

AVALIAÇÃO DE MODELOS DE AFETAÇÃO DE TRÁFEGO

EDUARDO JOSÉ CERQUEIRA SILVA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — PLANEAMENTO DO TERRITÓRIO E TRANSPORTES

Orientador: Professor Doutor José Pedro Maia Pimentel Tavares

JULHO DE 2022

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2021/2022

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ mec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2021/2022 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha avó

“The beginning is always today”

Mary Wollstonecraft Shelley

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, Professor Doutor José Pedro Maia Pimentel Tavares, pela sua prestável orientação, pela sua constante disponibilidade, ajuda e paciência ao longo do desenvolvimento da dissertação. Uma palavra de apreço também por despertar em mim o interesse pela especialização em Vias de Comunicação.

Aos meus amigos, que me acompanham desde o primeiro dia deste longo percurso, obrigado por toda a ajuda, companhia e principalmente pelas memórias que guardarei para o resto da minha vida.

Um especial agradecimento ao Diogo, Francisco, João, Luís, Miguel, Sara, e Pedro, por terem tornado esta etapa memorável, que amizade se mantenha.

À Tânia, por ser uma base de apoio incansável, pela amizade, conselhos e carinho incansável ao qual agradeço do fundo do coração.

À Mariana Bastos, por me acompanhar em todos os desafios e momentos, sejam eles bons ou maus. Obrigado por seres o meu pilar, sem ti não era a mesma coisa.

Acima de tudo agradeço aos meus pais e ao meu irmão, por me possibilitarem esta incrível oportunidade, pela compreensão, carinho e todo o sacrifício, ao qual estarei eternamente grato. Obrigado por me darem asas para voar.

RESUMO

O tema da dissertação é referente à avaliação dos modelos de afetação de tráfego. Esta dissertação recai na temática da modelação macroscópica, particularmente, no estudo do último passo do modelo clássico de transportes usualmente denominado por Modelo de Quatro Passos.

São apresentados e genericamente descritos os três primeiros passos do modelo de transportes, que servem de base e criam os elementos necessários para a aplicação dos modelos de afetação, que têm, posteriormente uma abordagem mais aprofundada. São referidos alguns princípios subjacentes aos modelos, vários parâmetros a ter em conta, como também é esclarecido o funcionamento dos métodos de afetação gerais existentes.

De seguida, é introduzido o programa de modelação utilizado, o *PTV VISUM*, onde são apresentadas as redes rodoviárias, necessárias para a aplicação dos modelos. São apresentados os parâmetros inseridos como dados de entrada, que são calibrados de modo a representarem condições semelhantes, de modo a ser possível identificar os seus diferentes processos de atribuição. São também nomeados os modelos que irão ser aplicados, disponíveis no *VISUM* e, sucintamente, explicado o funcionamento dos seus algoritmos.

Foi definido um conjunto de variáveis para agirem como indicadores de desempenho de modo a auxiliar o processo de avaliação dos modelos. Estas variáveis são calculadas pelo programa *VISUM* e são propriedades das correntes de tráfego resultantes dos modelos.

Depois de explicado o desenvolvimento do programa, são apresentadas as duas redes viárias que irão ser utilizadas no processo de afetação de correntes de tráfego.

Por fim, são analisados os valores dos indicadores dos modelos, em cada rede de estudo, e comparados entre si, como também comparados com valores esperados. São apresentadas, então, conclusões quanto a esta avaliação dos modelos de afetação.

PALAVRAS-CHAVE: correntes de tráfego, modelação macroscópica, modelos de afetação, rede rodoviária, *VISUM*.

ABSTRACT

The topic of the dissertation is related to the evaluation of traffic assignment models. This dissertation focuses on the topic of macroscopic modelling, particularly on the study of the last step of the classical transportation model, namely the “4-Step Model”.

The first three steps of the transportation model are presented and generally described, which serve as basis and creates the necessary elements for the application of the assignment models, which have a more in-depth approach at a later stage. Some principles underlying the models are mentioned, as well as several parameters to be considered, and the procedure of the general assignment methods is clarified.

Next, the modelling software used in this work, PTV VISUM, is introduced and the process of developing a road network, necessary for the application of the models, is explained. The input parameters are presented, which are calibrated to present the same values and present the same conditions, to observe their different functioning. The models that will be applied, available in VISUM, are also named and the functioning of their algorithms briefly described.

A set of variables was defined to act as performance indicators, to assist the process of performance evaluation of the models. These variables are computed by VISUM and are related to the traffic flows assigned to the network, by the models.

After explaining the development of the program, the two road networks that will be used in the assignment process of traffic flows are presented.

Finally, the values of the models' indicators, in each study network, are analysed and compared among themselves, as well as compared to expected values. Conclusions are then presented regarding this subjective evaluation of the assignment models.

KEYWORDS: traffic flows, macroscopic modelling, assignment models, road network, VISUM.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	1
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2 MODELOS DE AFETAÇÃO	5
2.1. ENQUADRAMENTO	5
2.1.1. GERAÇÃO DE VIAGENS	7
2.1.2. DISTRIBUIÇÃO DE VIAGENS	8
2.1.3. ESCOLHA MODAL	10
2.2. MODELOS DE AFETAÇÃO	10
2.2.1. PRINCÍPIOS DE AFETAÇÃO	10
2.2.2. CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS DE AFETAÇÃO	15
2.2.2.1. Estáticos ou dinâmicos	15
2.2.2.2. Simulação ou analíticos	15
2.2.2.3. Microscópicos, mesoscópicos e macroscópicos	16
2.2.2.4. Com e sem restrições de capacidade	17
2.2.2.5. Determinísticos e estocásticos	18
2.2.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MÉTODOS DE AFETAÇÃO	18
2.2.3.1. Tudo-ou-nada	18
2.2.3.2. Incremental	19
2.2.3.3. Estocástico puro	20
2.2.3.4. Equilíbrio do sistema	22
2.2.3.5. Equilíbrio determinístico do utilizador	23
2.2.3.6. Equilíbrio estocástico	24
2.2.3.7. Métodos dinâmicos	24
3 CONSTRUÇÃO DO MODELO EM VISUM	27
3.1. INTRODUÇÃO AO SOFTWARE VISUM	27
3.2. MODELAÇÃO DE UMA REDE VIÁRIA DE TRANSPORTES	27
3.3. VARIÁVEIS E PARÂMETROS	29

3.3.1. TEMPO DE PERCURSO	29
3.3.2. CUSTO GENERALIZADO / IMPEDÂNCIA	33
3.4. MODELOS DE AFETAÇÃO	35
3.4.1. MODELO INCREMENTAL	35
3.4.2. MODELO DE EQUILÍBRIO	37
3.4.3. MODELO ESTOCÁSTICO	37
3.4.4. MODELO DE EQUILÍBRIO <i>LOHSE</i>	39
3.4.5. MODELO BI-CONJUGAÇÃO DE <i>FRANK WOLFE</i>	41
3.4.6. MODELO DE EQUILÍBRIO <i>LUCE</i>	42
3.4.7. MODELO <i>ICA</i>	42
3.4.8. MODELOS DINÂMICOS.....	44
3.4.8.1. Modelo dinâmico do equilíbrio do utilizador	45
3.4.8.2. Modelo dinâmico estocástico	46
3.4.8.3. Modelo dinâmico baseado na simulação	46
4 CASOS DE ESTUDO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	47
4.1. PREÂMBULO	47
4.2. CENÁRIO 1 – REDE FICTÍCIA	47
4.3. CENÁRIO 2 – REDE ASPRELA	50
4.4. CARACTERIZAÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO	53
4.5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	54
4.5.1. ANÁLISE DE ARCOS	54
4.5.1.1. Cenário 1 – Rede fictícia	54
4.5.1.2. Cenário 2 – Rede Asprela	56
4.5.2. ANÁLISE DE PERCURSOS	59
4.5.2.1. Cenário 1 – Rede fictícia	59
4.5.2.2. Cenário 2 - Rede Asprela.....	63
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	65
5.1. CONCLUSÕES GERAIS	65
5.2. TRABALHOS FUTUROS.....	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
ANEXOS	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação esquemática do modelo quatro-passos. Adaptado de (Tsekeris & Tsekeris, 2011).....	6
Figura 2.2 - Representação esquemática da rede de transportes. Fonte: (Duarte, 2013)	7
Figura 2.3 - Atração e produção de viagens. Adaptado de: (Ortúzar & Willumsen, 2011)	7
Figura 2.4 – Exemplo de uma rede com três percursos	11
Figura 2.5 – Efeito de congestionamento (<i>Circula Seguro</i> , 2022)	14
Figura 2.6 – Diferenciação esquemática quanto ao nível de detalhe dos modelos. Fonte: (Poudyal et al., 2020).....	16
Figura 2.7 - Diagrama fundamental da Engenharia de tráfego.....	17
Figura 2.8 - Atribuição “tudo-ou-nada”. Adaptado de (Cascetta, 2001).....	19
Figura 2.9 – Exemplo de distribuição dos custos generalizados percebidos. Fonte: (Tavares, 2003)	21
Figura 2.10 - Atribuição estocástica. Adaptado de (Cascetta, 2001).....	22
Figura 3.1 - Representação de zonas internas e externas no VISUM.....	28
Figura 3.2 – Comparação entre modelos na estimação de tempos de percurso. Fonte: (Davis & Xiong, 2007)	30
Figura 3.3 - Cenário 1	31
Figura 3.4 - Cenário 2	32
Figura 3.5 - Cenário 3	32
Figura 3.6 - Exemplo de duas situações de percurso distintas	34
Figura 3.7 - Parâmetro impedância no <i>VISUM</i>	35
Figura 3.8 - Algoritmo do modelo incremental	36
Figura 3.9 - Algoritmo do modelo de equilíbrio <i>Lohse</i>	40
Figura 3.10 - Algoritmo de funcionamento do modelo bi-conjugado <i>Frank-Wolfe</i>	41
Figura 3.11 - Equilíbrio do utilizador com custo linear. Fonte: (Gentile, 2014)	42
Figura 3.12 - Tipos de controlo de tráfego em interseções no VISUM	43
Figura 3.13 - Parâmetro referente à variável tempo do VISUM.....	44
Figura 3.14 - Diagrama fundamental trapezoidal. Adaptado de: (<i>PTV Visum Manual</i> , 2020)....	45
Figura 4.1 - Representação no VISUM da rede fictícia.	48
Figura 4.2 – Controlo de tráfego na zona fictícia.	48
Figura 4.3 - Esquemática dos percursos existentes na rede	49
Figura 4.4 - Representação da malha viária da rede <i>Asprela</i> no VISUM.....	50
Figura 4.5 - Controlo de interseções na rede <i>Asprela</i>	51
Figura 4.6 - Percurso 1.....	52

Figura 4.7 - Percurso 2.....	52
Figura 4.8 - Percurso 3.....	52
Figura 4.9 - Representação gráfica da afetação do modelo de equilíbrio na rede fictícia	54
Figura 4.10 - Repartição do tráfego entre as zonas X e Y.....	59
Figura 4.11 - Percurso pelo eixo urbano com destino nas Populações E e F	60
Figura 4.12 - Percurso pela variante com destino nas populações E e F	61
Figura 4.13 - Repartição do tráfego na rede fictícia a partir de modelos dinâmicos	62
Figura 4.14 - Repartição do tráfego na rede Asprela a partir dos modelos estáticos.....	63
Figura 4.15 - Repartição do tráfego na rede Asprela a partir dos modelos dinâmicos.....	64

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Exemplo de matriz O/D	8
Tabela 2.2 - Categorização dos modelos determinísticos e estocásticos. Adaptado de (Ortúzar & Willumsen, 2011)	18
Tabela 3.1 - Velocidades em congestionamento para os valores do parâmetro "a"	33
Tabela 3.2 - Exemplos de aplicação de modelos de distribuição. Adaptado: (<i>PTV Visum Manual</i> , 2020)	39
Tabela 4.1 - Matriz O/D da rede fictícia	49
Tabela 4.2 - Caracterização dos percursos da rede fictícia	50
Tabela 4.3 - Caracterização dos percursos entre as Zonas Exteriores 13 e 15	53
Tabela 4.4 - Resultados dos modelos estáticos na rede fictícia	55
Tabela 4.5 - Resultados dos modelos dinâmicos na rede fictícia	56
Tabela 4.6 - Resultados dos modelos estáticos na rede Asprela	57
Tabela 4.7 - Resultados dos modelos dinâmicos na rede Asprela	58
Tabela 4.8 - Características dos percursos e atribuição dos volumes	61
Tabela 4.9 - Diferenciação número de percursos DUE	64

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

DS – *Dynamic Stochastic*

DTA - *Dynamic Traffic Assignment*

DUE – *Dynamic User Equilibrium*

ICA – *Intersection Capacity Analysis*

LUCE – *Linear User Cost Equilibrium*

MSA – *Method of Successive Averages*

O/D – *Origem/destino*

SBA - *Simulation-Based dynamic Assignment*

SO – *System Optimal*

UE – *User Equilibrium*

1 INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

As sociedades modernas têm demonstrado uma crescente procura no transporte rodoviário, seja de pessoas, seja de mercadorias, sobrecarregando a infraestrutura rodoviária. Toda e qualquer infraestrutura de transporte requer elevados investimentos económicos, ambientais e sociais na sua conceção, retificação ou manutenção. Na grande maioria dos casos são investimentos a longo prazo que acarretam consequências negativas, caso o seu planeamento seja mal-executado e o seu projeto não cumpra os objetivos.

