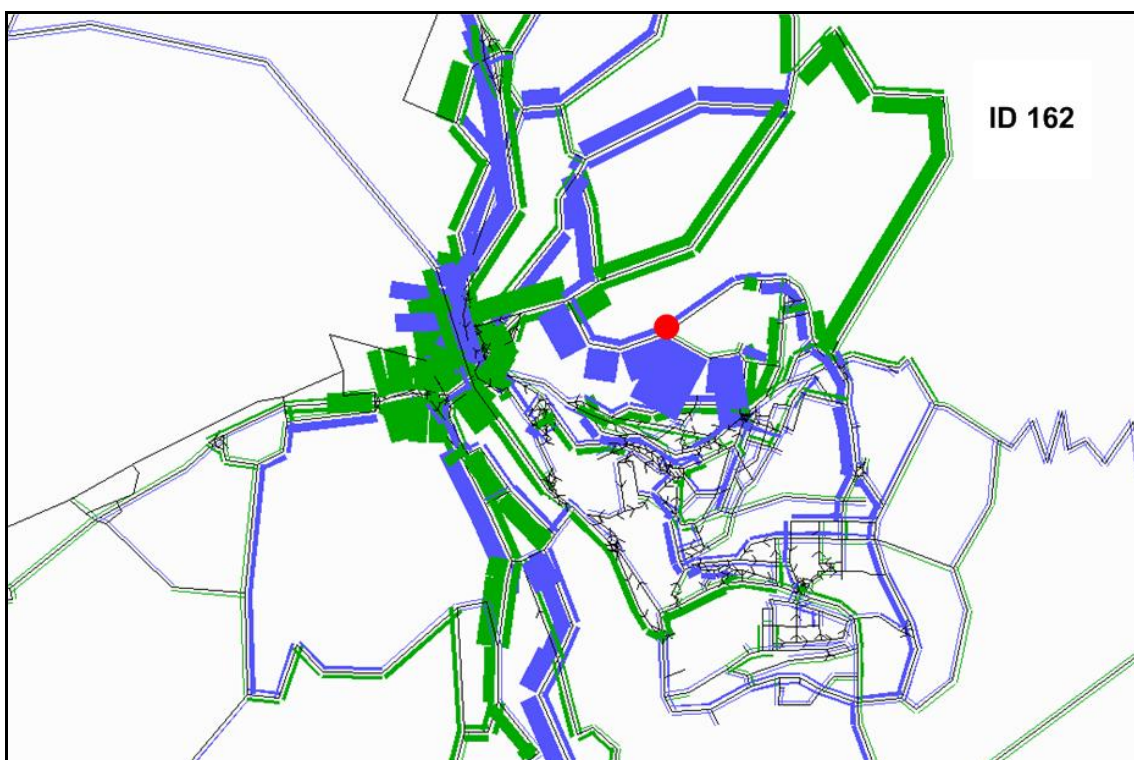
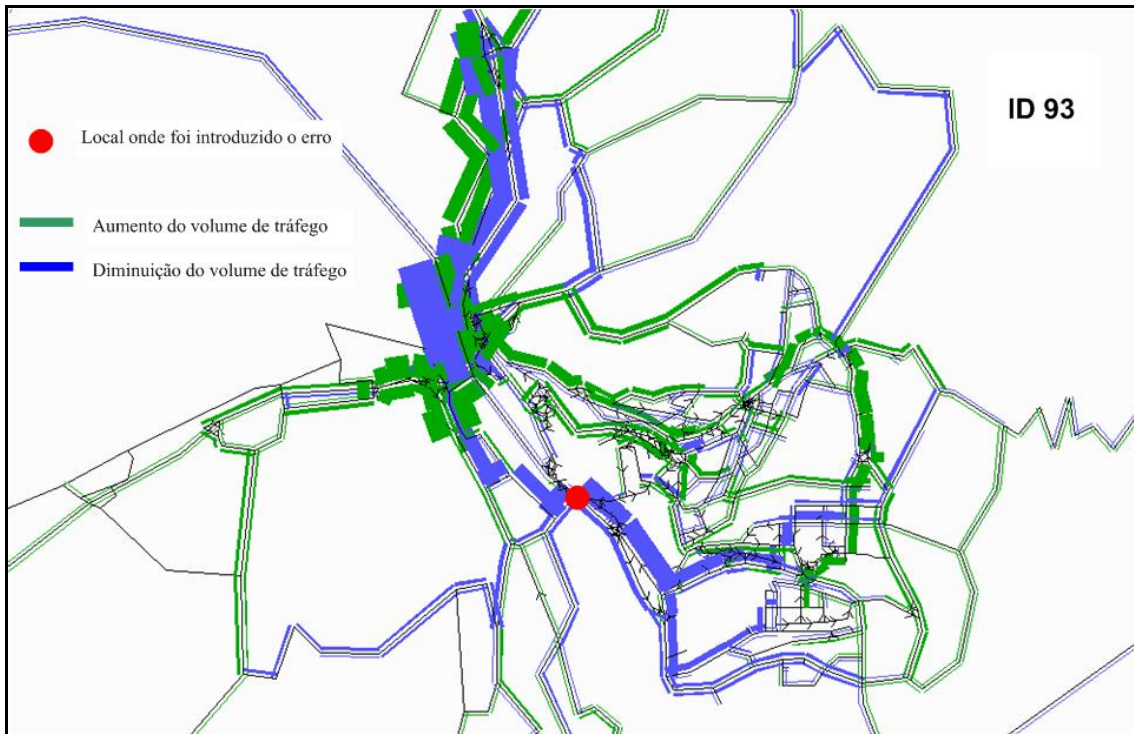


Figura V.27 Padrões de fluxos típicos de corridas do Grupo 6

V.5.3 Estudo da relação entre o grau de susceptibilidade dos diferentes elementos da rede e as suas características básicas

Como forma de garantir a possibilidade de generalização dos resultados, optou-se pela realização da análise para dois tipos distintos de geração de erros. O primeiro consistiu na aplicação de erros aleatórios nos fluxos de saturação de todos os movimentos de viragem, obedecendo a uma distribuição normal com $CV = 0,15$. O segundo tipo de erros consistiu na redução em 50%¹² da capacidade de um determinado movimento de viragem (escolhido aleatoriamente de entre aqueles que causam os maiores impactos em toda a rede – Grupo 4).

Para os dois tipos, realizaram-se 5 corridas e registou-se, para cada movimento de viragem, a média dos impactos aí registados.

As distribuições dos erros (GEH) nos fluxos previstos pelo modelo apresentam-se na Figura V.28, podendo verificar-se a ocorrência de uma gama razoavelmente alargada de níveis de impacto pelos diferentes elementos.

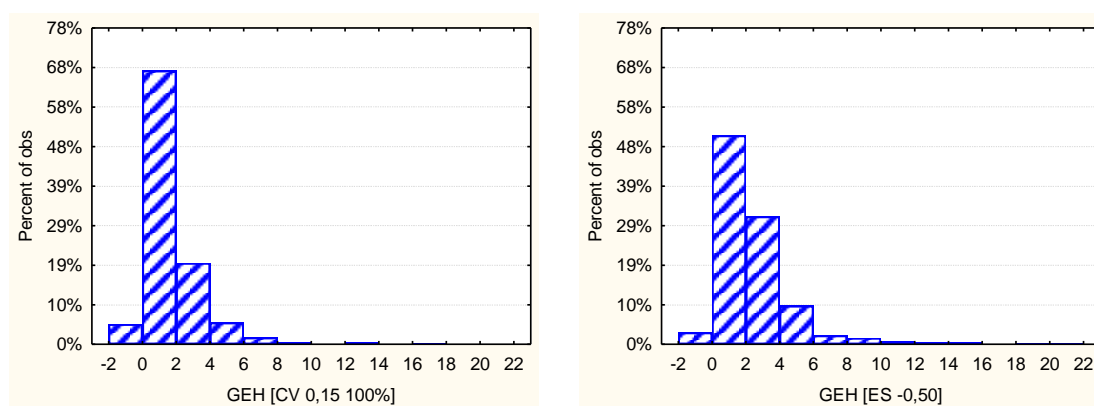


Figura V.28 – Distribuição de erros nas comparações de fluxos (valores médios de 5 corridas): a) erro aleatório em todos os movimentos de viragem, $CV = 0,15$; b) erro sistemático de sub-estimação em um único movimento de viragem, $ES = -0,50$

Numa tentativa de procurar explicar esta variabilidade procedeu-se a uma série de análises de correlação dos valores dos impactos observados relativamente a um conjunto de possíveis variáveis explicativas (ver ponto V.5.1), nomeadamente o tipo de nó, o volume de tráfego (procura), a taxa de saturação e ainda a categoria hierárquica das vias, sendo obtidos os seguintes resultados:

- Embora com oscilações importantes, pode concluir-se que os erros (discrepâncias entre os fluxos previstos e “observados”) tendem a ser mais importantes nas vias que se encontram mais próximas do limiar de saturação (Figura V.29)

¹² A intensidade deste erro, não natural, foi escolhida de modo a que os impactos das duas tipologias fossem da mesma ordem de grandeza.

- O tipo de intersecção é uma variável que não permite prever a grandeza dos erros que se vão verificar nos respectivos movimentos de viragem (Figura V.30)
- Exceptuando o caso de vias com pouco tráfego, às quais estão associados os impactos de menor intensidade, não é aparente uma relação directa entre o carregamento da via e o impacto dos erros de quantificação (Figura V.31).
- Parece haver uma relação, ainda que não muito marcada, entre a categoria hierárquica da via e a sua sensibilidade aos erros, particularmente quando é estabelecida a comparação entre as vias locais e as vias estruturantes, entendidas como o conjunto das vias colectoras e distribuidoras principais (Figura V.32).