A correta previsão desta procura, a curto, médio e a longo prazo, e a complementaridade entre os modos de transporte são dados essenciais para o planeamento, conceção, avaliação e regulação dos modos de transporte e cadeias de abastecimento.

Além disso, este estudo de previsão da procura de transporte pode apoiar a divulgação e o planeamento estratégico das empresas de variados modos de transporte, bem como dissociar o crescimento económico e a elevada saturação do transporte individual.

De facto, é notório que o transporte individual é o principal meio de transporte que origina uma maior influência no congestionamento das vias das redes rodoviárias. Sendo assim, pela existência de um grande número de agentes decisores no trajeto do veículo e com uma maior liberdade na escolha dos caminhos, ao contrário do que acontece no transporte público, em que há apenas um agente decisor num veículo que transporta uma quantidade maior de passageiros. Assim, no contexto da dissertação, apenas o transporte individual vai ser analisado.

Assim, a otimização do fluxo de tráfego em áreas urbanas é um dos maiores desafios que os sistemas e os engenheiros de transportes enfrentam. A dificuldade de construir novas infraestruturas conduz os cientistas e engenheiros ao desenvolvimento de modelos e métodos que visam a redução dos fenómenos de congestionamento. Para além disso, os avanços na tecnologia e a adoção de dispositivos eletrónicos pessoais em praticamente todo o mundo permite que seja possível influenciar os utilizadores a seguir determinados caminhos numa rede rodoviária.

Combinado com um correto estudo das redes e previsão da forma como estas se comportam dentro de cenários de grandes fluxos de veículos, é possível uma otimização da circulação das mesmas tendo em conta que todos os utilizadores seguem os caminhos determinados (Giglio & Sacco, 2014).

1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação tem como principal objetivo a análise dos modelos de afetação referentes ao último passo do modelo clássico de transportes, focando-se na atribuição de tráfego de veículos

pelos possíveis percursos entre os pares origem-destino. A esta aplicação e análise procedeu-se o estudo aprofundado do Modelo Clássico de Transportes, e todos os seus submodelos associados, com uma maior ênfase no passo da afetação, de modo a criar bases de conhecimento referentes ao tema.

Sucintamente, os objetivos vão recair na análise macroscópica dos diferentes modelos de afetação que fixam os caminhos lógicos entre cada par de zonas, ou par origem-destino, na atribuição de viagens aos arcos de uma rede rodoviária.

A aplicação dos modelos macroscópicos pressupõe a existência de uma rede viária. Para isso, foram desenvolvidas duas redes viárias, uma delas representativa de uma rede real de uma zona do Porto e outra fictícia, não representativa de uma rede existente, modelada para uma interpretação mais simples das diferenças dos modelos.

A ferramenta usada para o desenvolvimento destas redes, assim como a aplicação e a calibração dos modelos de atribuição foi o *PTV VISUM*, sendo que este programa oferece um nível de detalhe macroscópico, que se adequa ao espectro do estudo da dissertação. Todos os parâmetros utilizados foram calibrados para valores comuns a todos os modelos.

Uma das formas mais corretas de avaliação deste tipo de modelos é a comparação dos dados reais da rede, através da contagem de veículos, com os dados estimados resultantes das metodologias do programa de modelação. Pela inacessibilidade e indisponibilidade de dados de contagem de tráfego numa rede real, indispensáveis para este tipo de metodologia de avaliação, torna-se necessário outra tipologia de análise.

Portanto, pela carência de dados reais, esta tipologia de análise alternativa tem como objetivo a comparação dos valores de variáveis, que necessitam de ser definidas e calculadas, que atuam como indicadores de desempenho dos modelos, calculadas através dos resultados do simulador.

A comparação destas variáveis permite retirar ilações a partir da avaliação dos modelos quanto ao seu bom ou mau funcionamento, à sua aproximação a um sistema real, à melhor ou pior otimização do sistema viário, entre outros., esta avaliação é subjetiva, dependente dos resultados estimados obtidos pelo simulador.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em 5 capítulos, inclui a Introdução num primeiro capítulo, no qual, de forma resumida, se enquadra a problemática dos sistemas de tráfego e do seu planeamento, onde se abordam os objetivos deste estudo.

No segundo capítulo, “Modelos de Afetação”, é apresentado o modelo clássico de transportes ou também denominado modelo de quatro passos e todos os submodelos em que se divide o mesmo. Sendo o último passo do modelo, o submodelo da afetação de tráfego é aí realizado uma maior especificação do mesmo com a apresentação de todos os princípios, assim como a classificação e explicação das técnicas de afetação.

No terceiro capítulo, “Construção de um modelo em VISUM”, é introduzido o programa de modelação, com a apresentação do procedimento de desenvolvimento de uma rede de tráfego e de todos os parâmetros necessários para a execução dos modelos. É também neste capítulo que são indicados os modelos de afetação a ser utilizados para análise de resultados, descrevendo os algoritmos atuantes.

O quarto capítulo, “Casos de estudo e discussão de resultados”, apresenta as duas redes rodoviárias para a aplicação dos modelos, a rede Asprela e a rede fictícia, em conjuntos com as suas características. Este capítulo serve para a apresentação dos indicadores de desempenho, variáveis utilizadas para a análise dos modelos. São apresentados os resultados obtidos pelos modelos na aplicação das redes de estudo, através do uso da ferramenta de modelação, com a discussão e interpretação dos mesmos.

Por fim, o quinto e último capítulo, “Conclusões e trabalhos futuros”, irá conter todas as conclusões relativas à presente dissertação e potenciais investigações futuras relacionadas com o tema.

2

MODELOS DE AFETAÇÃO

2.1. ENQUADRAMENTO

A utilização de modelos de previsão para as mais diversas situações tornou-se atualmente indispensável. Com os vários recursos e ferramentas de cálculo a que temos acesso, nos dias de hoje, a avaliação do tráfego em diferentes redes, tornou-se uma tarefa mais facilmente executável, sendo que esta avaliação em situações reais, integra dificuldades ao nível económico e ao nível da segurança.

O sistema de transporte é muito complexo e o seu desempenho depende das decisões tomadas nos diversos níveis da sociedade (os objetivos e as decisões podem estar em conflito entre si). O processo de avaliação, conceção e gestão deste tipo de sistema não pode, portanto, ser realizado sem o auxílio de modelos devidamente formulados e que suportem as decisões.

Um modelo é uma representação, material (“modelo físico”) ou computacional (“modelo abstrato”), que permite replicar de forma simplificada a realidade. O processo de modelação é uma tarefa desafiadora, mas que é necessária para o planeamento racional e a avaliação dos sistemas de transporte.

O planeamento do transporte envolve o processo de tomada de decisões para potenciais melhorias das infraestruturas rodoviárias, controlo de tráfego, etc. Para ajudar no processo foram desenvolvidas várias ferramentas manuais e automáticas (Ahmed, 2012).

A estruturação geral de um modelo de transportes foi resultante de vários anos de experiências e desenvolvimento, sendo que, na década de 1960, resultou, proveniente da prática de um modelo com uma estrutura coesa e que permanece até aos dias de hoje sem mudanças significativas nas suas técnicas de modelação, denominado de Modelo Clássico de Transporte ou Modelo de Quatro Passos. Desde cedo, este modelo teve sucesso devido sobretudo à sua simplicidade, não só de formular, como à redução da cadeia de decisões e à sua reduzida divisão em quatro “passos”: a geração e atração de tráfego, a distribuição de tráfego; a repartição modal e a afetação do tráfego (Figura 2.1).

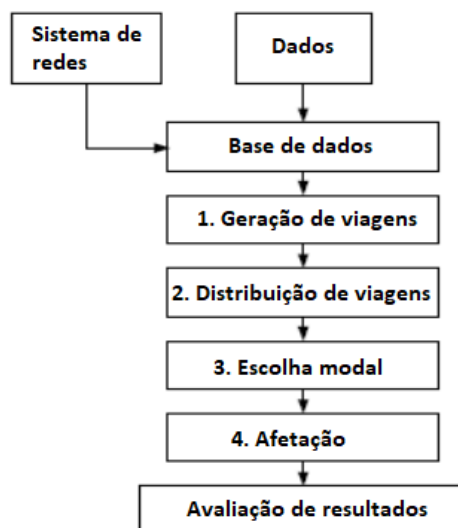


Figura 2.1 – Representação esquemática do modelo quatro-passos. Adaptado de (Tsekeris & Tsekeris, 2011)

Esta sequência de passos é a mais comum, mas isso não significa que tenha obrigatoriamente de ser realizada desta forma. Em alguns estudos, a repartição modal e a distribuição de viagens têm a sua ordem invertida, respetivamente o segundo e terceiro passo. Isto permite que as variáveis de decisão dependam das unidades geradas nas zonas individuais ou habitação.

Para além da troca de ordem, também a realização, em simultâneo, de dois submodelos é usual em estudos em que se pretenda retirar relevância à repartição modal, fazendo-se a junção do segundo e terceiro mencionados anteriormente. Por fim, também é possível a junção da geração e distribuição nos modelos, primeiro e segundo respetivamente (Ortúzar & Willumsen, 2011).

Os modelos de transporte representam a distribuição temporal e geográfica das viagens, os modos de transporte e os volumes de tráfego de cada secção dos elementos da rede. É necessária, para isso, a modulação das redes rodoviárias, definindo todos os elementos que as compõem (Figura 2.2):

- Nós – zonas de interseções de vias, também é neste elemento que estão representados os movimentos de mudança de direção e de via;
- Arcos – secções de estrada ou via, fazem a ligação entre os nós;
- Zonas – áreas que representam centros populacionais, seja de habitação de trabalho, que se define por ser um conjunto de pontos de origem e destino de viagens.

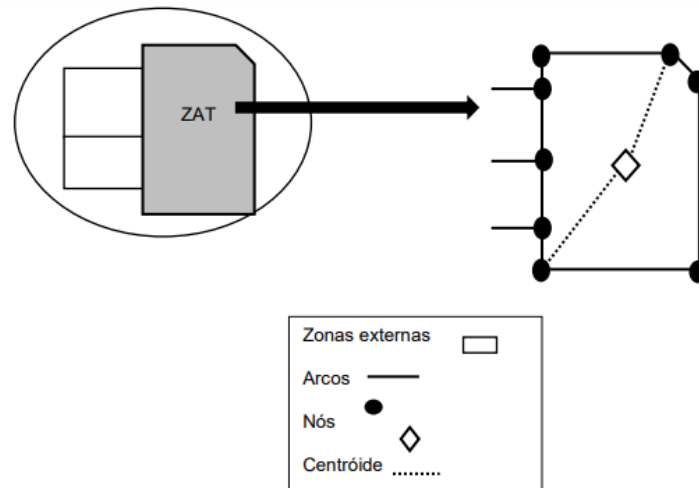


Figura 2.2 - Representação esquemática da rede de transportes. Fonte: (Duarte, 2013)

2.1.1.GERAÇÃO DE VIAGENS

O primeiro passo no modelo de 4 passos é a geração de tráfego. O objetivo desta etapa é a previsão do número total de viagens geradas da origem (O_i) e que são atraídas ao destino (D_i) para cada zona da rede de estudo.

Este processo pode ser executado de várias maneiras: desde uma abordagem direta através de inquéritos realizados à população ou indiretamente através das propriedades das zonas, tendo em conta indicadores socioeconómicos como a população, o emprego, número de veículos possuído por indivíduo e/ou habitação, entre outros. Nesta última subjaz o pressuposto que estes dados, assim como os usos do terreno envolvente à zona vão estar diretamente envolvidos na geração/atração de viagens das zonas, criando um maior ou menor fluxo rodoviário para o acesso aos serviços e bens presentes.

Todas as viagens têm um motivo intrínseco, dividindo-se em dois tipos de (Figura 2.3):

- As “*Home-Based trips*”, viagens que são baseadas na habitação, a viagem tem a sua origem ou destino na habitação;
- As “*Non-Home-Based trips*”, viagens em que a habitação não se encontra nem na origem nem no destino.

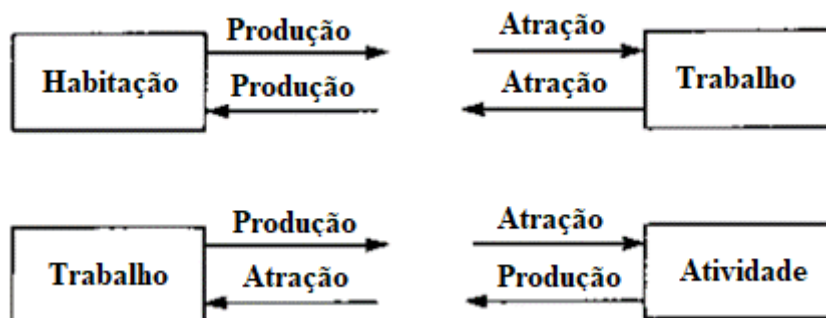


Figura 2.3 - Atração e produção de viagens. Adaptado de: (Ortúzar & Willumsen, 2011)

No entanto, o número de viagens geradas e o número de viagens atraídas nem sempre são coincidentes. Porém, é uma condição necessária que esta desigualdade não se verifique para a continuidade do modelo. Então, pela sua maior fidedignidade e pelo uso de variáveis mais significativas, o número total de viagens é equilibrado em função do número total de viagens geradas (Ortúzar & Willumsen, 2011).

2.1.2.DISTRIBUIÇÃO DE VIAGENS

Depois de definidas as viagens que são geradas e atraídas às zonas envolventes das redes é necessária a distribuição entre os pares de origem-destino.