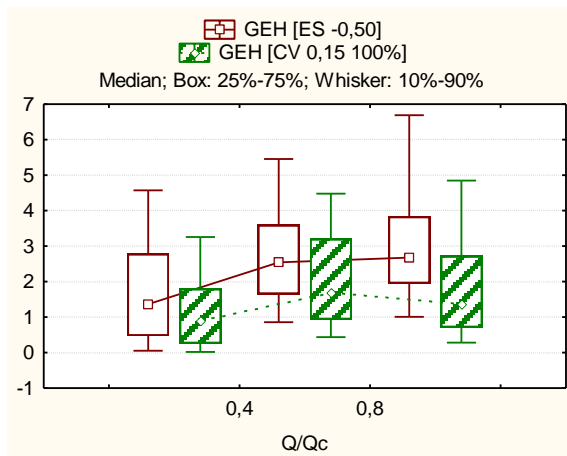


Figura V.29 – Relação entre a taxa de saturação e a intensidade do erro

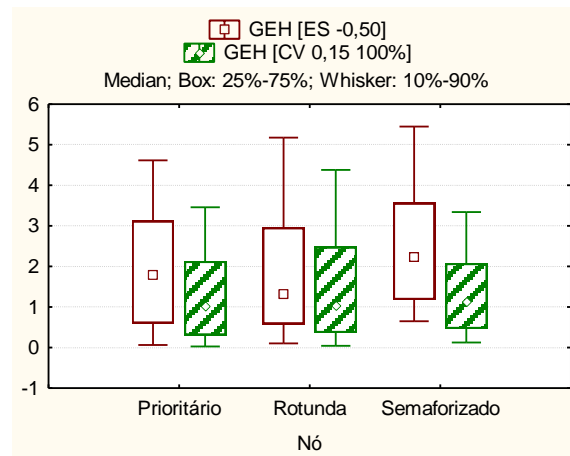


Figura V.30 – Relação entre o tipo de nó e a intensidade do erro

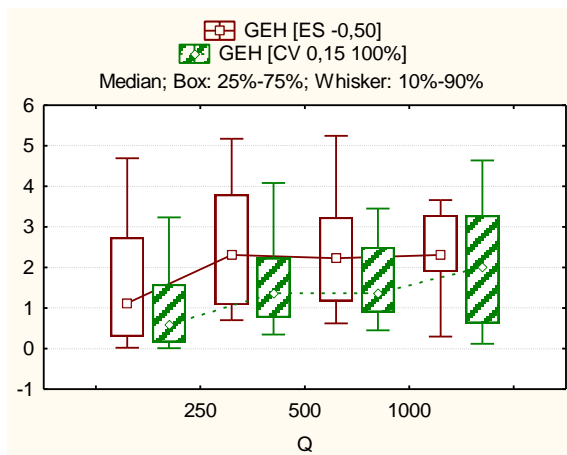


Figura V.31 – Relação entre o fluxo de chegada e a intensidade do erro

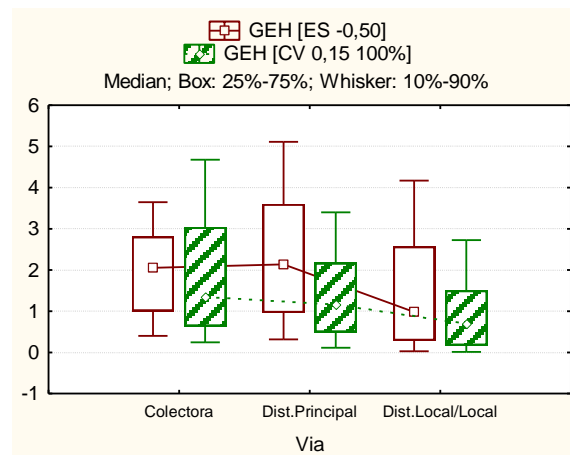


Figura V.32 – Relação entre a classe hierárquica da via e a intensidade do erro

V.5.4 Síntese

Com o primeiro tipo de análises (V.5.2) verificou-se que o modelo em causa apresenta alguma instabilidade, convergindo para outros estados de equilíbrio quando sujeito a pequenas perturbações. Este comportamento sugere a eventual necessidade do relaxamento dos critérios de validação (o que poderá explicar o facto de os principais critérios de validação adoptarem indicadores de aderência como o QGloGEHM85 e o QGloP85, com os quais se aceita que uma determinada percentagem de elementos não verifique os critérios de validação, independentemente da gravidade do erro); sugere igualmente que a utilização dos resultados da simulação em elementos sensíveis deve ser encarada com algumas reservas.

Ainda assim, foi possível estabelecer uma relação de causalidade entre as intensidades dos impactos e algumas propriedades dos elementos da rede onde foram introduzidos os erros, nomeadamente a simultaneidade de fluxos elevados e taxas de saturação no limiar da unidade.

Deste modo, e em relação aos fluxos de saturação na zona de simulação, justificar-se-ia uma quantificação muito precisa dessa variável nos movimentos de viragem que, na situação actual ou numa situação alternativa em análise, estão/tenham a estar simultaneamente carregados e no limiar da capacidade.

Com o segundo tipo de análises (V.5.3) constatou-se que algumas características dos elementos da rede – categoria da via, taxa de saturação e grau de carregamento – explicam em certa medida a sua propensão a erros. Infelizmente, existe um certo grau de correlação entre essas variáveis explicativas, o que dificulta a identificação do papel de cada uma delas na sensibilidade dos diferentes elementos da rede.

V.6 Avaliação da importância da inter-relação espacial dos elementos onde são cometidos os erros de quantificação

Neste ponto procurou-se compreender até que ponto os impactos dos erros de quantificação podem ser explicados pela distribuição espacial dos elementos onde são cometidos. Especificamente, com a análise aqui desenvolvida procurou-se saber até que ponto é mais gravosa uma situação em que os erros estejam concentrados numa zona específica, por oposição a outra em que a distribuição espacial seja aleatória, ou seja, trata-se da “avaliação da importância da não aleatoriedade espacial dos locais onde são cometidos os erros”.

Este tipo de análises obriga à adopção de indicadores específicos para quantificar o afastamento entre os diferentes elementos da rede. No ponto III.5.2 apresentaram-se os

indicadores “Distância” e “Conectividade”, adoptados para este trabalho, e cujo significado físico se ilustra na Figura V.33.

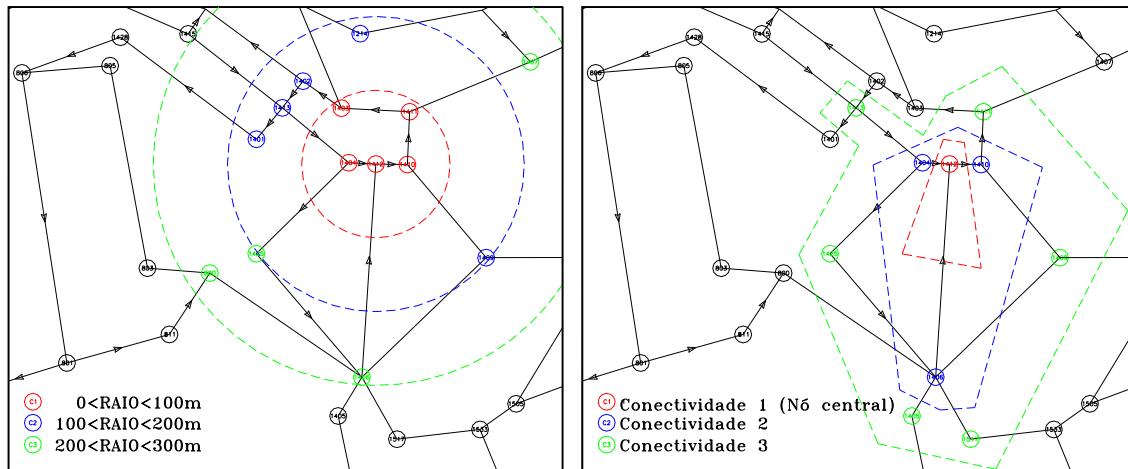


Figura V.33 – Indicadores de afastamento dos diferentes elementos ao ponto onde é introduzido o erro: conectividade e distância em linha recta

A metodologia adoptada para investigar este efeito consistiu, numa primeira fase, por avaliar o impacto no desempenho global do modelo da ocorrência de um número fixo de erros em espaços progressivamente menos confinados.

Para tal, definiram-se quatro nós de referência, distribuídos de um modo aproximadamente uniforme pela rede (ver Figura V.34 – cor vermelha) e, para cada, foram definidas quatro zonas de proximidade em termos de “conectividade”: afastamento inferior a 5, 10, 15 e 20 nós. Em cada uma destas zonas fizeram-se 40 extracções aleatórias de 75 movimentos de viragem, sendo aplicados erros aleatórios com $CV = 0,15$ nos fluxos de saturação respectivos e quantificados os impactos globais resultantes. No total, foram realizadas 640 corridas.

Para controlo, realizaram-se 500 corridas nas quais não foi introduzida qualquer restrição espacial na geração de erros.

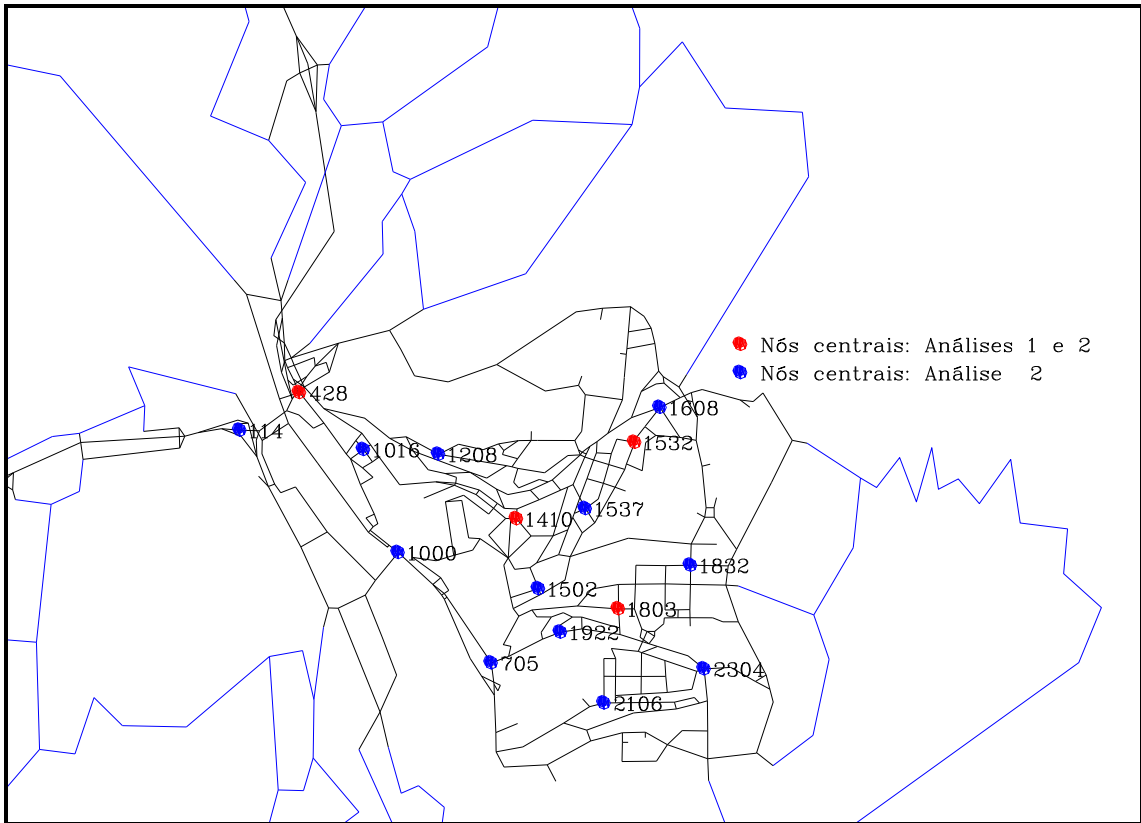


Figura V.34 – Localização dos nós centrais

Verifica-se, na Figura V.35, que o único caso onde se verifica um ligeiro desagravamento dos impactos na rede com a dispersão dos locais onde são introduzidos os erros é aquele em que o nó central é o 428 (na Casa do Sal). Nos restantes casos, o impacto dos erros acompanha a o grau de dispersão dos locais onde são cometidos.

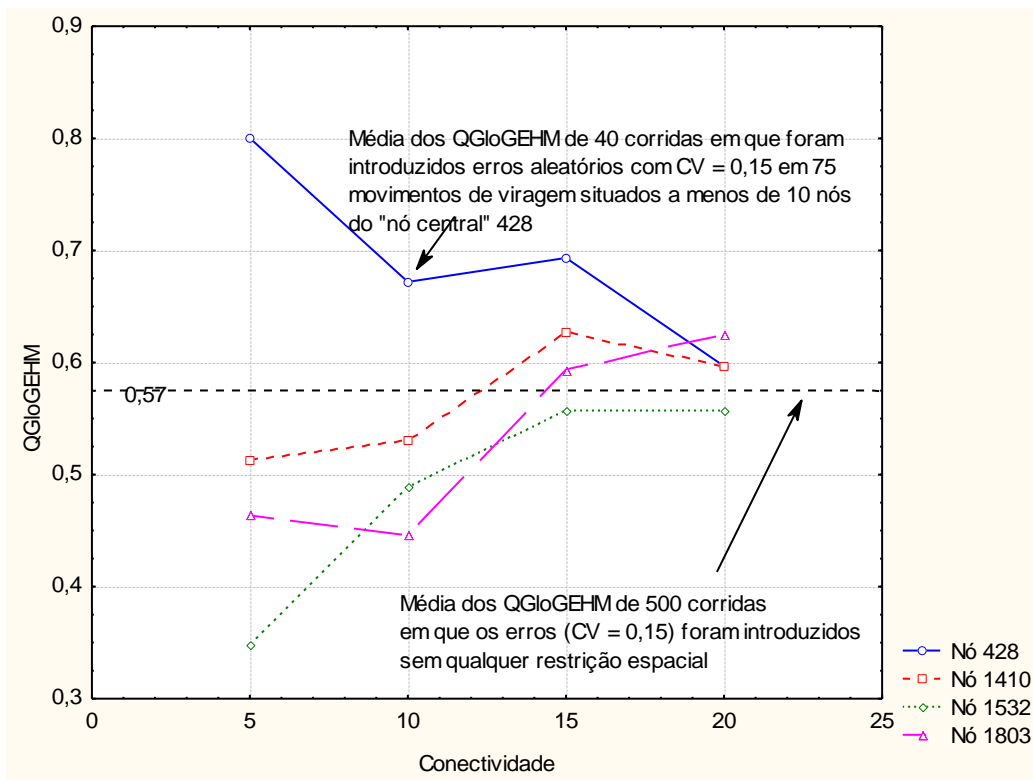


Figura V.35 – Análise do desempenho do modelo para diferentes níveis de concentração de erros

Tendo em conta o número limitado de pontos centrais considerados para análise e a variabilidade de resultados obtidos, optou-se pela repetição da experiência nos seguintes moldes:

- Foram consideradas apenas duas medidas de proximidade: “Conectividade 10” e “sem limite – SL” (não se considerou a conectividade 5 já que essa medida de afastamento era insuficiente para, em alguns casos, criar uma amostra de 75 movimentos de viragem).
- Para a conectividade de 10 nós tomaram-se os resultados já referidos (nós 428, 1410, 1532 e 1803) e ainda de corridas relativas ao conjunto de nós centrais {114, 705, 1000, 1016, 1208, 1502, 1537, 1608, 1832, 1922, 2106, 2304}, distribuídos de forma aproximadamente uniforme pela rede (ver Figura V.34). Esta análise implicou a realização de 640 corridas (40 por nó central).

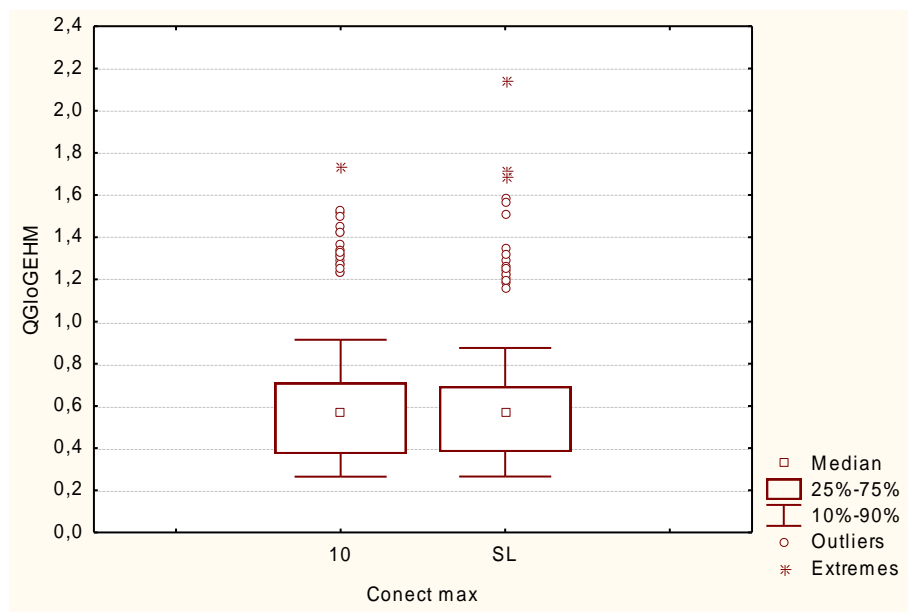


Figura V.36 – Análise do desempenho do modelo: erros concentrados e erros dispersos

Constata-se, na Figura V.36, que as duas distribuições de erros são muito semelhantes, no que respeita à média e à variabilidade. Estes resultados parecem indicar que a concentração de erros não tem por si só um impacto significativo na qualidade dos resultados.

V.7 Avaliação de efeitos de degradação espacial dos impactos

O objectivo desta análise foi o de conhecer a forma como os erros se distribuem em função do afastamento à fonte do erro, procurando verificar se existe alguma tendência para uma concentração especial dos impactos ou para a sua propagação segundo padrões bem definidos

Para investigar a existência de um padrão de degradação de impactos, utilizaram-se os resultados de um subconjunto das corridas identificadas no ponto V.5.2 como pertencentes ao Grupo 6 (6 corridas, ver as figuras seguintes). Nestas corridas, lembre-se, os padrões de impactos na rede são perfeitamente consentâneos com os erros introduzidos – subestimação em 30% do fluxo de saturação de um determinado movimento de viragem.

Para cada corrida calculou-se a média dos GEH dos fluxos de tráfego nos movimentos de viragem correspondentes a diversos níveis de afastamento ao local onde foi introduzido o erro (“coroas” de conectividade/distância).

Verifica-se uma tendência de degradação dos erros com qualquer das medidas de afastamento (conectividade / distância em linha recta) ao local onde foi introduzido o

erro. Esta tendência apresenta, no entanto, fenómenos de instabilidade significativos que se podem dever a dois factores:

- a) Ao efeito já identificado anteriormente, ou seja, os impactos concentram-se numa zona específica da rede, independentemente do local onde são introduzidos os erros singulares (no caso de Coimbra, a zona da Casa do Sal e IC2). Assim, a dissipação de impactos é por vezes mais aparente relativamente à zona mais sensível do que propriamente em relação ao ponto onde foi introduzido o erro.
- b) À forma natural de propagação de erros (variações de fluxos) ao longo dos trajectos utilizados pelos pares OD (ver, por exemplo, a Figura V.27), que é apenas aproximadamente acompanhada pelas medidas de afastamento adoptadas. Na verdade, com a “Distância” não é tida em conta a estrutura da rede – é devolvido o mesmo valor independentemente das ligações disponíveis entre os pontos em causa. Já com a “Conectividade”, a deficiência reside no facto de apenas ser tido em conta o número de arcos, independentemente das suas extensões ou, mais genericamente, dos custos de trajecto associados.