A Tabela 2.1 representa a matriz origem-destino, que se pretende que antes da etapa da afetação esteja completamente definida. De facto, com o primeiro submodelo foi possível a previsão de cálculo das somas das linhas e colunas, definidas por: D_1 até D_j e O_1 até O_i .

Tabela 2.1 - Exemplo de matriz O/D

Origem	Destinos				
	1	2	3	j	$\sum_j T_{ij}$
1	T_{11}	T_{12}	T_{13}	T_{j1}	O_1
2	T_{21}	T_{22}	T_{23}	T_{j2}	O_2
3	T_{31}	T_{32}	T_{33}	T_{j3}	O_3
i	T_{i1}	T_{i2}	T_{i3}	T_{ij}	O_i
$\sum_j T_{ij}$	D_1	D_2	D_3	D_j	$\sum_{i,j} T_{ij} = T$

Assim, considerando que as células da diagonal da matriz não necessitarão de ser calculadas, são definidas como viagens intra-zonais e não irão ser abordadas pelos modelos, todas as outras células terão de ser definidas. Esta etapa leva a um aumento exponencial do número de dados da matriz.

Existem variadas técnicas para a estimação dos volumes entre os pares origem-destino, que se podem dividir em duas categorias:

1. Métodos de fatores de crescimento ou Métodos analógicos

A filosofia subjacente a este tipo de modelos indica que os padrões de viagem podem ser projetados para o futuro, baseando-se em taxas de crescimento das zonas que podem ser obtidas através da “atração” e “produção” de viagens, acessíveis através da primeira etapa do modelo geral. Os fluxos entre os pares O/D são calculados simplesmente pela multiplicação dos volumes do dia presente por um fator de crescimento.

As vantagens que trazem são a facilidade de aplicação, a flexibilidade, já que a distribuição pode ser realizada por propósito, modo ou altura do dia. Contudo estes modelos têm por base o

conhecimento prévio dos fluxos de tráfego atuais, projetando apenas os fluxos futuros, não permitindo a previsão de tais valores (Patriksson, 1994).

2. Métodos sintéticos

Os modelos sintéticos surgem como alternativas viáveis para uma aproximada previsão dos padrões de viagens entre zonas. A causa subjacente a este fenómeno foi a introdução de uma perspectiva inovadora na maneira como se compreendia a origem dos padrões de movimento dos utilizadores, assimilando os mesmos a leis da física. Estes modelos foram especialmente desenvolvidos para auxiliar na previsão de padrões de viagens futuras em situações de mudanças significativas na rede.

O mais conhecido entre estes modelos é o Modelo Gravítico, originalmente criado a partir de uma analogia com a lei gravitacional de Newton. Estes modelos estimam as viagens para cada célula da matriz sem utilizar diretamente pela observação um padrão de distribuição de viagens; por isso são por vezes denominados modelos sintéticos, por oposição aos modelos com fator de crescimento.

A fórmula derivada do modelo é representada por:

$$V_{OD} = A_O \cdot V_O \cdot B_D \cdot V_D \cdot f(C_{OD}) \quad (2.1)$$

Onde:

- V_{OD} – número de viagens que originam na zona O e terminam na zona D;
- A_O e B_D – coeficientes de equilíbrio;
- V_O – número de viagens que originam na zona O;
- V_D – número de viagens que terminam na zona D;
- $f(C_{OD})$ – função do custo generalizado.

O modelo de oportunidades introduz a teoria da probabilidade como a fundação da sua distribuição. O pressuposto assente do modelo de oportunidades é que todas as viagens vão permanecer na distância mais curta possível, alongando-se apenas se não conseguirem encontrar um destino aceitável.

O modelo electrostático foi desenvolvido a partir da lei de força eletrostática de Coulomb, considerando o comportamento dos utilizadores como eletrões, assumindo que a atração para as zonas de destino (com carga positiva) é proporcional ao número de pessoas empregadas na respetiva zona.

A simplicidade deste modelo é o seu maior mérito, sendo semelhante aos primeiros modelos de gravidade desenvolvidos e aos princípios de solução propostos para os modelos gravíticos. No entanto, nas suas desvantagens inclui-se a sua incapacidade para modelar os fluxos externos. Comparam-no com os outros modelos de distribuição de viagens e, embora tenham considerado pouco dispendioso na aplicação, verificaram que era menos preciso do que o modelo de distribuição gravítica.

2.1.3.ESCOLHA MODAL

A escolha modal é o terceiro passo do modelo tradicional de 4 passos no processo de previsão de tráfego. É a etapa mais complexa de se modelar e nas últimas décadas muita da pesquisa e avanços na modelação de transportes tem recaído nesta fase.

Sucintamente, na análise da escolha modal, a totalidade das viagens distribuídas entre cada par de zonas são repartidas pelos modos de transporte existentes. A maioria dos modelos de escolha modal são baseados na formulação *logit*, existindo três modelos derivados desta formulação: o *logit* multinomial simples, o *logit* incremental, e o *logit* agrupado (*nested*).

O modelo *logit* agrupado tem sido mais aplicado em áreas urbanas, onde há uma maior competitividade nos modos de transporte público e onde há múltiplos acessos a esses modos. Para áreas urbanas de tamanhos pequenos e médios que têm os serviços locais de autocarro como principal competição ao transporte automóvel, o modelo *logit* multinomial simples é um modelo geralmente mais adequado. A formulação *logit* incremental permite a análise de estratégias ou políticas de melhoria do trânsito sem a simulação completa de todo o sistema (Martin & A.McGuckin, 1998).

A formulação geral do modelo *logit* é uma relação matemática que estima a probabilidade de escolha de um modo específico, a partir da equação:

$$P_i = \frac{e^{u_i}}{\sum_{i=1}^k e^{u_i}} \quad (2.2)$$

Onde:

- P_i – probabilidade de um utilizador escolher o modo i ;
- u_i – função linear com os atributos do modo i que descreve a sua atratividade;
- $\sum_{i=1}^k e^{u_i}$ – soma das funções lineares com os atributos de todas as alternativas, k , que estão disponíveis à escolha do modo de transporte.

2.2.MODELOS DE AFETAÇÃO

2.2.1.PRINCÍPIOS DE AFETAÇÃO

O problema da afetação de tráfego começou, desde cedo, a intrigar investigadores, instigando-os a desenvolver modelos que possam aproximadamente refletir o processo de decisão dos condutores quanto à escolha do caminho a utilizar para chegar ao destino pretendido (Mahpour et al., 2020).

Depois de aplicados os passos anteriores, chegamos ao passo final do modelo, a partir do qual é possível retirar e analisar resultados. Estes foram necessários, pois criaram os parâmetros necessários para os cálculos procedentes, sendo que temos agora disponível uma matriz de origem-destino completamente definida da rede rodoviária em estudo.

O processo de atribuição do tráfego define-se como a atribuição dos conjuntos origem-destino à rede, ou seja, a distribuição dos veículos que se pretendem deslocar da origem O_i para o destino D_j pelas combinações de percurso que ligam uma zona à outra.

Um percurso ou “caminho” é uma combinação de arcos consecutivos ligados entre si, tendo sempre nós em comum, e que fazem a ligação entre as zonas do par O/D. Na Figura 2.4, pode-se verificar que entre a zona 1 e a zona 4 há a possibilidade de 3 percursos.

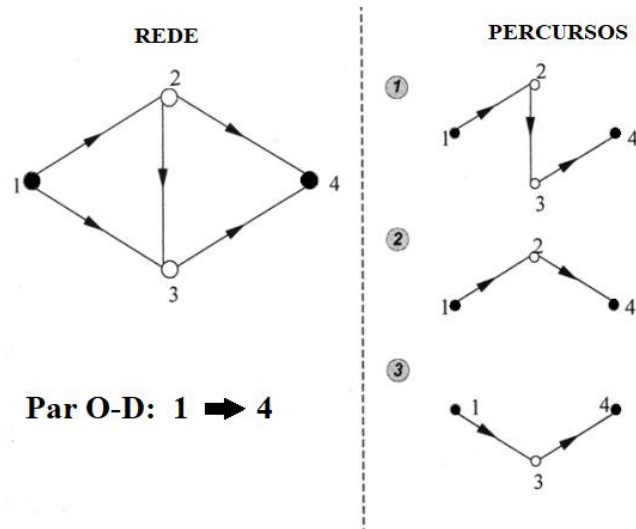


Figura 2.4 – Exemplo de uma rede com três percursos

Dependendo da complexidade da rede, estas combinações de caminho tanto podem ter uma solução única, havendo só uma rota que liga um ponto ao outro, como pode ser abrangente a várias alternativas.

A escolha dos utilizadores quanto à escolha do percurso a utilizar não é um processo linear, tem alguma complexidade, mas que possui por base o conceito de “custo generalizado percebido” (Tavares, 2003).

A premissa básica da afetação é a suposição de um utilizador racional, escolher o percurso que lhe oferece um menor custo individual percebido (ou antecipado). Há um diverso número de fatores que influenciam a escolha do percurso em viagens entre dois pontos, entre estes:

- Tempo de percurso;
- Distância percorrida;
- Custo monetário (combustível, portagens e outros);
- Congestionamento e filas de espera;
- Tipo de manobras a realizar no percurso;
- Tipo e hierarquia da via;
- Sinalização;
- Cenário;
- Se existem obras rodoviárias ao longo do percurso;
- Conhecimento do trajeto.

A reprodução de um custo generalizado que incorpore todos estes elementos é uma tarefa difícil. Adicionalmente, não se torna prático a modelação exata e a integração de todas estas variáveis nos modelos de afetação de tráfego e, portanto, o uso de aproximações torna-se inevitável.

O processo de seleção de um percurso tipicamente envolve minimizar a distância de viagem, especialmente sobre a suposição que o custo de deslocação é significativamente afetado pela distância percorrida (Lee & Oduor, 2015). O utilizador tem a tendência de utilizar o percurso que tem um custo mínimo dentro das alternativas que possui. Todos os diferentes utilizadores têm uma perceção diferente do custo de uma viagem. Os grandes dois parâmetros deste custo e da viagem em si são: o tempo despendido e a distância percorrida.

Para além destes, um outro custo adicional que, normalmente, é contabilizado é o pagamento de portagem, onde em redes que tenham autoestradas associadas pode acarretar um custo adicional e possuir um peso considerável na escolha das rotas. Na realidade, existe um grande número de variáveis que são subjetivas a cada utilizador e impossível de replicar e prever que afetem a tomada de decisão, por exemplo, o estado da via, o estado do veículo, a visibilidade da via, entre outros.

Assim, usualmente, é definida uma função que é composta por uma combinação linear entre a distância e o tempo de percurso, assim como a adição de um outro parâmetro adicional para os custos adicionais. O custo do arco i , define-se por:

$$C_i = \alpha \cdot T_i + \beta \cdot D_i + Z \quad (2.3)$$

Onde:

- C_i – custo generalizado no arco i ;
- T_i – tempo de percurso;
- D_i – comprimento do arco;
- α, β – coeficientes
- Z – custo adicional.

A maioria das ferramentas de modelação e afetação de tráfego permitem ao utilizador atribuir pesos ao tempo e distância de viagem, a partir da definição dos valores dos parâmetros α e β , a fim de uma representação dos condutores mais condicionada e adaptada ao estudo em questão.

Aplicando o conceito de custo generalizado à noção de percurso, deduz-se que, considerado o percurso k , uma combinação de arcos que faz a ligação entre um par de zonas origem-destino, referente a uma zona A e considerando que δ_i^k toma o valor 1 se o arco i pertence ao percurso k e 0 se o arco i não pertencer ao percurso k , a formulação matemática do custo generalizado do mesmo, C_k , é traduzida por:

$$C_k = \sum_{i \in A} \delta_i^k \cdot C_i \quad (2.4)$$

(Outram & Thompson, 1978) realizaram um estudo em que recolheram dados sobre os fatores que mais pesavam na escolha do trajeto, por parte dos utilizadores, assim como os objetivos das suas viagens, recolhidos através de inquéritos aos mesmos, e avaliaram o seu desempenho real no

processo de escolha. Comparando e analisando os dados recolhidos, verificaram que a combinação de tempo e distância resultou na melhor explicação da escolha do percurso. Contudo, com esta combinação de função de custos generalizada, só foi possível explicar cerca de 60 a 80% dos percursos em comparação com os percursos escolhidos.

Tendo em conta que as contribuições do resto dos fatores anteriormente referidos são de pequenos valores, a parte inexplicada deve ser atribuída a fatores como diferenças na perceção, informações incorretas sobre os custos de percurso ou simplesmente a existência de erros.

O facto de condutores diferentes escolherem frequentemente percursos diferentes quando viajam entre os mesmos dois pontos podem ser atribuídos a três tipos de razões:

1. Diferenças nas perceções individuais sobre o que se define como o "melhor percurso"; enquanto alguns utilizadores desejam minimizar o tempo de viagem; outros o consumo de combustível e muitos uma combinação de ambos, o que introduz uma variabilidade de escolhas.
2. O nível de conhecimento das rotas alternativas varia de utilizador para utilizador e isto introduz uma irracionalidade aparente (do ponto de vista do observador) nas escolhas dos trajetos.
3. Efeitos de congestionamento que afetam primeiro as rotas mais curtas, a nível de distância, e tornam os seus custos generalizados comparáveis a percursos inicialmente menos atrativos.