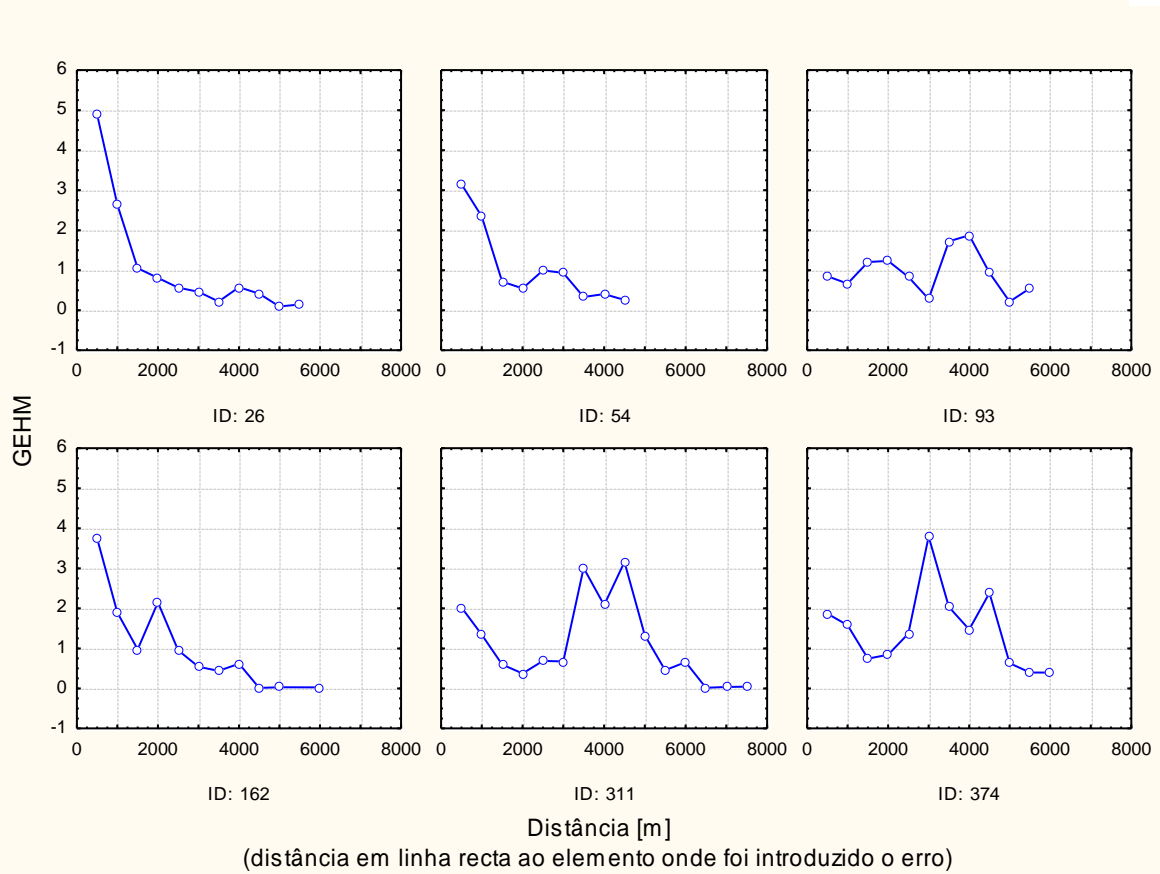
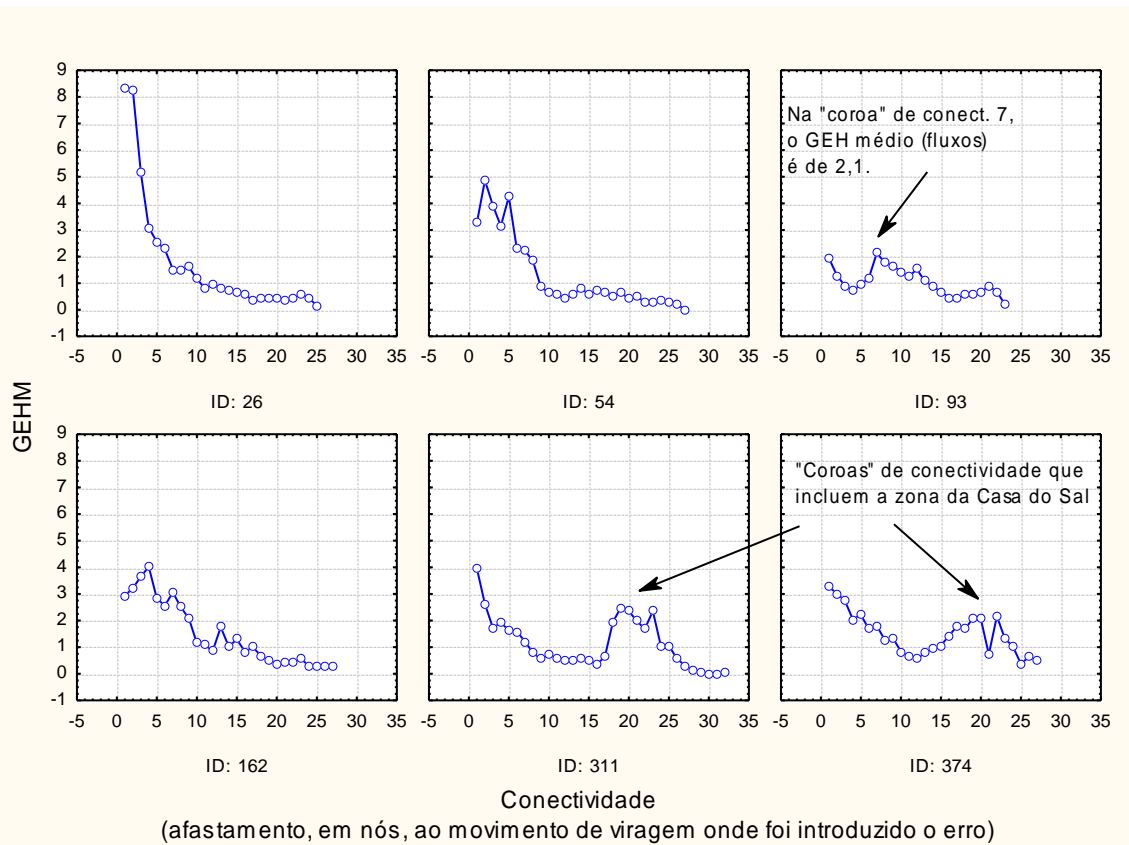


Figura V.37 – Degradação de erros nos resultados em função da “conectividade” e da distância ao ponto de introdução do erro nos dados

V.8 Importância do ambiente rodoviário

V.8.1 Objectivos e metodologia

Nesta secção pretendeu-se conhecer a importância do “ambiente rodoviário” na susceptibilidade global do modelo aos erros de quantificação.

Seleccionaram-se dois tipos diferentes de ambientes para análise: o grau de congestionamento da rede e a atitude dos condutores relativamente à opção de valorizar o tempo de deslocação ou a distância percorrida. Cada um destes ambientes pode ser simulado através de parâmetros do modelo, nomeadamente o GONZO, que indica o factor multiplicativo da matriz origem-destino de base, e o conjunto PPM (*perce per minute*) e PPK (*perce per kilometer*). Relativamente a estes últimos, apenas interessa o seu valor relativo, expresso pela relação PPM/PPK.

Desta forma, avaliou-se a sensibilidade do modelo a erros de quantificação ocorridos em ambientes caracterizados por diferentes valores do parâmetro GONZO ou PPM/PPK. Para tal, bastou considerar que o modelo obtido após a correcção destes parâmetros constitui o modelo de referência, em relação ao qual as diferenças nos valores das variáveis independentes representam erros de quantificação. Estudaram-se três situações distintas:

1. Importância do ambiente “grau de congestionamento” face a erros aleatórios na quantificação de todos os fluxos de saturação;
2. Importância do ambiente “custo do tempo / custo da distância” face a:
 - a. Erros aleatórios na quantificação de todos os fluxos de saturação;
 - b. Erros na quantificação da própria relação PPM/PPK.

V.8.2 Sensibilidade do modelo com diferentes graus de congestionamento da rede

Consideraram-se 15 modelos de referência, decorrentes da modificação do nível global de carregamento do modelo COIMBRA-SAT: $GONZO = \{0,1; 0,2; \dots ; 1,5\}$. Para cada um destes sistemas, realizaram-se 10 corridas, sendo em cada uma introduzido um erro aleatório no fluxo de saturação de todos os movimentos de viragem, com $CV = 0,15$. Foram assim realizadas 150 corridas.

Na Figura V.38 apresenta-se a relação entre o nível de carga da rede e o impacto dos erros de quantificação na qualidade do modelo. Contudo, este é um resultado que, ainda que sugestivo, tem uma aplicabilidade algo limitada, uma vez que a relação entre o nível de carga e o grau de congestionamento é muito dependente das características da rede.

Optou-se então pela determinação de uma relação directa entre o impacto dos erros de quantificação e o grau de congestionamento. Para quantificar esta grandeza adoptaram-se variáveis auxiliares que indicam as percentagens de arcos congestionados (com filas permanentes), nas zonas de simulação e de atribuição, cujas relações com o nível de carga são ilustradas na Figura V.39.

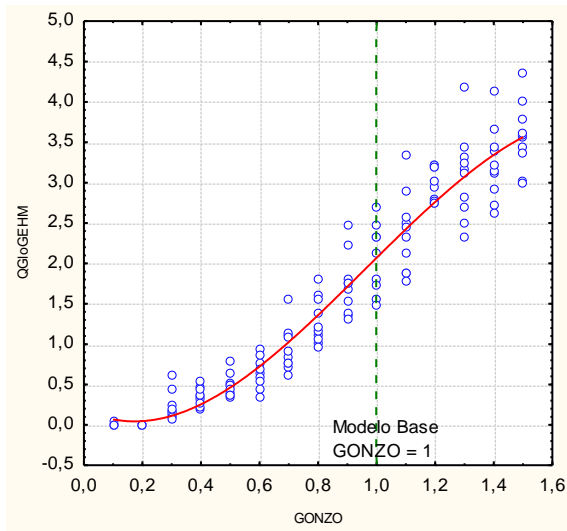


Figura V.38 – Sensibilidade do modelo com diferentes graus de carregamento da rede

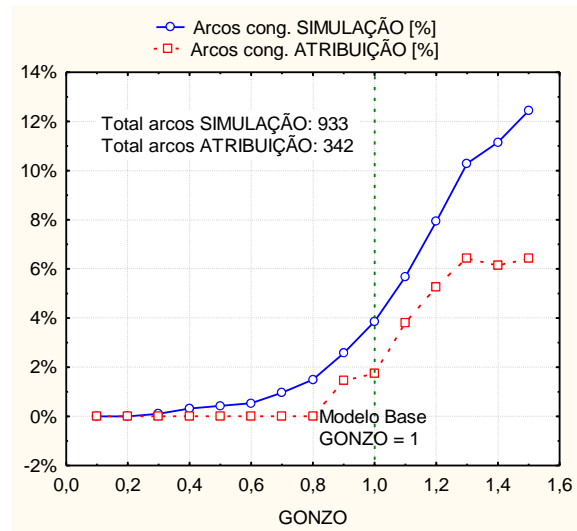


Figura V.39 – Relação entre o carregamento global da rede e o nível de congestionamento

Combinando os dois resultados verifica-se, na Figura V.40, que o impacto dos erros de quantificação acompanha o aumento do grau de congestionamento da rede, embora com uma taxa de variação progressivamente menor. Este comportamento explica-se pelo facto de, em redes pouco solicitadas, não haver uma competitividade forte entre percursos alternativos, enquanto que numa rede congestionada é frequente haver, para cada par O-D, um conjunto de trajectos alternativos com custos de deslocação idênticos e mínimos, pelo que qualquer perturbação no custo de deslocação de um deles é suficiente para promover a reafecção do tráfego.