O tempo de viagem é considerado, então, um fator importante no transporte, sendo diretamente dependente da velocidade a que se desloca o veículo. Sendo as redes rodoviárias sistemas de partilha entre todos os membros da sociedade, um dos fenómenos mais comum é o congestionamento das vias. O congestionamento define uma noção fundamental no estudo de tráfego. Como resultado do aumento dos volumes de tráfego, a velocidade média num segmento da via tende a diminuir, primeiro lentamente, mas à medida que a interação entre os veículos e os efeitos de criação de filas se tornam cada vez mais significativos, a velocidade média diminui mais rapidamente, até que a fila tenha evoluído para uma situação de congestionamento em que se pode observar muito pouco fluxo num segmento.

Na análise dos sistemas de tráfego, os tempos médios de percurso são modelados como funções de desempenho da ligação, relacionando o tempo de percurso com o volume de tráfego num segmento. Para ter em conta os efeitos de congestionamento (Figura 2.5), estas funções são tipicamente não lineares, positivas, e aumentam estritamente com o fluxo. Os parâmetros nas fórmulas incluem muitas vezes as capacidades das vias, que medem um ponto crítico de paragem em que o tempo de percurso começa a aumentar rapidamente com a introdução de fluxos adicionais (Patriksson, 1994).



Figura 2.5 – Efeito de congestionamento (Circula Seguro, 2022)

Qualquer modelo de tráfego bem fundamentado deve reconhecer as decisões individuais dos utilizadores em relação a quando, onde e como circular. Um modelo de afetação de tráfego que pretenda fornecer uma descrição macroscópica ou uma previsão do volume de tráfego resultante das escolhas de percurso realizadas numa rede de tráfego deve, portanto, basear-se num princípio de comportamento de escolha das mesmas.

Assim, um dos conceitos fundamentais dos modelos de afetação é a noção de equilíbrio. Um dos pioneiros na definição deste conceito foi Wardrop que, de acordo com o seu primeiro princípio de equilíbrio denominado por “equilíbrio do utilizador” (UE – *User equilibrium*), definiu que nenhum utilizador pode reduzir o seu tempo de viagem ao mudar o percurso unilateralmente.

A forma extensiva do princípio ao conceito de custo generalizado afirma que:

“Em equilíbrio, para cada par origem-destino, o tempo de viagem generalizado em todos os caminhos utilizados é igual. Assim, é inferior ou igual ao tempo de viagem generalizado em todos os caminhos não utilizados” (WARDROP, 1952).

Infelizmente, este princípio não representa uma descrição absolutamente realista duma rede de tráfego congestionada, embora possa ser considerada suficientemente aproximada. A notação matemática para esta expressão é a seguinte:

$$\begin{cases} C_{OD} = C_{OD}^{min}, & \forall V_{OD} > 0 \\ C_{OD} \geq C_{OD}^{min}, & \forall V_{OD} = 0 \end{cases} \quad \forall p_{OD} \in R_{OD} \quad (2.5)$$

Onde:

- C_{OD} – Custo de um percurso compreendido entre a origem O e o destino D;
- C_{OD}^{min} - Custo mínimo de um percurso compreendido entre a origem O e o destino D;
- V_{OD} – Volume de veículos entre o percurso compreendido entre a origem O e o destino D;
- p_{OD} – Percursos compreendidos entre a origem O e o destino D;
- R_{OD} – Totalidade dos percursos compreendidos entre a origem O e o destino D.

Wardrop propôs também uma segunda alternativa à afetação de tráfego a uma rede que se denomina por “equilíbrio do sistema”. De acordo com esta alternativa, em condições de

equilíbrio, o tráfego deverá ser distribuído de forma a que o custo total de funcionamento da rede seja o custo mínimo possível (Rojo, 2020).

“Em equilíbrio, o tempo médio de viagem de todos os veículos é mínimo” (WARDROP, 1952).

2.2.2. CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS DE AFETAÇÃO

Todas as técnicas de afetação têm características específicas. É possível dividir estas de forma a agrupá-las segundo propriedades que têm em comum, como a forma de cálculo, a sua dimensão, nível de detalhe e a sua natureza,

Quanto à sua simulação, os modelos de tráfego podem ser classificados como:

- Estáticos ou dinâmicos;
- Por simulação ou analíticos;
- Microscópicos, mesoscópicos ou macroscópicos;
- Com ou sem restrições de capacidade;
- Determinístico ou estocásticos.

2.2.2.1. Estáticos ou dinâmicos

Uma das dimensões em que se podem classificar os modelos é a dimensão temporal e, conseqüente, caracterização dos fluxos de tráfego. Esta aplicação é realizada apenas aos volumes de procura, não devendo ser confundida com alterações devidas a eventos, acidentes ou incidentes (por exemplo, acidentes, ciclos de sinal luminoso, fecho de vias de alta ocupação) (National Research Council, 2000).

Nos modelos estáticos, a procura é uniformemente distribuída ao longo do tempo. Constituem uma ferramenta que é amplamente preferível pela sua simplicidade e eficiência computacional, pois é possível a sua rápida execução mesmo em redes extensas. Há um foco maior no carregamento da rede ao invés dos dinâmicos que se focam sobretudo no controlo e gestão do tráfego, fluxo variável da rede que ilustra como os níveis de congestionamento variam com o tempo.

Os modelos dinâmicos têm a vantagem de ser os únicos que possuem a capacidade de descrever as características dinâmicas do fluxo de tráfego, descrevendo as variações temporais do tráfego rodoviário, como também a evolução das filas de espera. Estas variações podem ser contínuas ou descontínuas em intervalos de tempo de 1 hora, maioritariamente usado pelos modelos, 15 minutos ou até mesmo períodos de 5 minutos. Este tipo de modelos é especialmente vantajoso quando há grandes mudanças no tráfego num certo intervalo de tempo como, por exemplo, o fim de eventos desportivos.

Têm também a vantagem de conseguir analisar as características de desempenho da rede em situações de emergência, assim como evacuações de pequena e grande escala e servem como uma ferramenta de apoio para tomadas de decisão.

2.2.2.2. Simulação ou analíticos

Os modelos podem ser classificados também quanto à forma como são obtidas as soluções. Nos modelos analíticos, as relações entre as variáveis do sistema, a definição dos fluxos de tráfego e

regras de escolha de percursos são definidas analiticamente por equações e restrições matemáticas.

Nos modelos de simulação, a recriação dos fluxos de tráfego e as suas complexas interações são modelados através da utilização de simuladores computacionais.

De uma forma genérica, os modelos analíticos estão associados a modelos macroscópicos enquanto os simulados estão associados aos modelos microscópicos (Tavares, 2003).

2.2.2.3. Microscópicos, mesoscópicos e macroscópicos

Os modelos podem ser categorizados quanto ao nível de detalhe, dependendo da forma em que se caracterizam as variáveis que representam as correntes de tráfego, Figura 2.6.

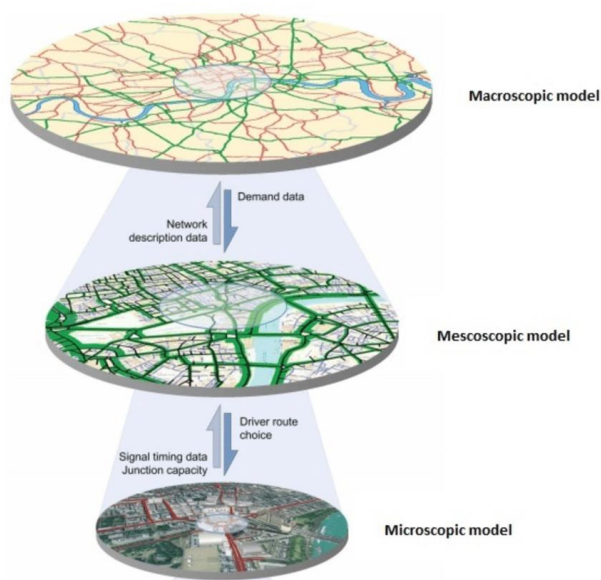


Figura 2.6 – Diferenciação esquemática quanto ao nível de detalhe dos modelos. Fonte: (Poudyal et al., 2020)

Os modelos macroscópicos recorrem das denominadas variáveis macroscópicas caracterizadoras do fluxo de tráfego tais como a densidade, o volume/débito, a velocidade média (no espaço), tempos de percurso, e das relações matemáticas entre as mesmas. São utilizados com o objetivo de calcular a extensão espacial e sequencial do congestionamento causado pela elevada procura ou ocorrência de incidentes na rede, mas não podem modelar as interações dos veículos em configurações alternativas. Os resultados num modelo macroscópico têm um espectro de estudo de secção por secção, ao invés do rastreamento de veículos individuais, tendo como pressuposto que o fluxo de veículos se comporta como um fluido (Calvert et al., 2016).

Os simuladores microscópicos de tráfego são as ferramentas de análise de tráfego mais poderosas e úteis para certos casos de estudo em que se pretende analisar condições de tráfego em “tempo real”, uma vez que reproduzem o movimento de cada veículo. O transporte individual pode ser rastreado pela rede rodoviária e a sua trajetória espacial e temporal pode ser traçada. O modelo contém um processamento lógico que permite descrever o comportamento do veículo, compreendendo a definição das variáveis microscópicas e comportamentos tais como a

velocidade individual, aceleração, desaceleração, mudança de via, manobras de ultrapassagem, movimentos de mudança de direção.

Os modelos mesoscópicos compreendem-se num domínio entre os macroscópicos e microscópicos. Tipicamente realizam a modelação de “clusters”, ou aglomerados de veículos e incorporam equações que indicam a forma como os diferentes aglomerados interagem entre si. A simulação de modelos aplicados a redes com sinalização luminosa é frequentemente desenvolvida desta forma, sendo que nesta condição, os veículos tendem em circular em pelotões e a interagir entre si e exibem mudanças previsíveis de carácter ao longo do tempo e da distância, como acontece com a dispersão de pelotões (National Research Council, 2000).

Os modelos mesoscópicos têm ganhado popularidade nos últimos anos também pela sua dependência da teoria robusta do fluxo macroscópico de tráfego, ao mesmo tempo que a informação individual dos veículos (por exemplo, trajeto, classe do veículo) pode ser facilmente acompanhada.

2.2.2.4. Com e sem restrições de capacidade

Nos modelos sem restrições de capacidade, o volume nos arcos da rede não tem qualquer impacto no processo de degradação das condições de circulação e, conseqüentemente, os tempos de percurso não dependem dos volumes, o que se traduz em custos fixos nos arcos da rede. Estes tipos de modelos podem ser aplicados a redes não congestionadas que podem ser aplicadas às técnicas de afetação como o “tudo-ou-nada” ou o estocástico puro.

Nos modelos com restrição de capacidade, os cálculos dos tempos de percurso são baseados no volume de tráfego atribuído aos arcos da rede rodoviária, tendo em conta a dependência entre o fluxo de um arco e o seu custo generalizado. De facto, a relação fundamental na engenharia de tráfego, do ponto de vista macroscópico, é a relação entre a velocidade (V) e o débito (q) numa secção (Figura 2.7), ou seja, em função do número de veículos que passam numa secção, durante um certo intervalo de tempo, corresponde uma dada velocidade.

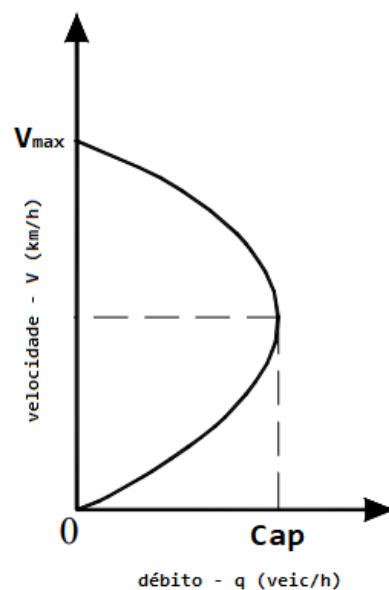


Figura 2.7 - Diagrama fundamental da Engenharia de tráfego

O diagrama pode ser dividido em duas partes: a parte superior, onde o há um escoamento estável e a parte inferior que traduz um escoamento instável. O valor máximo de débito corresponde ao valor da capacidade do arco, que corresponde a uma velocidade crítica. O valor mínimo do débito tem dois valores de velocidade associados: a velocidade máxima no escoamento estável, quando não há qualquer congestionamento da rede e o utilizador pode circular a uma velocidade em regime livre; a velocidade mínima ou nula, numa situação de escoamento instável, onde se atinge o congestionamento completo. Isto comprova a inaptidão da caracterização de uma corrente de tráfego a partir de uma só variável, seja esta a velocidade ou o débito.

Assim, estes modelos utilizam funções que relacionam o tráfego com o custo generalizado de um arco, podendo ser aplicadas as técnicas de afetação “incrementais” ou de “equilíbrio”.

2.2.2.5. Determinísticos e estocásticos

O modelo determinístico não é sujeito à aleatoriedade. A cada aplicação, a produção do resultado vai ser igual, apresentando os mesmos valores. Se esta suposição não for verdadeira, alguns dos atributos do modelo não são considerados como certos, o modelo torna-se estocástico, refletindo a natureza aleatória e probabilística das variáveis.

Os modelos estocásticos da afetação de tráfego destacam a variabilidade nas perceções dos condutores dos custos dos percursos e as medidas que procuram minimizar (a distância, tempo de percurso e os custos generalizados). São responsáveis por considerar não só os melhores percursos como também percursos alternativos (Kucharski, 2014).