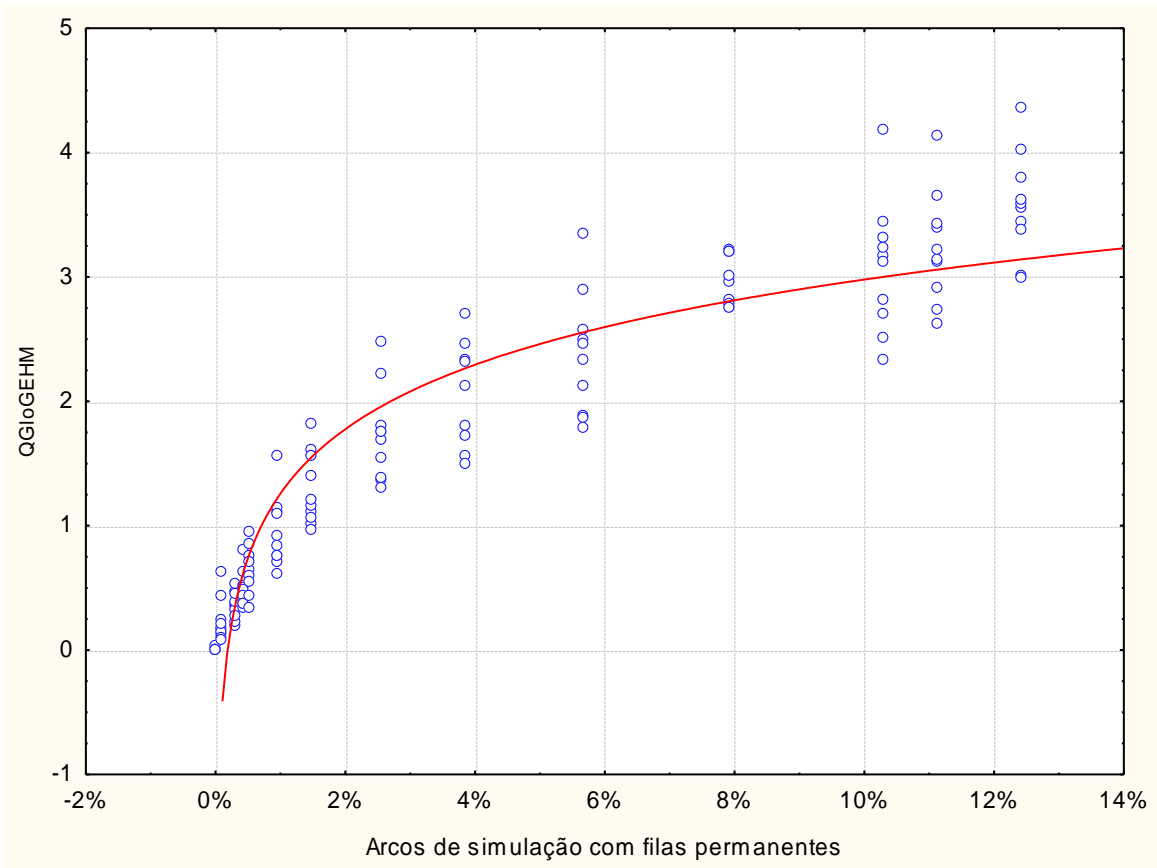


Figura V.40 – Sensibilidade do modelo com diferentes graus de congestionamento da rede

V.8.3 Sensibilidade do modelo com diferentes valorizações relativas do custo do tempo e da distância percorrida

V.8.3.1 Erros na quantificação dos fluxos de saturação

Consideraram-se 20 modelos de referência, caracterizados por diferentes atitudes de valorização relativa tempo/distância, de $PPP/PPK = 0$ até $PPM/PPK = 10$. Relativamente a cada um dos sistemas representado, realizaram-se 10 corridas em que foram introduzidos erros aleatórios em todos os movimentos de viragem, com $CV = 0,15$, num total de 200 corridas.

Constata-se que o impacto deste tipo de erros de quantificação cresce muito rapidamente com a valorização relativa que os condutores fazem do tempo de trajecto, com tendência para estagnação para as maiores relações tempo / distância (ver a Figura V.41).

Para compreender este comportamento, importa lembrar que os erros de quantificação do fluxo de saturação de um movimento de viragem traduzem-se essencialmente por um maior ou menor tempo de espera. Como tal, em redes onde os condutores valorizem

essencialmente a distância percorrida, este tipo de erros tem um impacto bastante limitado.

Já em redes onde o principal critério de escolha de trajectos é o tempo total de percurso (maiores relações PPM/PPK), a incorrecta quantificação de um fluxo de saturação implica normalmente um processo de reafecção de tráfego, especialmente se esse movimento direccional integrar um de vários trajectos alternativos de custo mínimo entre um ou mais pares O-D, o que normalmente acontece em redes congestionadas. Essa reafecção é, consequentemente, responsável por uma pior indicação de aderência à realidade.

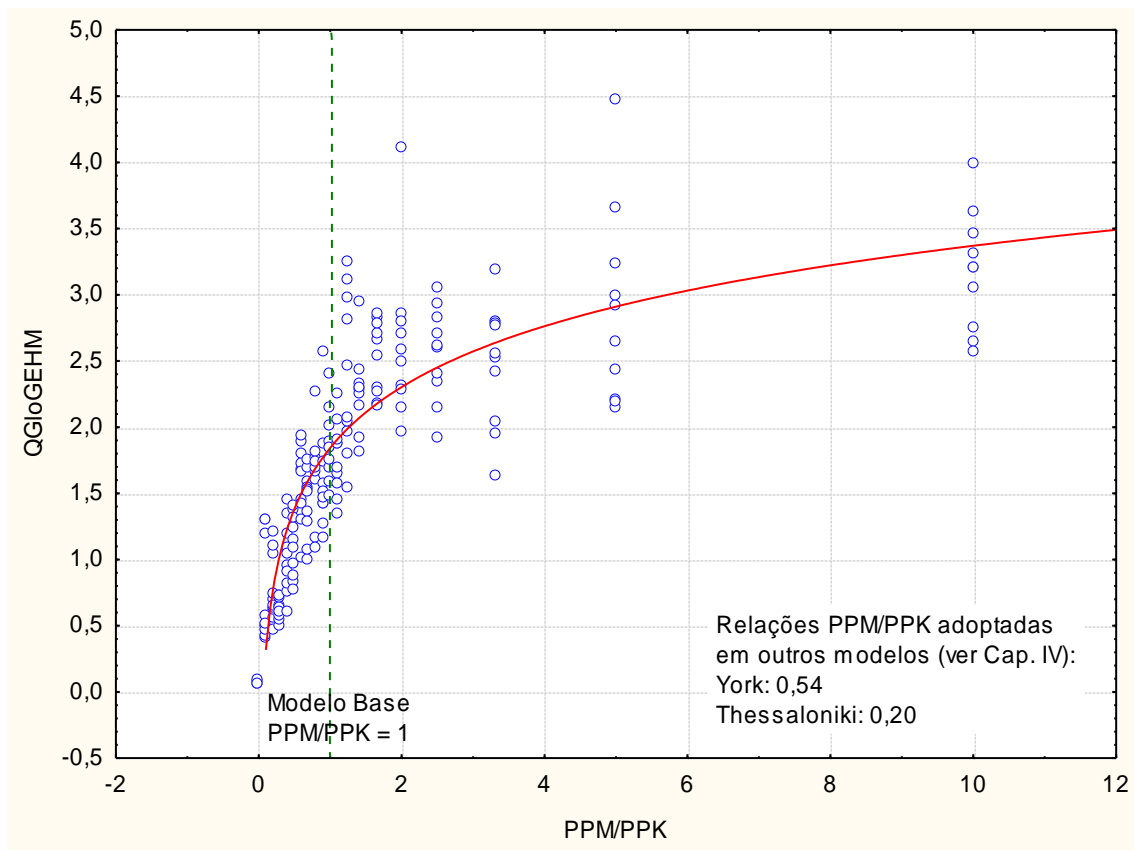


Figura V.41 – Sensibilidade do modelo a erros na quantificação dos fluxos de saturação com diferentes valorizações relativas do custo do tempo e da distância

V.8.3.2 Erros na quantificação da relação PPM/PPK

No ponto V.3.1.2 determinou-se a relação entre os diferentes níveis de precisão da estimativa PPM/PPK e o impacto nos níveis de precisão dos *outputs* do modelo, admitindo que o valor exacto era PPM/PPK = 1.

Pretende-se agora saber até que ponto esses resultados são dependentes do valor de referência. Para tal, simularam-se seis ambientes rodoviários, diferindo entre si exclusivamente na valorização relativa que os condutores fazem do tempo e da distância, através da alteração da relação PPM/PPK no modelo base. Em cada um

desses modelos simularam-se erros de quantificação da própria relação PPM/PPK de diferentes gravidades (-30%, -20%, -10%, +10%, +20%, +10%), cujos impactos globais são representados na Figura V.42.

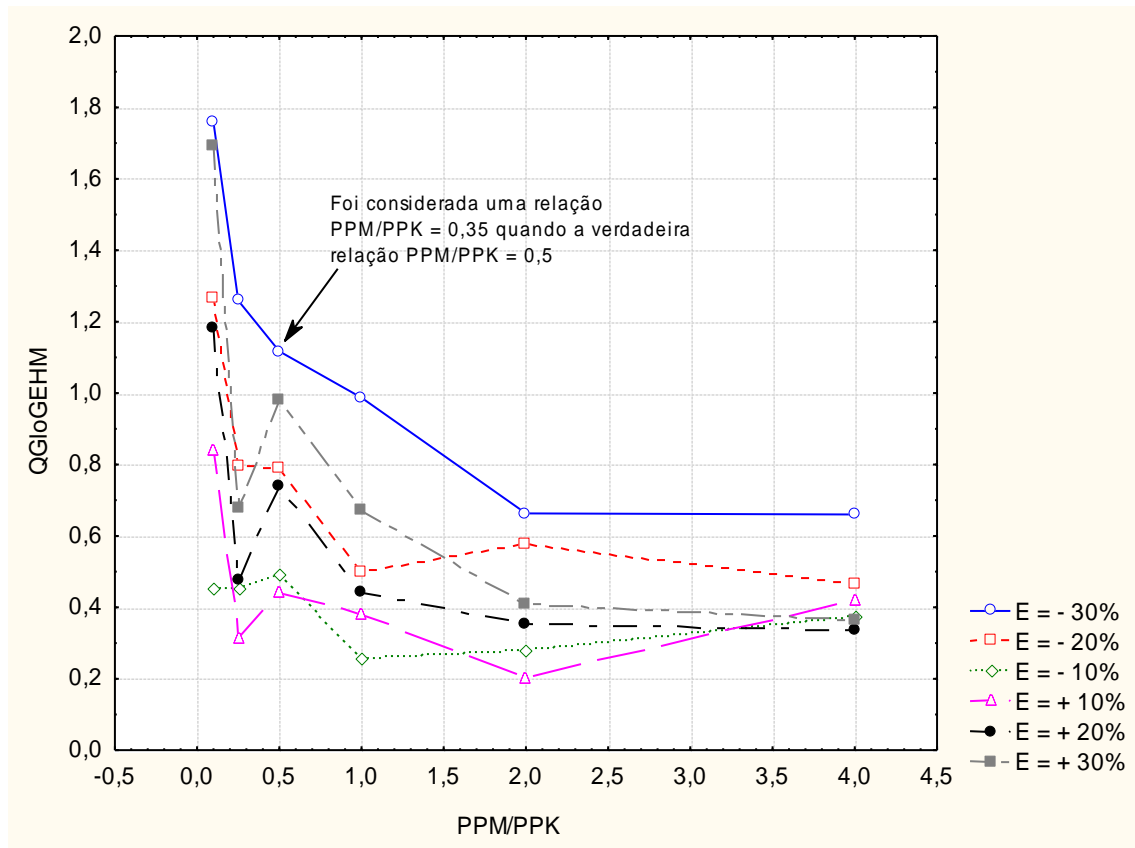


Figura V.42 – Sensibilidade do modelo na estimativa da relação PPM/PPK com diferentes valorizações relativas do custo do tempo e da distância

Verifica-se, também com esta análise, que o ambiente rodoviário condiciona significativamente o impacto dos erros de quantificação. Especificamente, nota-se que o impacto de erros semelhantes na quantificação da relação PPM/PPK diminui à medida que a verdadeira relação aumenta. Tomando como exemplo erros de subestimação de 30%, os impactos globais desse erro são de $QGloGEHM = 0,987$ e $QGloGEHM = 0,663$, quando as “relações exactas” são $PPM/PPP = 1$ e $PPM/PPK = 2$, respectivamente.

V.8.4 Síntese

O impacto dos erros de quantificação na qualidade do modelo aumenta com o grau de carregamento da rede. Isto pode explicar a elevada exigência das recomendações britânicas, uma vez que foram originalmente especificadas para modelos de vias estruturantes inter-urbanas (ver UK DOT, 1996), tipicamente pouco carregadas, logo

mais facilmente validáveis. Importa no entanto ressaltar que estes resultados são muito dependentes da variável testada – fluxos de saturação, uma vez que esta está muito associada ao congestionamento da rede.

Também o modo como os condutores valorizam o tempo perdido e a distância percorrida influi no nível de impacto deste tipo de erros e, conseqüentemente, com a facilidade com que se validam os modelos. Isto sugere que, assumindo que o quociente PPM/PPK está relacionado com o nível de desenvolvimento económico, será tanto mais difícil validar um modelo quanto maior o nível de desenvolvimento da cidade ou região a que respeita.

Já quando se avaliou o impacto resultante de erros na estimativa da relação PPM/PPK foi registada a tendência oposta, o que poria em causa a conclusão anterior. No entanto, é necessário lembrar que esta situação apenas ocorre se a relação PPM/PPK for assumida como uma variável independente tradicional, quantificada através de observações ou sub-modelos, o que não é usual. De facto, mais frequentemente trata-se essa relação como sendo um parâmetro de calibração, ou seja, o seu valor é estimado de forma a minimizar as diferenças entre os valores previstos e observados.

VI CONCLUSÕES

VI.1 Síntese e conclusões gerais

Tal como é referido no Capítulo I, analisou-se, na presente dissertação, o problema da aplicabilidade dos modelos de simulação de tráfego, nomeadamente no que respeita à relação entre os erros resultantes dos processos de recolha de dados e a qualidade dos modelos.

No Capítulo II reviu-se a evolução dos modelos de transportes. Uma série de grandes projectos de planeamento estratégico promoveu, nos anos 60, o desenvolvimento dos “modelos globais”. Mais tarde, a progressiva diminuição do âmbito espacial e temporal das intervenções veio a retirar a dependência das fases de “Geração”, “Distribuição” e “Repartição modal”, colocando a ênfase na fase de “Atribuição/Simulação”. Recentemente, o desenvolvimento dos sistemas inteligentes de tráfego tem promovido a rápida evolução dos modelos microscópicos, mas mantendo os mesoscópicos clara actualidade, pelo que se justifica o seu estudo.

Analisou-se ainda o processo genérico de desenvolvimento dos modelos de simulação, identificando-se nesse processo o papel dos diversos *inputs*: as variáveis independentes, os indicadores do funcionamento do sistema e, indirectamente, dos parâmetros. Dessa análise revelou-se a pertinência de um estudo que permitisse compreender as relações entre os erros cometidos na quantificação dos *inputs* e a qualidade dos modelos.

No Capítulo III apresentaram-se as linhas gerais de uma metodologia que permite, de uma forma controlada, analisar como se repercutem nos *outputs* dos modelos de simulação os erros de quantificação dos diferentes *inputs*.

Após a sistematização dos problemas passíveis de serem analisados com recurso a essa metodologia, analisou-se a problemática da geração/simulação de erros representativos dos processos correntes de quantificação de variáveis. Concluiu-se que as estimativas com base em observações dão lugar a erros que seguem a distribuição Normal, e admitiu-se que, quando as estimativas são produzidas por recurso a sub-modelos, são introduzidos erros sistemáticos, eventualmente acompanhados de uma componente aleatória que também respeita a distribuição Normal. Justificou-se assim a simulação de erros através de técnicas do tipo Monte Carlo.

Tratou-se ainda a questão da quantificação objectiva dos impactos. Concluiu-se que os indicadores do funcionamento do sistema “Fluxo de Tráfego” e “Tempo de Trajecto” são os mais indicados para a tipologia de modelos em causa; analisou-se a

aplicabilidade de diversas medidas estatísticas, destacando-se o interesse daquelas que reflectem tanto as variações absolutas como as relativas e, em particular, da medida GEH; finalmente, da revisão dos critérios de aderência à realidade, elegeram-se as recomendações britânicas como as mais adequadas para monitorizar o desempenho dos modelos.

No Capítulo IV descreveu-se o processo de desenvolvimento de um modelo de simulação de tráfego destinado à experimentação da metodologia genérica descrita no Capítulo III. Esse modelo, COIMBRA-SAT, assente na aplicação informática SATURN, representa o sistema rodoviário da cidade de Coimbra.

O processo de validação, sustentado nas recomendações britânicas, demonstrou que o modelo é inadequado para tomar decisões práticas de planeamento e gestão da rede; acredita-se, contudo, que uma melhor quantificação das velocidades livres, a estimação de viagens não cobertas pelos postos O-D, com o módulo ME2 ou através de inquéritos complementares, e a calibração fina do modelo em algumas intersecções mais sensíveis serão medidas suficientes para produzir uma ferramenta em cujas estimativas se possa confiar para esses fins.

Considerou-se, no entanto, que o modelo era plenamente adequado para testar a metodologia objecto desta investigação, uma vez que para tal bastava que fosse representativo de uma realidade possível e não muito distinta daquela que se tinha servido de referência. O modelo reúne ainda uma série de características, como a dimensão da área de estudo e a diversidade de tipologias de vias e intersecções, que viabilizaram a realização de um conjunto alargado de análises.

Finalmente, no Capítulo V, testou-se a metodologia tendo como base de trabalho o modelo COIMBRA-SAT.

Verificou-se, através de uma análise específica, uma certa inconsistência nos graus de exigência de alguns indicadores de aderência à realidade, constantes das recomendações britânicas. Após se confirmar a correlação de alguns indicadores, foi possível determinar um valor de referência para o indicador QGloGEHM, adoptado para a maioria das análises subsequentes.

Das diversas análises realizadas destacam-se as seguintes conclusões:

- Os graus de validação sugeridos pelas recomendações britânicas são excessivamente exigentes para redes com características comparáveis à rede viária da cidade de Coimbra. A validação do modelo COIMBRA-SAT a este nível seria impraticável;
- Dão-se processos de compensação de erros quando coexistem erros aleatórios puros e erros sistemáticos. O modelo com mais erros não é necessariamente aquele com os piores resultados!

- Algumas zonas do modelo COIMBRA-SAT mostraram-se extremamente sensíveis a pequenas perturbações. A este nível, foi possível identificar tipologias de elementos da rede cuja caracterização deve ser feita com particular cuidado, na medida em que se revelam fulcrais no funcionamento do sistema;
- A concentração de erros numa área específica, por oposição a uma distribuição espacial aleatória, não parece influenciar significativamente o desempenho do modelo;
- O “ambiente rodoviário” condiciona fortemente o impacto dos erros de quantificação; este aumenta com o grau de congestionamento da rede, assim como com a valorização relativa, por parte dos condutores, do custo do tempo e da distância.