Tendo presente esta e a anterior classificação, pode-se categorizar os modelos quanto à existência ou não de restrições de capacidade e se tem efeitos estocásticos no mesmo, tal como se apresenta na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Categorização dos modelos determinísticos e estocásticos. Adaptado de (Ortúzar & Willumsen, 2011)

	Efeitos estocásticos incluídos?	
	Não	Sim
Sem restrições de capacidade	Tudo-ou-nada	Estocástico puro
Com restrições de capacidade	Equilíbrio do utilizador	Equilíbrio estocástico do utilizador

2.2.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MÉTODOS DE AFETAÇÃO

2.2.3.1. Tudo-ou-nada

O método mais simples de atribuição e afetação de tráfego é o modelo denominado por “tudo-ou-nada”. Este classifica-se por não aplicar restrições de capacidade, definindo que todos os condutores consideram os mesmos atributos para a escolha do percurso, sendo o custo generalizado percebido dos arcos igual para todos. Qualquer que seja o número de vezes que se execute o modelo, se não existir alguma alteração da rede, os resultados irão permanecer inalteráveis.

A inexistência de congestionamento resulta num custo fixo para todos os arcos: esta suposição de que o custo é universal para os utilizadores faz com que todos os que desejem deslocar-se do ponto i para o ponto j , escolham o mesmo percurso. Assim, entre os dois pontos, só um percurso vai ser completamente carregado e para os percursos alternativos “menos atrativos” não vão ser atribuídos nenhuns veículos (Ortúzar & Willumsen, 2011).

A relação do fluxo resultante deste modelo, para certas redes, tem uma relação mínima com o fluxo real. Contudo, este modelo tem uma maior significância em redes que tipicamente não se encontram congestionadas e que sejam escassas em rotas alternativas, ou seja, em que todos os percursos para um determinado par O/D tenham uma dispersão grande em termos de custos. Uma vantagem da sua utilização é a identificação do percurso mais “desejado”: o “caminho mais curto” que os utilizadores são mais propensos a utilizar na ausência de congestionamento. A sua aplicação mais prática é a sua utilização como um ponto de partida para as diversas técnicas de afetação.

Na Figura 2.8, apresenta-se um exemplo do funcionamento da afetação do modelo numa rede simples configurada com três percursos entre o par O/D entre a zona 1 e 2. O volume de procura entre as duas zonas define-se em 1000 veículos. Entre os três percursos, o percurso 1-3-4 representa o “caminho mais curto”, sendo o que compõe um custo percebido menor. Conforme a configuração do modelo, é atribuído a totalidade do tráfego a esta rota.

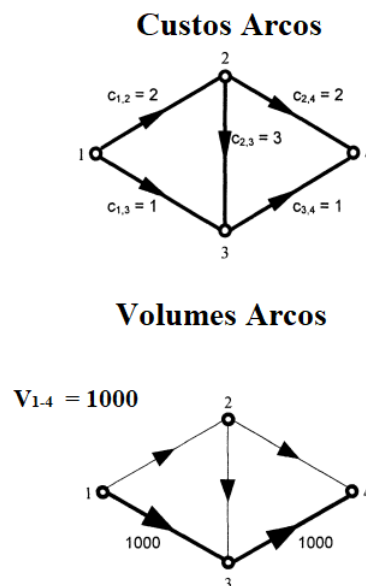


Figura 2.8 - Atribuição “tudo-ou-nada”. Adaptado de (Cascetta, 2001).

2.2.3.2. Incremental

O modelo incremental é um modelo baseado no conceito do modelo “tudo-ou-nada”. No entanto, introduz uma melhoria significativa que pode resultar em afetações mais realistas. Para além de ser considerada a restrição da capacidade dos arcos, a afetação é executada de um modo iterativo. Num primeiro passo, a matriz é dividida em partes, pré-definidas, usando a primeira matriz é carregada à rede utilizando o método “tudo-ou-nada”, ou seja, atribuir o tráfego ao caminho “mais curto”. Uma vez que o fluxo é definido, os custos dos percursos são recalculados em função dos volumes de tráfego. Depois de definidos, estes custos atualizados, a segunda matriz é carregada à rede, fazendo uso novamente da metodologia do “tudo-ou-nada” e, novamente, os custos

generalizados de cada seção são atualizados. O modelo acaba quando todas as matrizes parciais forem carregadas, sendo que o número de iterações vai ser igual ao número de partes em que a matriz total de viagem é dividida.

O resultado final proporciona fluxos que são distribuídos entre vários percursos, não só atribuído a um só caminho “mais curto”, aproximando-se mais à realidade.

Teoricamente, quanto maior for o número de matrizes parciais consideradas, maior é a probabilidade de o tráfego ser distribuído por um número maior de percursos. Contudo por mais que a matriz total seja dividida num grande número de matrizes que compoñham pequenas frações da total, este método não converge numa solução de equilíbrio, assente nos princípios de Wardrop, apesar dos resultados obtidos poderem ser semelhantes. Isto deve-se ao facto do volume de tráfego atribuído a cada arco entre iterações não poder ser modificado ou excluído. Em todo o caso, é visível que a sua simplicidade e facilidade de execução cria uma possibilidade e interpretar resultados com maior fiabilidade em situações de acumulação de tráfego e congestionamento (Ortúzar & Willumsen, 2011).

Contudo, este modelo apresenta inconsistências, o modelo é influenciado pela ordem que os volumes dos pares da matriz origem-destino são carregados à rede. A forma como se efetua a divisão da matriz total nas matrizes parcelares é a razão para tal, sendo que, dependendo da dimensão da mesma, há um número grande de hipóteses de divisão, sendo que todas podem vir a protagonizar variados volumes nos arcos.

2.2.3.3. Estocástico puro

Os modelos estocásticos tentam reproduzir a variabilidade de perceção de custos por parte dos diferentes utilizadores. Na questão do modelo estocástico puro, os elementos da rede não são submetidos às restrições de capacidade, pelo que o modo de escolha de percurso é baseado nos custos generalizados percebidos variáveis dos arcos, ao invés dos custos generalizados “reais”, tornando-se assim independentes do fluxo atribuído.

Desta forma, é possível verificar que para um determinado número de percursos, a distribuição de viagens se procede de forma a que os percursos “ótimos”, vão ser atribuídos com a percentagem maioritária do tráfego, porém, ao contrário do modelo “tudo-ou-nada”, não vão comportar a sua totalidade (Rojo, 2020).

Assim, há duas metodologias para a introdução desta variabilidade: baseado na simulação e baseado em proporções.

A técnica de simulação Monte-Carlo gera e distribui para todos os veículos um custo percebido aleatório. Numa primeira instância, é definido um “custo generalizado real” a cada arco da rede, que é definido como o custo médio, Figura 2.9. Neste ponto, os modelos podem variar quanto à lei de distribuição de custo, podendo fazer uso de uma função de distribuição uniforme ou até de distribuição normal. Porém, pressupõe-se a atenção a um parâmetro que deve ser fixado e calibrado, designado pelo desvio de custos em relação ao custo médio, seja para valores de custo menores, seja maiores. Quanto maior for este desvio, mais elevado será o número de percursos possivelmente selecionados. Após a definição do valor da variável, que é independente entre todos os utilizadores, cada utilizador faz a escolha do caminho mínimo associado ao seu custo percebido (Tavares, 2003).

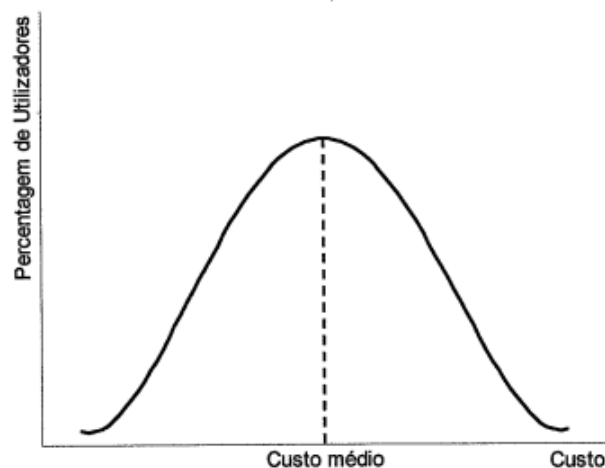


Figura 2.9 – Exemplo de distribuição dos custos generalizados percebidos. Fonte: (Tavares, 2003)

No método das proporções, como o nome sugere, o volume de viagens atribuídos a um percurso particular é igual à sua probabilidade de escolha, que é calculado através de um modelo de escolha do tipo *logit* ou *probit*. Quanto menor for o custo generalizado de um percurso comparativamente aos alternativos, maior é a probabilidade de ser escolhido.

De acordo com Dial, que faz uso da formulação *logit*, o número total de viagens entre o par de zonas O/D no percurso r , T_{OD}^r , é definido por:

$$T_{OD}^r = T_{OD} \frac{e^{-\theta c_{OD}^r}}{\sum_k e^{-\theta c_{OD}^k}} \quad (2.6)$$

Com:

- T_{OD} – Número total de viagens entre o par O/D;
- C_{OD}^r – Custo do percurso r ;
- C_{OD}^k – Custo do percurso k , um percurso “razoável”;
- θ – Parâmetro de dispersão.

Na Figura 2.10, apresenta-se um exemplo da afetação estocástica “pura”, numa rede em que o volume de procura entre as zonas 1 e 4 define-se com um valor aleatório de 1000 veículos. Os valores dos custos foram definidos aleatoriamente, de modo a replicar uma situação em que a aplicação desta afetação proporcione resultados que destaquem as propriedades da mesma. Em conformidade com os pressupostos do modelo, o volume total atribuído à rede não vai ser completamente carregado no percurso com menor custo, ou “caminho mais curto”, definido pelos nós 1-3-4.

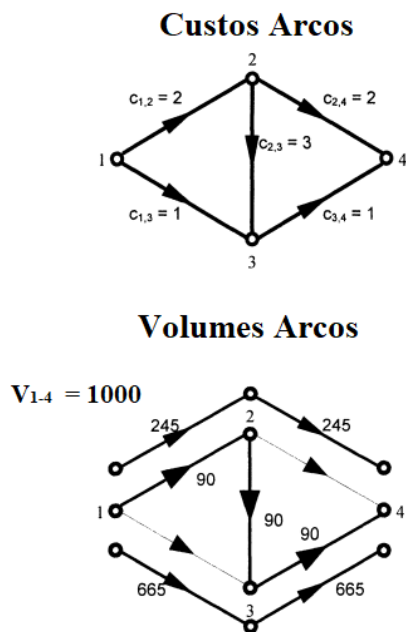


Figura 2.10 - Atribuição estocástica. Adaptado de (Cascetta, 2001)

Calculando os custos totais dos percursos:

$$C_{1-3-4} = C_{1,3} + C_{3,4} = 1 + 1 = 2 \quad (2.7)$$

$$C_{1-2-4} = C_{1,2} + C_{2,4} = 2 + 2 = 4 \quad (2.8)$$

$$C_{1-2-3-4} = C_{1,2} + C_{2,3} + C_{3,4} = 2 + 3 + 1 = 6 \quad (2.9)$$

Este exemplo usa o método matemático ou da divisão de partes, logo os custos dos percursos é que têm relevância. Assim, verifica-se que a maioria do tráfego é atribuído à de menor custo, cerca de 67%. No percurso 1-2-4, que representa o dobro do custo do percurso menor, cerca de 25% do tráfego é atribuído. Por fim, no percurso com maior custo, cerca do triplo do custo, é atribuído 9% do volume total.

2.2.3.4. Equilíbrio do sistema

O método do equilíbrio do sistema deriva de suposições que são significativamente diferentes das subjacentes a modelos de equilíbrio do utilizador. A sua utilização vai de encontro a um ideal de otimização do sistema inerente à rede. De facto, é assumido que os utilizadores “cooperam” para minimizar o custo total do sistema ou rede, ao invés de minimizar o seu custo individual como acontece no equilíbrio do utilizador. O problema de afetação resultante é geralmente diferente em redes congestionadas; é igual a modelos determinísticos em redes não congestionadas. Porém, é notado que sob tais suposições, alguns utilizadores podem seguir um percurso que suporte um custo percebido maior do que o custo mínimo.

Esta condição, expressa que “o custo total de uma rede é mínima”, que é acordada pelo segundo princípio de Wardrop, como já referido, é conhecida como a Otimização do Sistema (*System Optimum – SO*).

O conhecimento dos fluxos ótimos do sistema pode ser útil como um elemento de referência na análise de redes congestionadas. De facto, embora os pressupostos comportamentais subjacentes a modelos de equilíbrio de sistema não sejam realistas para a simulação do comportamento individual do condutor, os custos e fluxos dos arcos e percursos provenientes deste tipo de modelos correspondem a valores que os instrumentos de controlo de tráfego (regulação por sinalização luminosa, preços, etc.) possam ter como objetivo.

Para além disso, com a existência de um sistema com a capacidade de guiamento dos veículos pelos percursos, a incorporação deste modelo de equilíbrio da rede no hipotético sistema traz vantagens para a otimização da rede. Porém, apenas em situações de perfeita “cooperação” entre todos os utilizadores, como em situações de redes de circulação exclusiva de unidades autónomas, sem a capacidade de decisão de percurso que favoreça a minimização de custo individual, esta situação seria viável (Cascetta, 2001).

2.2.3.5. Equilíbrio determinístico do utilizador

Os métodos de equilíbrio requerem iterações e o recálculo de tempos de percurso. Há uma dependência entre os volumes de tráfego nos arcos e os seus custos percebidos generalizados. Apesar de um esforço computacional adicional, estes são caracterizados pelos resultados mais fiáveis.

O modelo de equilíbrio do utilizador (*Deterministic User Equilibrium*) é obtido pela aplicação do princípio de equilíbrio em redes com restrição de congestionamento, sob o comportamento determinístico na escolha de percurso e a classificação estática da procura na rede.