VI.2 Desenvolvimentos futuros do estudo

No decorrer desta investigação surgiram algumas questões que, de alguma forma, condicionaram negativamente os resultados obtidos. Especificamente, consideram-se relevantes os seguintes tópicos ou acções:

- Melhorar o algoritmo de geração de erros, de forma a eliminar-se a limitação quando são introduzidos erros de subestimação nas rotundas;
- Investigar os efeitos de degradação de erros com recurso a medidas eventualmente mais eficientes de afastamento, como a distância real ou o tempo de trajecto.

Tendo em consideração o âmbito da investigação, não se sentiu necessidade de analisar/aprofundar todos os tipos de problemas identificados. O desenvolvimento do estudo passa assim por:

- Realizar um conjunto de análises que não foram desenvolvidas no presente trabalho, nomeadamente a investigação de efeitos de potenciação / compensação de impactos quando são cometidos erros em duas ou mais variáveis simultaneamente, e a avaliação da importância da estrutura da rede na sensibilidade do modelo;
- Desenvolver um conjunto de análises específicas sobre o impacto de erros na matriz origem-destino, uma vez que as análises tratadas neste trabalho incidiram essencialmente sobre erros de quantificação das características funcionais da rede;
- Investigar a replicabilidade dos resultados obtidos e, em particular, os efeitos de variação “dura” dos padrões de fluxos, recorrendo a diferentes matrizes origem-destino e/ou outras redes;

Finalmente, interessaria estabelecer uma metodologia com vista à integração dos resultados decorrentes da presente investigação num processo mais geral, que, tomando como *inputs* os custos de quantificação das diversas variáveis, permita especificar os níveis de precisão a adoptar (número de observações / rigor dos submodelos) que optimizam a relação custo/benefício para o nível de validação pretendido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrahamsson, T. (1998): “Estimation of Origin-Destination Matrices Using Traffic Counts – A Literature Survey”. International Institute for Applied Systems Analysis – Interim Report (<http://www.iiasa.ac.at/Publications/Documents/IR-98-021.pdf>)
- Alfa, A. (1989): “Departure rate and route assignment of commuter traffic during peak period”. *Transpn. Res.*, 23B pp.337-344
- Aycin, M.F. e R.F. Benekohal (1998): “Linear acceleration car-following model development and validation”. *Transportation Research Record*, 1644, 10-19.
- Aycin, M.F. e R.F. Benekohal (1999): “Comparison of car-following models for simulation”. *Transportation Research Record*, 1678, 116-127.
- Balci, O. e Sargent, R. (1981): “A methodology for cost-risk analyses in the statistical validation of simulation models” *Communications of assoc. comput. Mach.*, 24. pp 190-197.
- Ban, X., Liu, H., Yang, F. e Ran, B. (2002) "Experimental Study on the Sensitivity Analysis for Dynamic Traffic Assignment". Center for Traffic Simulation Studies. Paper. UCI-ITS-TS-WP-02-14. (<http://repositories.cdlib.org/itsirvine/ctss/UCI-ITS-TS-WP-02-14>)
- Barceló, J. e Casas, J. (2002): “Dynamic network simulation with AIMSUN“ International Symposium on Transport Simulation, Yokohama, August, 2002 (www.aimsun.com/Yokohama_revised.pdf)
- Barton-Aschman Associates, Inc. e Cambridge Systematics, Inc. (1997) Model validation and reasonableness checking manual. FHWA. (<http://tmip.fhwa.dot.gov/clearinghouse/docs/mvrcm/finalval.pdf>)
- Bates, J. (2000): “History of demand modelling”, in *Handbook of Transport Modelling* (Ed. Hensher, D. e Button, K.), Pergamon.
- Benekohal, R.F. e J. Treiterer (1988): “CARSIM: car-following model for simulation of traffic in normal and stop-and-go conditions”. *Transportation Research Record*, 1194, 99-111.
- Body, D. (1992): *A SATURN user guide – a few thoughts*. Cambridgeshire County Council.
- Braess, D. (1969): Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung *Unternehmensforschung* 12, 258-268
- Bureau of Public Roads (1964), *Traffic Assignment Manual*, US Department of Commerce, Washington DC

Burrell, J.E. (1968): “Multiple road assignment and its application to capacity restraint”, *Proceedings of the 4th International Symposium on the theory of traffic flow*, Strassenbahn and Strassenverkehrslechnick, 86.

Cantarella, G. e Sforza, A. (1991): “Traffic assignment”. *Concise Encyclopedia of traffic and transportation systems*, Ed. M. Papageorgiou, Pergamon Press.

Chin, S. (1991): “Simulation programs, microscopic”. *Concise Encyclopedia of traffic and transportation systems*, Ed. M. Papageorgiou, Pergamon Press.

Clark, S. e Watling, D. (2002): “Applications of sensitivity analyses for probit stochastic network equilibrium”. Institute for Transportation Studies, University of Leeds, UK (documento não publicado)

Dafermos, S., Nagurney, A. (1984): “Sensitivity Analysis for the Asymmetric Network Equilibrium Problem”. *Mathematical Programming*, 28(1984), 174-184.

Dial, R.B. (1971): “A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates multipath enumeration”, *Transpn. Res.*, 5.

Fairley, R. (1976): “Dynamic testing of simulation software”. Proceeding of the 1976 Summer Computer Simulation Conf., Washington, D.C., 40-46

Fishman, G. e Kiviat, P. (1968): “The statistics of discrete-event simulation”. *Simulation*, 10. pp. 185-195.

Fox, K. Clark, S., Boddy, R., Montgomery, F. E Bell, M. (1998): “Some benefits of a SCOOT UTC system: An independent assessment by micro-simulation”. *Traffic Engineering + Control*, Setembro.

Freund e Simon, 2000 *Estatística Aplicada* (9.^a edição) Bookman.

Hall, D., Van Vliet, D. e Willumnsen, L. (1980): “SATURN – a simulation-assignment model for the evaluation of traffic management schemes”. *Traffic Engineering + Control*, Abril

Herman, R. Montroll, E., Potts, R. Rothery, R. (1959): “Traffic dynamics: analyses of stability in car-following”. *Oper. Res.* 7, 86-106.

HMSO (1987) *Roads and traffic in urban areas*. Produced by the Institution of Highways and Transportation with the Department of Transport, 1987. HMSO, London.

Hossain, M. e M. McDonald (1998): “Modelling the impacts of reducing non-motorised traffic in urban corridors of developing cities”. *Transportation Research - Part A*, 32(4), 247-260.

Ismart, D. (1990) *Calibrating and adjustment of system planning models*. FHWA. (<http://ntl.bts.gov/DOCS/377CAS.html>)

Kaman Sciences Corporation (1996): “A compendium of traffic model validation documentation and recommendations”. FHWA – US Department of Transportation. (http://www.itsdocs.fhwa.dot.gov/JPODOCS/REPTS_TE/30401!.PDF)

- Kimber, R. (1980) *The traffic capacity of roundabouts*. TRRL Laboratory report LR 942. Crowthorne, England: Transport and Road Research Laboratory.
- Law, A.M. e W.D. Kelton (2000) *Simulation Modeling and Analysis*. 3rd ed. McGraw-Hill, Boston, EUA.
- Leonard, D., Tough, J. e Baguley, P. (1978): “CONTRAM: a traffic assignment model for predicting flows and queues during peak periods”. *Laboratory Report LR841*. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.
- Lo, H., Lin, W., Liao, L., Chang, E. e Tsao, J. (1996): “A comparison of traffic models: Part 1, Framework”. California PATH Research Report (<http://www.informs-cs.org/wsc98papers/147.PDF>)
- Martin, I. e Douglas, J. (1983) *The roadway assignment comparison program*, RDSTRC, PTRC, 11th Summer Annual Meeting, Transportation Methods, pp. 93-100.
- May, A., Phiu-Nual, F. Montgomery, F. Paksarsawan, S. e Van Vuren. T. (1993): “Application of SATURN in Bangkok”. *Traffic Engineering + Control*, Janeiro.
- McSheen, J.R. e Hale, R.C. (1989): “Traffic modelling in Kuwait – 1. Development of a SATURN network database”. *Traffic Engineering + Control*, Outubro.
- Middleton, M. e Cooner, S. (1999): “Evaluation of simulation models for congested Dallas freeways”. Report 3943-1; Project Number 7-3943. Texas Transportation Institute (<http://tti.tamu.edu/product/catalog/reports/3943-1.pdf>)
- Ortúzar, J. e Willumsen, L. (1990): *Modelling Transport*, Ed. John Wiley & Sons.
- Papageorgiou, M., Blosseville, J, Haj-Salem, H. (1990): “Modelling and real-time control of traffic flow on the southern part of Boulevard Péripherique in Paris – Part I: Modelling”. *Transportation Research* 24 A, pp. 345-359
- Pipes, A. (1953) “An operational analyses of traffic dynamics”. *J. Appl. Phys.* 274-81.
- Reuschel, R. (1950) “Fahrzeugbewegungen in der Kolonne bei gleichförmig beschleunigten oder verzögertem Leitfahrzeug”. *Z. Osterr. Ing. Arch. Ver.* 95.
- Robertson, D (1974): “Cyclical flow profiles”. *Traffic Engineering + Control*, 15.
- Robertson, D (1997): “The TRANSYT method of co-ordinating traffic signals”. *Traffic Engineering + Control*, Fevereiro.
- Rodrigues, J. (1996): *Aplicações da teoria de sistemas*. Ediliber editora. Coimbra.
- Sargent, R. (2000): “Verification validation, and accreditation of simulation models”. *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*. J. A. Joines, R. R. Barton, K. Kang, and P. A. Fishwick, eds. (<http://www.informs-cs.org/wsc00papers/009.PDF>)
- Seco, A., Costa, A., e Tavares, J. (1997): “Desenvolvimento de novas estratégias de gestão de redes rodoviárias urbanas utilizando os sistemas semaforizados de controlo de

tráfego”. *Contribuições para o desenvolvimento da Cidade*. Ed. António Pais Antunes. FCTUC.

Seco, A., Pinto, N. (2003): “Relatório de execução da matriz origem-destino de Coimbra”. Organização do Sistema de Transportes de Coimbra – 2.ª fase do Projecto. Departamento de Engenharia Civil da FCTUC

Silva, P e Tyler, N. (2001): “Sobre a Validação de Modelos Microscópicos de Simulação de Tráfego”. Artigo apresentado no XV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET). Campinas, Brasil, Novembro 2001

SMARTTEST consortium (1999): Project deliverable D8 (<http://www.its.leeds.ac.uk/projects/smartest/>)

Smith, M. J. (1984): “The stability of a Dynamic Model of Traffic Assignment – An Application of a Method of Lyapunov”. *Transportation Science*, Vol. 18, No.3, 1984. 245-252.

Theil (1971). *Principles of Econometrics*. John Wiley and Sons, New York, and North-Holland Publishing Company, Amsterdam.

Thomas, R. (1991): *Traffic assignment techniques*, Ed. Avebury Technical

Tobin, R. L. (1986): “Sensitivity Analysis for Variational Inequalities”. *Journal of Optimization Theory and Applications*. Vol.48, No.1, 1986, 191-204.

TRB - Transportation Research Board (2000): *Highway Capacity Manual – HCM 2000*. Washington, D.C..

TRIAS (1996): “Thessaloniki demonstration site” *Work Package 1 – Final Report*. Projecto comunitário MUSIC.

UK DOT - Department of Transport (1991): “The application of traffic appraisal to trunk roads schemes”. *Design Manual for Roads and Bridges*, Volume 12, Secção 1, Part 1. HMSO. (<http://www.official-documents.co.uk/document/deps/ha/dmr/vol12/sect1/12s1p1a.pdf>)

UK DOT - Department of Transport (1993): “Geometric design of roundabouts”. *TD 16/93*. (<http://www.official-documents.co.uk/document/deps/ha/dmr/vol6/section2/td1693a.pdf>)

UK DOT - Department of Transport (1996): “Traffic appraisal in urban areas”. *Design Manual for Roads and Bridges*, Volume 12, Secção 2, Part 1. HMSO. (www.official-documents.co.uk/document/deps/ha/dmr/vol12/sect2/12s2p1a.pdf)

UK DOT - Department of Transport (2002): “Speeds on links”. *Design Manual for Roads and Bridges*, Volume 13, Secção 1, Part 5. HMSO. (http://www.dft.gov.uk/stellent/groups/dft_transstrat/documents/page/dft_transstrat_504876.pdf)

Van Vliet, D. (1982): “SATURN – A modern assignment model”. *Traffic Engineering + Control*, Dezembro.

- Van Vliet, D. e Dow, P. (1979): “Capacity-restrained road assignment”. *Traffic Engineering + Control*, Junho
- Van Vliet, D. e Hall, M. (1997): *SATURN 9.3 User Manual*. (<http://www.its.leeds.ac.uk/software/saturn/documents.php>)
- Van Vuren, T. (1996): “SATURN verification guidelines”. *Work Package 1 – Final Report*. Projecto comunitário MUSIC.
- Van Zuylen e Willumsen, L. (1980): “The most likely trip matrix estimated from traffic counts”. *Transportation Research* 14B.
- Viegas, J. M. (2000): “A utilização de modelos matemáticos para a estimação da procura de transportes”. IST – CESUR http://cesur.civil.ist.utl.pt/~sgvct/lic/Transportes/download_docs/Modproc.pdf.
- Vythoulkas, p. (1988): “Comparison of dynamic and static stochastic traffic assignment over a simple network”. Universities transport Studies Group Conf., university College, London.
- Wardrop, J.G. (1952): “Some theoretical aspects of road traffic research”. *Proceeding of the Institution of Civil Engineers*, Part 2, 1.
- White, C., Emmerson, P. e Gordon, A. (1995): “Assignment-based techniques for modelling traffic growth in urban áreas”. *Traffic Engineering + Control*, Outubro.
- Willoughby, P e Emmerson, P. (1999): “Network interaction – A review of existing modelling techniques”. *Traffic Engineering + Control*, Fevereiro.
- Willumsen, L.G. (2000): “Travel networks” in *Handbook of Transport Modelling* (Ed. Hensher, D. e Button, K.), Pergamon.
- Yanaguaya, W. (1994): “The conversion of standard speed-flow curves into flow-delay relationships for use in SATURN”. *Traffic Engineering + Control*, Junho.
- Yang, Q (1997) “A Simulation Laboratory for Evaluation of Dynamic Traffic Management Systems” PhD Thesis. Massachusetts Institute of Technology.
- York City Council (1996): “Calibration and validation of York SATURN traffic model” *Work Package 1 – Final Report*. Projecto comunitário MUSIC.

ANEXOS

- **A-1** MODELO COIMBRA-SAT: ÁREA DE ESTUDO
- **A-2** MODELO COIMBRA-SAT: ESTRUTURA DA REDE
- **B** MODELO COIMBRA-SAT: MATRIZ ORIGEM-DESTINO
- **C** FICHA DE TRABALHO [ANÁLISE V.3.2]
- **D** ERROS ALEATÓRIOS NA QUANTIFICAÇÃO DAS
VELOCIDADES: IMPACTO NOS TEMPOS DE TRAJECTO

ANEXO A-1

MODELO COIMBRA-SAT: ÁREA DE ESTUDO

ANEXO A-2

MODELO COIMBRA-SAT: ESTRUTURA DA REDE

ANEXO B

MODELO COIMBRA-SAT: MATRIZ ORIGEM-DESTINO

ANEXO C

FICHA DE TRABALHO [ANÁLISE V.3.2]

ANEXO D

**ERROS ALEATÓRIOS NA QUANTIFICAÇÃO DAS VELOCIDADES: IMPACTO
NOS TEMPOS DE TRAJECTO**

FICHA DE TRABALHO – [ANÁLISE V.3.2]

“Avaliação do impacto no desempenho global do modelo de erros aleatórios na quantificação das velocidades de todos os arcos da zona de simulação”

Variável independente

Rede de simulação				Rede de atribuição				Aplicação global		
Q _{S,SIM} [uve/h]	V [km/h]	Q _{S,R} [uve/h]	GAPR [s]	V _L [km/h]	V _C [km/h]	Q _{S,ATR} [uve/h]	n -	GAPM [s]	GAP [s]	PPM/PPK -
•										

Âmbito de aplicação de erros e quantidade de casos

Pontual	Com centro num nó		Zona	Global	N.º casos
	Distância	Conectividade			
				•	100% (934)

Tipologia de desvios

Sistemáticos	Aleatórios		
	Dist. normal	Dist. uniforme	Número de extracções
--	Coeficiente de variação [0,00 ; 0,30] Incremento 0,02	--	20

Indicadores de aderência à realidade

Fluxos de tráfego					Tempos
Movimentos de viragem	Arcos	Arcos e movimentos de viragem			Percursos
QMovOP25	QArcOP15	QGloGEHM	QGloP85	QGloGEH85	VR
•	•	•	•	•	•

Âmbito de avaliação de erros e quantidade de casos

Pontual	Com centro num nó		Zona	Global	N.º casos
	Distância	Conectividade			
				•	100%

R Rede
 OD Matriz origem – destino
 RF modelo de referência
 ER modelo com erros
 [Q_A] fluxos horários nos arcos
 [Q_S] fluxos de saturação nos movimentos de viragem da zona de simulação
'amplitude (coeficiente de variação máximo) e incremento dos erros aleatórios
 AMP = 0,30
 IN = 0,02
 {CV} ← {0,00 ; 1·IN ; 2·IN ; ... ; AMP}

'índice das iterações necessárias para mitigar aleatoridade
 I = 20

{i} ← {1 ; 2 ; ... ; I}

'variável independente: velocidades na zona de simulação do modelo de referência (extraídas do ficheiro de dados da rede)

[V]_{RF} = ∅ [R_{RF}]

'variáveis dependentes: fluxos e tempos do modelo de referência (conhecidas após a corrida do SATURN com a rede e a matriz de referência)

[Q]_{RF} = ∅ [SATURN (R_{RF} ; OD_{RF})]

[T]_{RF} = ∅ [SATURN (R_{RF} ; OD_{RF})]

para cada CV ∈ {CV} **fazer**

para cada i ∈ {i} **fazer**

para cada V ∈ [V]_{RF} **fazer**

V ← aleatório [Normal (μ = V ; σ = CV·V·100)]

fim para V

'novo ficheiro de dados da rede

R_{ER} = ∅ [V]

'executar SATURN com a nova rede, ler variáveis dependentes: fluxos e tempos

[Q]_{ER} = ∅ [SATURN (R_{ER} ; OD_{RF})]

[T]_{ER} = ∅ [SATURN (R_{ER} ; OD_{RF})]

'módulo de cálculo de erros

CALCULAR ERROS

fim para i

fim para CV

CALCULAR ERROS

'comparação entre fluxos

ler [Q]_{ER} e [Q]_{RF}

QArcOP15 ← ordem percentual [arcos com variação inferior a 15% ou 100 uve/h]

QArcOP25 ← ordem percentual [movimentos de viragem com variação inferior a 25% ou 100 uve/h]

QGloGEHM ← média [GEH de todos os arcos e movimentos de viragem]

QGloP85 ← percentil 85 [GEH de todos os arcos e movimentos de viragem]

QGloGEH85 ← média 85% melhores comparações [GEH de todos os arcos e movimentos de viragem]

'comparação entre tempos

ler [T]_{ER} e [T]_{RF}

para cada i *'percurso*

TP_i ← soma [tempos nos arcos e movimentos de viragem que integram o percurso i]

VR_i ← variação relativa [TP_{i,ER} ; TP_{i,RF}]

fim para i

Erros aleatórios na quantificação das velocidades: impacto nos tempos de trajeto

Velocidades após a introdução do erro e sobre a velocidade base V_0 , por defeito e por excesso:

$$V_1 = V_0(1-e) \quad V_2 = V_0(1+e)$$

Tempos de trajeto correspondentes à velocidade base e às velocidades que resultam da introdução do erro, num percurso de extensão l

$$T_0 = \frac{l}{V_0}$$
$$T_1 = \frac{l}{V_0(1-e)} \quad T_2 = \frac{l}{V_0(1+e)}$$

Erros relativos nos tempos de trajeto resultantes da aplicação do erro e , por defeito e por excesso

$$E_D = \frac{e}{1-e} \quad E_E = -\frac{e}{1+e}$$

Erro médio

$$E_M = \frac{e^2}{1-e^2}$$