O modelo baseia-se no primeiro princípio de Wardrop e tem como fundamento principais pressupostos:

- Todos os utilizadores têm conhecimento perfeito da rede, assim como os custos associados a todos os seus elementos;
- Os utilizadores escolhem a melhor rota de acordo com o princípio de equilíbrio;
- Os utilizadores atribuem o custo aos arcos e percursos da mesma forma.

Matematicamente, estes pressupostos do modelo podem ser transcritos segundo as seguintes equações:

Em ordem a minimizar a função objetiva:

$$Z = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(x_a) dx \quad (2.10)$$

Aplica-se:

$$\sum_k f_k^{od} = q_{od} : \forall o, d \quad (2.11)$$

$$x_a = \sum_o \sum_d \sum_k \delta_{a,k}^{od} f_k^{od} : \forall a \quad (2.12)$$

$$f_k^{od} \geq 0 : \forall k, o, d \quad (2.13)$$

$$x_a \geq 0 : a \in A \quad (2.14)$$

Onde:

- x_a – Fluxo de veículos no arco x ;
- $t_a(xa)$ – Função custo-volume do arco x ;
- f_k^{od} – Fluxo de veículos no percurso k ;
- q_{od} – Fluxo total de veículos entre as zonas origem-destino.

As equações referidas (2.13) e (2.14) são restrições de conservação do volume e de não negatividade, respetivamente, de modo a minimizar a função objetiva.

Os percursos que ligam os pares O/D podem ser divididos em duas categorias, com e sem tráfego atribuído, cujo custo generalizado é superior ao custo mínimo. Se esta condição for obedecida, a rede encontra-se em equilíbrio e nenhum utilizador consegue alterar o seu custo, conseqüentemente o seu tempo de percurso (Sheffi, 1984).

2.2.3.6. Equilíbrio estocástico

(DAGANZO & SHEFFI, 1977) estenderam a condição do equilíbrio do utilizador ao princípio do equilíbrio estocástico:

“Numa rede de equilíbrio do utilizador estocástico nenhum utilizador acredita que pode melhorar o seu tempo de viagem alterando o seu percurso unilateralmente”.

Em comparação com o modelo de equilíbrio determinístico, existem mais percursos com atribuição de tráfego, mesmo em redes com baixa procura, isto porque a procura é também distribuída a percursos alternativos, mesmo não sendo os que proporcionem máxima otimização na sua circulação entre dois pontos. Esta distribuição é realizada através de modelos de distribuição. Em todo o caso, esta propriedade retrata uma proximidade maior à realidade do que a aplicação restrita do primeiro princípio de Wardrop, estando, no entanto, dependente do tipo de rede.

O modelo de equilíbrio do utilizador estocástico, (*stochastic user equilibrium*), é obtido pela aplicação do princípio do equilíbrio a redes com restrições de congestionamento sobre a suposição de um comportamento de escolha de percurso com fundamentos probabilísticos.

Os modelos estocásticos e determinísticos proporcionam resultados similares em casos de redes muito congestionadas. A proximidade entre os modelos de equilíbrio determinísticos e estocásticos implicam que, em redes bastante saturadas, é possível o equilíbrio determinístico do utilizador ao invés do estocástico. Em termos práticos, esta troca traz vantagens em termos de facilidade e simplicidade de modelação, contudo denota-se que o mesmo não desempenha um papel idêntico ao estocástico em aplicações como em redes pouco congestionadas ou em redes não uniformemente carregadas (Cascetta, 2001).

2.2.3.7. Métodos dinâmicos

Os métodos dinâmicos (*Dynamic Traffic Assignment – DTA*), como já referidos anteriormente introduzem a variável temporal na modelação de tráfego e têm a capacidade de simular as características dinâmicas do fluxo de tráfego.

A modelação de métodos de afetação dinâmicos é um dos problemas mais desafiantes no âmbito dos transportes. A necessidade de modelos de tráfego fiáveis que possam ser eficazmente

resolvidos também para grandes redes, está constantemente a aumentar. Uma vez reconhecida a limitação da abordagem estática, o DTA é visto por cada vez mais peritos como uma ferramenta fundamental para a análise, principalmente de redes congestionadas, em dois casos de utilização distintos: para fornecer simulações na criação e gestão de uma rede e para fornecer previsões a curto prazo de fluxos e velocidades (Hu et al., 2018).

O foco principal da implementação prática deste tipo de modelos tem sido a preparação de dados e calibração dos dados de entrada, *inputs*, relacionadas à procura e oferta, incluindo as matrizes de procura O/D dependentes do tempo, a geometria de rede, tempo de sinal dos sinais luminosos e parâmetros do fluxo de tráfego.

Dependendo do tipo de estudo, os modelos podem ser aplicados a sistemas em que o período de análise decorra apenas durante algumas horas, durante um dia inteiro, ou mesmo durante vários dias, no caso do estudo do comportamento do tráfego em dias específicos, com particularidade nos fins-de-semana. Os sistemas abordados são os sistemas ao longo de um dia, “*within-day dynamic systems*”, que têm atraído um acrescido interesse (Cascetta, 2001).

Os modelos dinâmicos, tal como os estáticos, podem ou não ter associadas restrições de capacidade, assim como podem assumir propriedades estocásticas ou determinísticas. Porém, este tipo de modelos está bastante associado a processos de obtenção de soluções, a partir da simulação.

Os modelos DTA baseados na simulação normalmente envolvem um grande número de parâmetros que precisam ser calibrados sistematicamente. A sua calibração geralmente visa minimizar a discrepância entre os padrões de tráfego observados e simulados na rede. Com o aumento da disponibilidade de dados de tráfego grandes e de várias fontes, existe uma oportunidade única para melhorar os processos existentes de calibração e validação de modelos de tráfego (Bliemer et al., 2013).

3

CONSTRUÇÃO DO MODELO EM VISUM

3.1. INTRODUÇÃO AO SOFTWARE VISUM

Neste capítulo são introduzidas as características da ferramenta de modelação utilizada ao longo da dissertação, bem como todos os parâmetros selecionados e calibrados. Também é explicado o funcionamento dos algoritmos dos modelos de afetação selecionados para a futura aplicação às redes em estudo.

O VISUM é um programa da empresa PTV, (*PTV Visum Manual*, 2020), que se destina ao planeamento de transporte assistido por computador, e que serve para analisar e planear um sistema de transporte, correspondendo assim a uma ferramenta de apoio à decisão. Permite a modelação de tráfego de acordo com a abordagem do modelo 4 passos, já referido no capítulo 2. Este oferece uma vasta gama de abordagens de atribuição e afetação de tráfego tanto para o transporte público como para o transporte privado (Piątkowski & Maciejewski, 2013).

O primeiro passo no desenvolvimento de um modelo é a definição do nível de detalhe a ser utilizado que, no caso da presente dissertação, vai ser realizado a um nível macroscópico. Tendo presente os objetivos do trabalho, a ferramenta de trabalho VISUM dispõe de um número vasto de modelos de afetação de tráfego, nomeadamente:

1. Modelo incremental;
2. Modelo de equilíbrio;
3. Modelo de equilíbrio *Lohse*,
4. Modelo de equilíbrio Bi-conjugado *Frank-Wolfe*;
5. Modelo do equilíbrio do utilizador com custo linear (LUCE);
6. Modelo estocástico;
7. Modelo com análise da capacidade de interseção (ICA);
8. Modelo dinâmico de equilíbrio do utilizador;
9. Modelo dinâmico estocástico;
10. Modelo dinâmico baseado na simulação.

3.2. MODELAÇÃO DE UMA REDE VIÁRIA DE TRANSPORTES

Para o desenvolvimento de uma rede viária é necessária a representação dos seus variados elementos.

Deste modo, o primeiro elemento a definir são as zonas, (“zones”). Estes elementos tomam especial importância por produzirem e atraírem todas as viagens relativas à rede. Não obstante, estes elementos tipicamente descrevem lugares ou serviços, representativos de habitações, no âmbito de entidade geradora de tráfego, ou representação de espaços de emprego, comércio, ou serviços públicos, no âmbito de entidades criadoras de fluxo.

Estas podem ser divididas em dois tipos: as zonas “internas” e as zonas “externas”. Às zonas internas são atribuídos limites e estendem-se espacialmente, formando polígonos. O seu tamanho pode variar consoante o nível de detalhe do modelo, porém o tamanho não tem influência nos resultados dos modelos de afetação. Dentro da área, a zona é caracterizada por um ponto centroide que faz a ligação aos conectores, que geralmente se localiza no centro geográfico da zona. As zonas externas tipicamente são zonas de ligação a outras redes ou têm o propósito de fazer a ligação às zonas internas.

Na Figura 3.1 é possível identificar a zona interna delimitada pela área a azul, com o seu centroide na zona central e três zonas exteriores.

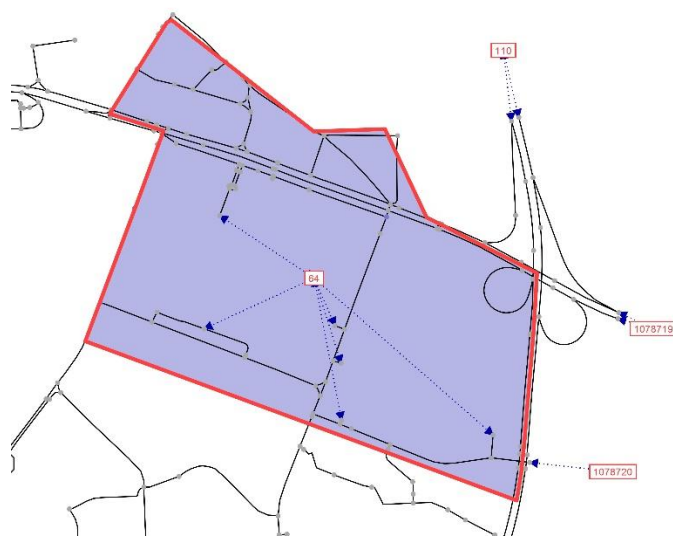


Figura 3.1 - Representação de zonas internas e externas no VISUM

Os conectores, (*connectors*) são elementos caracterizados como arcos “fictícios”, que fazem a ligação das zonas à rede, especificamente aos nós. Um conector pode ser definido como uma rota de entrada e/ou saída ao centroide da zona. Uma zona tem necessariamente de ter um conector associado, porém, não tem exclusividade ao mesmo e pode ter um número variável de conectores associados, tendo em conta que estes precisam sempre de assegurar a entrada e/ou saída de veículos na zona em questão.

Os nós (*nodes*) são os elementos representativos das interseções da rede, permitindo também realizar a ligação entre arcos e conectores. São nestes pontos que se realizam os movimentos de mudança de direção, de arco para arco, sendo que a codificação da sua geometria permite definir a permissão ou proibição de mudança de direção, assim como a prioridade destes movimentos, considerando o número de vias dos arcos ligados ao nó. O nível de detalhe do estudo em questão dita a complexidade dado que este elemento deve ser modelado. Estudos microscópicos exigem uma modelação muito mais complexa do que modelos macroscópicos.

São nestes elementos também que é introduzido o tipo de controlo de tráfego nas interseções, podendo ser classificados como: interseção com sinal luminoso, interseção prioritária com ou sem sinalização, rotunda ou mesmo interseção não controlada.

Os arcos (*links*) fazem a ligação entre os nós, são segmentos de via entre cada cruzamento e podem ter comprimentos variáveis. No sentido da presente dissertação, este é o elemento mais importante pois é onde os modelos de afetação vão atribuir o tráfego proveniente da matriz O/D.

Assim, este é definido com uma variedade de atributos, dos quais se destacam, as seguintes características:

- Os modos de transporte que são permitidos circular;
- O número de vias;
- Comprimento;
- Nó inicial e final;
- Sentido.

Quanto às variáveis de funcionamento:

- Capacidade, em veículos por intervalo de tempo;
- Modo de transporte permitido;
- Velocidade em regime livre;
- Velocidade de percurso.

Tempo de percurso, em regime livre, um dos principais aspetos na modelação em *VISUM* é as unidades que as variáveis são definidas. No caso da capacidade das vias e do volume de tráfego, as unidades estabelecidas são em função de um intervalo de tempo. Excetuando nos modelos dinâmicos, em que a o tempo é variável, o intervalo definido para os restantes modelos irá ser fixado em 1 hora.

3.3.VARIÁVEIS E PARÂMETROS

3.3.1.TEMPO DE PERCURSO

Na análise de redes, o tempo de percurso num arco é uma variável chave que tem uma grande influência na escolha do percurso e distribuição de viagens. Uma estimativa correta desta variável constitui um elemento fundamental na previsão e avaliação de alternativas.

Em redes com restrições de capacidade, o tempo de percurso dos arcos e os tempos dos movimentos de mudança de direção nos nós, quando aplicável, são calculadas a partir das denominadas funções volume/atraso (*Volume-Delay Functions - VDF*).

No modelo *VISUM* estão disponíveis um grande número de funções para o cálculo e estimação do tempo de percurso em função do volume, dentro das quais se destacam (Figura 3.2): a função *BPR (Bureau of Public Roads)*, a função cónica de volume/atraso, o modelo de Singapura, o modelo *Skabardonis-Dowling* e a fórmula *HCM (Highway Capacity Model)*.

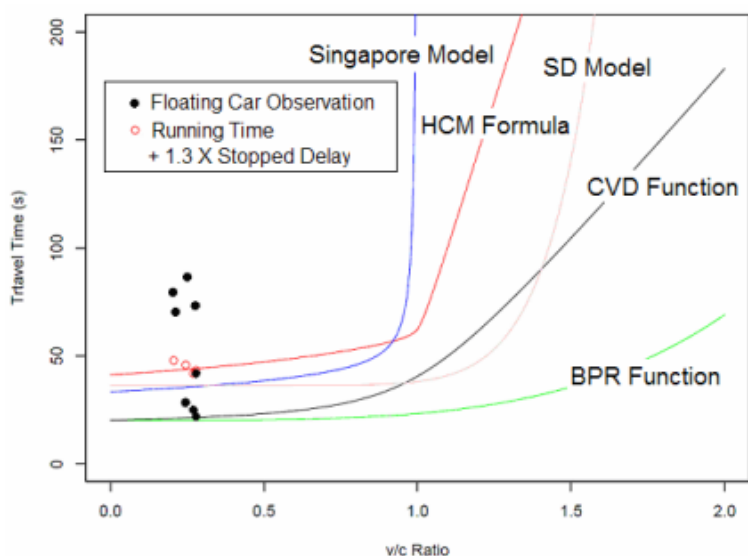


Figura 3.2 – Comparação entre modelos na estimação de tempos de percurso. Fonte: (Davis & Xiong, 2007)

A função BPR encontra-se entre as mais utilizadas uma vez que a sua simplicidade de definição e percepção corrobora a sua utilização. Esta foi desenvolvida no final da década de 50, a partir de dados observados em autoestradas não congestionadas. Uma das suas propriedades é a não consideração de sinais de trânsito. Quando o volume é consideravelmente baixo, o tempo de percurso previsto é aproximadamente igual ao tempo de percurso em regime livre.

Nesta função, o tempo de percurso é assumido como uma relação não-linear com a relação de volume/capacidade. A sua forma padrão e as suas variações têm sido amplamente utilizadas nas aplicações de modelos de tráfego. A função designada no programa, que coincide com a padrão é:

$$t_{cur} = t_0 \cdot \left(1 + a \cdot \left(\frac{q}{q_c \cdot c} \right)^b \right) \quad (3.1)$$

Com:

- t_{cur} – Tempo de percurso;
- t_0 – Tempo de percurso em regime livre;
- q – Volume de tráfego do arco;
- q_c – Capacidade de tráfego do arco;
- a , b e c – Parâmetros.

A função pode ser calibrada pela definição de três parâmetros (a, b, c): o coeficiente ‘ a ’ é responsável pela relação entre a velocidade livre e a velocidade na capacidade, o coeficiente ‘ b ’ é responsável pela forma da curvatura e o coeficiente ‘ c ’ pelo ajustamento do valor da capacidade do arco, refletindo a relação entre as capacidades prática e real.

No decorrer dos casos de estudo que vão ser apresentados no capítulo seguinte, os valores dos coeficientes da função foram adaptados ao objetivo do problema, realizando-se assim um processo de calibração do modelo.

No presente trabalho foi fixado o valor de 1 para o coeficiente ‘c’, considerando assim os valores dos volumes da capacidade aproximados à capacidade prática.

O tempo de percurso é dependente da velocidade média, sendo estas duas variáveis diretamente proporcionais. Por conseguinte, as funções designadas de tempo de percurso podem ser reescritas em função da velocidade, que permite uma leitura mais “real” da sua variação. Uma vez que a velocidade (U) é igual à distância percorrida (D) e o tempo de percurso (T), $U = \frac{D}{T}$, em conformidade com a equação (3.2), a seguinte formulação pode ser obtida:

$$U = \frac{U_o}{1 + a \cdot \left(\frac{q}{q_c \cdot c}\right)^b} \quad (3.2)$$

Considerando as variáveis U a velocidade média, U_o a velocidade em regime livre e q o volume.

Assim a partir da função de velocidade U , foram criados 3 cenários para a análise dos parâmetros ‘a’ e ‘b’. Em cada caso é fixado o valor do coeficiente ‘a’, na Figura 3.3 ao valor 0.5, na Figura 3.4 apresenta o valor 1 e na Figura 3.5 o valor de 2. Em cada figura, 5 curvas estão representadas variando o parâmetro ‘b’ entre os valores: 2; 4; 6; 8 e 10. A forma das curvas representa a variação de velocidade a um progressivo carregamento da rede, sendo o ponto inicial e final coincidente representando, respetivamente, uma velocidade de 50 km/h em regime livre e uma velocidade em regime de congestionamento da rede, variando com os diferentes valores da variável ‘a’.

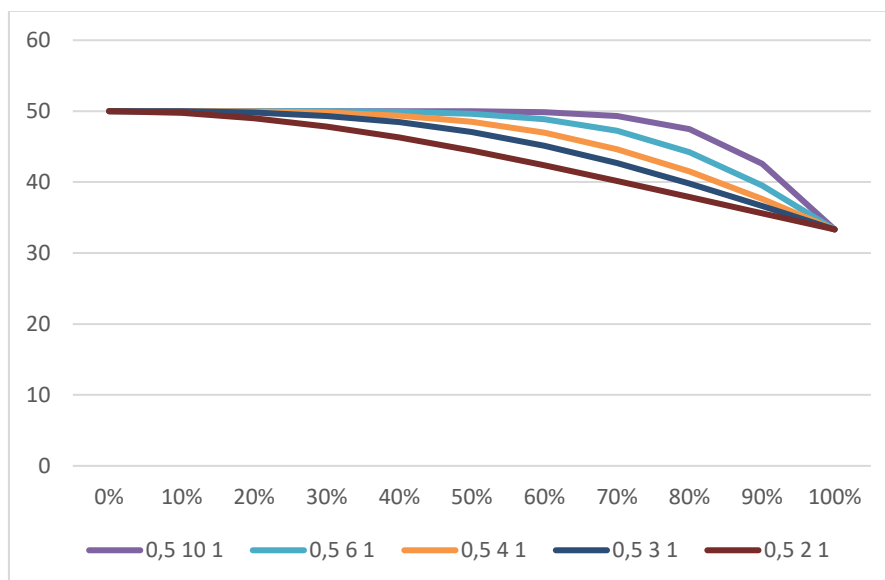


Figura 3.3 - Cenário 1

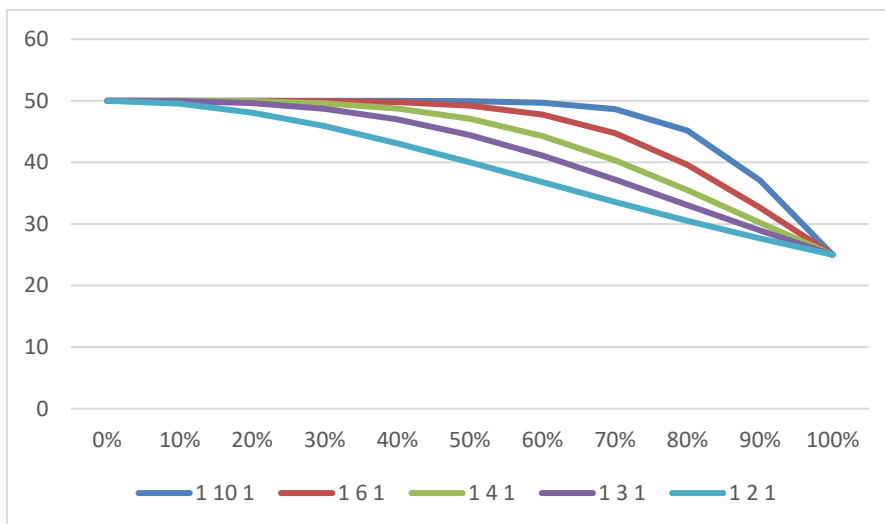


Figura 3.4 - Cenário 2

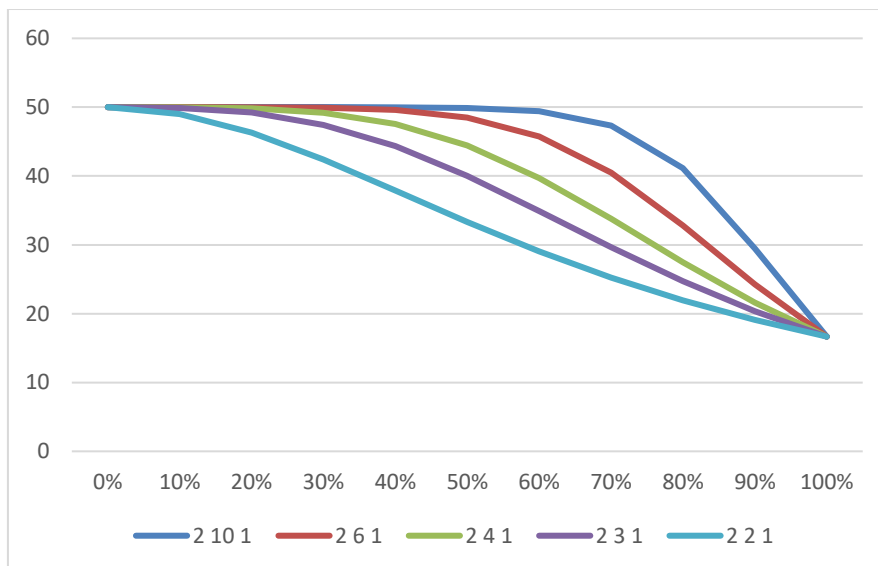


Figura 3.5 - Cenário 3

Comparando as 3 situações, há 3 aspectos a analisar: a velocidade na situação de rede congestionada (100% volume), influenciada pelo parâmetro ‘a’ e a variação da curva, influenciada pelo parâmetro ‘b’.

Quanto à análise do parâmetro ‘a’, em cada caso diferentes velocidades em regime de congestionamento são obtidas, cujos valores aproximados estão representados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Velocidades em congestionamento para os valores do parâmetro "a"

Cenário	Velocidade em congestionamento
1	≈ 34 km/h
2	≈ 26 km/h
3	≈ 18 km/h

Observe-se, como já referido, que o valor do parâmetro “a” foi fixado em 1.

Quanto ao parâmetro ‘b’, a forma como faz variar a velocidade em função da percentagem de carregamento da rede, denota-se uma similaridade entre os 3 cenários. Com valores reduzidos do parâmetro, a curva apresenta um comportamento de diminuição da velocidade quase linear em todo o carregamento, oposto a valores elevados do coeficiente, que mantém a velocidade em regime livre até a um carregamento de aproximadamente 60 % da capacidade das vias, havendo uma grande variação até ao ponto de congestionamento. Foi considerado um coeficiente intermédio com o valor 4, por traduzir uma variação mais aproximada da realidade.

3.3.2.CUSTO GENERALIZADO / IMPEDÂNCIA

A ferramenta VISUM tem uma designação própria para a avaliação da função anteriormente mencionada do “custo generalizado” percebido, designando-a como impedância (*impedance*).

Em engenharia de tráfego, o termo impedância tem um significado específico que define que “a impedância dos veículos ocorre sempre que dois veículos não prioritários aguardam simultaneamente por uma oportunidade para avançar. O intervalo de tempo entre veículos prioritários sucessivos aceitável apenas poderá ser utilizado por um deles, sendo que avança em primeiro lugar aquele que pertencer ao nível hierárquico superior”.

No contexto da simulação de tráfego, segundo (PTVVisum2020 Manual), no VISUM a função de impedância designa um “esforço” ou custo generalizado a cada percurso, assim dependendo do tipo de afetação, qual o arco que o utilizador deve seguir, caso decida percorrer o percurso escolhido. No transporte privado as variáveis da função mais usuais são o tempo de percurso, que tem associado o tempo, predefinido em segundos, como unidade correspondente e a distância percorrida, predefinido em metros. Para além destas variáveis, o programa oferece liberdade para a integração de critérios adicionais, subjetivos ao estudo em questão, como a despesa de possíveis portagens e/ou outras despesas de viagem. Para modelos dinâmicos, é comum a adição da variável que descreve a discrepância entre a hora de partida e a hora de partida desejada.

Especialmente no transporte privado, o tempo de percurso de um arco não é constante, mas depende do volume de tráfego associado ao mesmo, esta coerência é descrita na função volume-atraso (*VDF*) previamente mencionado.

Em suma, o que esta função vai calcular é o “custo generalizado” de cada elemento definido no modelo. Da mesma forma que foi introduzido no capítulo 2, esta função tem associados coeficientes para cada variável introduzida, definidos à priori, que vai definir a importância que cada atributo vai exercer no estudo. Doravante no presente trabalho, o termo impedância vai ser referente a este contexto.

A formulação essencial da função de impedância para um determinado arco i pode ser resumida da seguinte forma:

$$I_i = \alpha \cdot t_{cur} + \beta \cdot d_i + \gamma \cdot toll \quad (3.3)$$

Sendo:

- I_i – Impedância do arco i ;
- t_{cur} – Tempo de percurso, em segundos;
- d – Comprimento do arco i , em metros;
- $toll$ – Custo de portagem;
- α, β, γ – Coeficientes.

No contexto do estudo do transporte privado em redes a ser apresentadas no capítulo 4, é necessário o cálculo e definição dos valores dos coeficientes α e β , valores indispensáveis no programa para o avanço do estudo, considerando primeiramente a não utilização da variável da portagem, $toll$, pela não existência nas redes em estudo.

As unidades das variáveis usadas foram inalteradas em relação às predefinidas pelo programa, caracterizam-se por segundos e metros nas variáveis tempo de percurso e comprimento do arco respetivamente.

A determinação dos valores definidos teve por base uma premissa: que o custo do utilizador percorrer um percurso com X quilómetros em Y minutos (1) é igual ao custo de um percurso com $(X+1)$ quilómetros em $(Y-1)$ minutos (2). Simplificadamente, um condutor admite adicionar mais um quilómetro à sua viagem na medida que demora um minuto a menos a terminá-la.

Para isso foram definidas 2 situações (Figura 3.6) num cenário hipotético com o pressuposto que o utilizador viaja a uma velocidade constante de 50 km/h, definida como o limite de velocidade dos veículos ligeiros dentro de uma localidade.

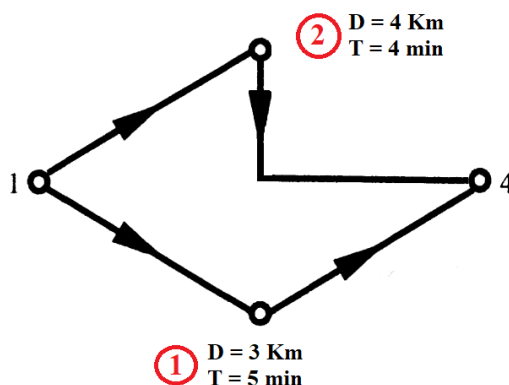


Figura 3.6 - Exemplo de duas situações de percurso distintas

1. Uma viagem de 3 quilómetros tem a duração de 217,5 segundos;

2. Uma viagem de 4 quilômetros que tem a duração de 157,5 segundos.

Assim, associando um valor de impedância fixo 10000:

$$\begin{cases} 10000 = \alpha \cdot 217.5 + \beta \cdot 3000 \\ 10000 = \alpha \cdot 157.5 + \beta \cdot 4000 \end{cases} \quad (3.4)$$

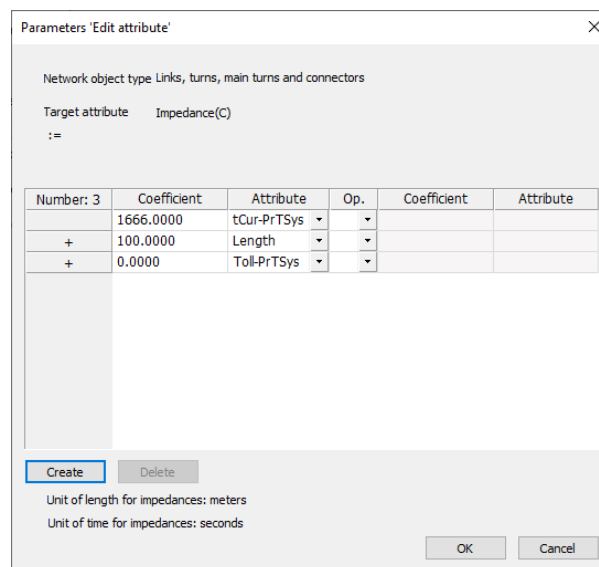
O resultado do sistema de equações resultou em: 25,16 para α e 1.56 para β .

Como o valor da impedância foi definido aleatoriamente, os valores dos coeficientes estão diretamente associados a este valor, embora a razão entre os dois deve permanecer a mesma. Pelo que a grandeza dos valores resultantes dos coeficientes é demasiado baixa para uma correta diferenciação para elementos com valores de impedância aproximada, foi fixada o valor do coeficiente $\beta = 100$ mantendo a razão entre os resultados o valor do coeficiente $\alpha = 1666$.

A função da impedância fica completamente definida com os valores apresentados na Figura 3.7:

- Coeficiente do tempo de percurso no arco ($t_{CUR-PrTSys}$) com o valor de 1666.
- Coeficiente do comprimento do arco ($Length$) com o valor de 100.
- Coeficiente da despesa com a portagem com o valor 0.

Devido às diferentes unidades destas variáveis (segundos, metros e unidades monetárias por tempo e distância), a impedância fica caracterizada por uma unidade monetária.



Parameters 'Edit attribute'

Network object type Links, turns, main turns and connectors

Target attribute Impedance(C)

:=

Number:	Coefficient	Attribute	Op.	Coefficient	Attribute
	1666.0000	tCur-PrTSys			
+	100.0000	Length			
+	0.0000	Toll-PrTSys			

Create Delete

Unit of length for impedances: meters

Unit of time for impedances: seconds

OK Cancel

Figura 3.7 - Parâmetro impedância no (PTV Visum Manual, 2020)

3.4.MODELOS DE AFETAÇÃO

3.4.1.MODELO INCREMENTAL

A matriz origem-destino definida ao modelo é afetada incrementalmente à rede em diferentes proporções da mesma, sendo neste processo a procura proporcionalmente distribuída sobre o número de iterações definido à priori, tendo um número máximo de 12. Por predefinição do programa, o modelo divide em 3 iterações a afetação da matriz, 33% da matriz é carregada no

primeiro e segundo passo e 34% no terceiro e último. Por razões de simplificação e para que o número de iterações não seja grande e crie possibilidade de enviesamento dos resultados, vão ser mantidas as três iterações nas redes de estudo.

Numa primeira atribuição da procura à rede, os tempos de percurso dos utilizadores são em regime livre, ou seja, numa rede livre de tráfego e a distribuição é pelos “caminhos mais curtos” entre cada par origem-destino. A partir daí é realizada um sucessivo carregamento da rede, em cada passo são adicionados veículos aos arcos que vai aumentar o congestionamento dos mesmos e que conseqüentemente aumenta o custo generalizado seja dos arcos, nós e viragens. Pela alteração dos custos da rede, alternativos “caminhos mais curtos” são descobertos a cada passo do método.

O procedimento do algoritmo pode-se resumir ao apresentado na figura seguinte.

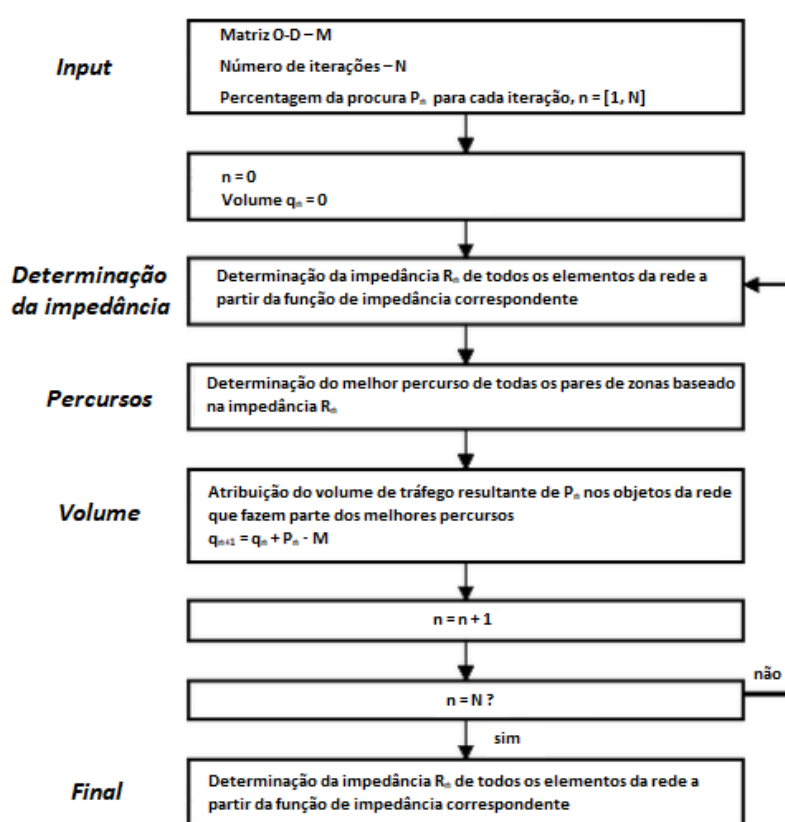


Figura 3.8 - Algoritmo do modelo incremental. Adaptado de: (PTV Visum Manual, 2020)

O progressivo carregamento da rede com matrizes parcelares provenientes da matriz original origem-destino, pode ser comparada com um modelo dinâmico. Contudo, são enumeradas algumas desvantagens que se consideram decisivas na escolha do método incremental, sendo estas:

- O número e dimensão das matrizes parciais têm uma importância grande na viabilidade e a qualidade dos resultados do modelo, sendo, no entanto, de referir que não existe nenhum procedimento para obter matrizes parciais “ótimas”.

- O algoritmo do programa termina após o número de iterações previamente definidos terem sido executados, sem haver uma verificação da correspondência entre o volume de tráfego e a impedância dos arcos da rede.

3.4.2. MODELO DE EQUILÍBRIO

O modelo de equilíbrio baseia-se inicialmente no modelo incremental para o cálculo da solução inicial. Na iteração seguinte, o sistema procura percursos alternativos com os menores valores de impedância. Se for encontrado um novo percurso para um determinado par de zonas, o sistema transferirá os veículos para esses novos percursos. Este fenómeno tem um efeito imediato na impedância dos elementos da rede, pelo que o *VISUM* recalcula o estado da rede. O procedimento termina se for atingido um estado de equilíbrio, segundo o princípio de Wardrop, após sucessivas iterações o que significa que não há mais veículos a serem transferidos entre os demais percursos (Piątkowski & Maciejewski, 2013).

O algoritmo faz uso de dois ciclos de iterações: um interno para a transferência de veículos entre os percursos para atingir o equilíbrio; um ciclo externo responsável pela procura de percursos com valores reduzidos de impedância.

Os processos iterativos terminam quando umas das condições é verificada:

- O equilíbrio na rede é alcançado;
- O algoritmo não converge antes do número de iterações máximas definidas, sendo apresentado a solução da última iteração.

3.4.3. MODELO ESTOCÁSTICO

Ao contrário do modelo de equilíbrio, o modelo estocástico assenta numa distribuição probabilística, sendo sujeito a uma aleatoriedade que deriva, por exemplo, do hábito e das preferências de cada condutor. É claro, desta forma, que a solução do modelo estocástico não é única. Definido o tipo de modelo a utilizar, há que identificar os seus parâmetros para que a afetação origine resultados válidos. Entre os vários processos que devem ser calibrados, destaca-se a escolha dos parâmetros associados diretamente ao algoritmo de afetação e o processo de estimação da procura, que será desenvolvido com base num algoritmo proprietário do *VISUM*.

O modelo de distribuição dos modelos estocásticos determina a percentagem de procura que é distribuída entre os percursos de um determinado par O/D. Esta porção depende da impedância dos percursos, que é calculado através do carregamento do volume de procura na rede.

O algoritmo deste modelo funciona através de dois ciclos de iterações, o primeiro mais geral e externo, e um ciclo interno.

Durante a procura de percursos, o número de possíveis rotas é aumentado para que não sejam só selecionados os “caminhos mais curtos”. Rotas alternativas são definidas através duma procura múltipla dos melhores percursos através da variação da impedância dos arcos. Esta fase representa um primeiro ciclo de iterações do algoritmo, que se efetua na procura de todas as possibilidades de percurso entre todos os pares O/D, através da variação da impedância do percurso mais curto, considerado como o valor médio que é introduzido numa função normal em que o desvio padrão é calculado a partir da fórmula:

$$\sigma = 8 \cdot R^{0.5} \quad (3.5)$$

Representando R a impedância mínima do menor percurso. De seguida é realizada uma correção, eliminando-se as rotas que apresentam impedâncias e tempos de percurso demasiado elevados para serem considerados como um trajeto admissível para escolha. São eliminadas as rotas que cumpram os seguintes requisitos:

$$R_i > a \cdot R_{min} + b \quad (3.6)$$

$$t_0 > c \cdot t_{0,min} + d \quad (3.7)$$

Sendo:

- R_i – impedância do percurso alternativo;
- R_{min} – impedância do percurso “mais curto”;
- t_0 – tempo de percurso na rede em regime livre, do percurso alternativo;
- $t_{0,min}$ - tempo de percurso na rede em regime livre, do percurso “mais curto”;
- a, b, c, d – parâmetros.

Este ciclo externo termina quando o número de iterações termina, $n = N$, e/ou até não ser possível descobrir mais percursos alternativos.

Em simultâneo com o ciclo externo, o segundo ciclo entra em função, tendo como objetivo a atribuição dos volumes provenientes da matriz O/D aos percursos que vão sendo obtidos do primeiro ciclo.

Um dos processos fulcrais para este modelo é o processo de distribuição de tráfego que vai dividir o volume que circula do ponto origem ao ponto destino através da atribuição de uma percentagem a cada alternativa. Em todos os casos, a percentagem P_i do percurso i , é determinada baseando-se no volume de procura entre cada par O/D, mais propriamente na impedância do percurso, R_i , que é introduzido na função de distribuição através da criação de uma nova variável, a variável de utilidade U_i (*utility*).

A utilidade de um percurso é calculada em função da impedância do mesmo:

$$U_i = f(R_i) \quad (3.8)$$

A percentagem atribuída ao percurso i , de um determinado par O/D é calculada por:

$$P_i = \frac{U_i}{\sum U_i} \quad (3.9)$$

A ferramenta faz uso de cinco modelos de distribuição que possuem funções próprias de utilidade, enumerando-se os modelos:

1. *Kirchhoff*;
2. *Logit*;
3. *Box-Box*;
4. *Lohse*;
5. *Lohse* com variável beta.

O modelo que é utilizado pela ferramenta por predefinição é o modelo *Kirchhoff*, em que a proporção entre as várias impedâncias é um fator decisivo para a escolha de rota. Na Tabela 3.2 são demonstrados três exemplos na escolha entre dois percursos com variados valores de impedância, sendo que os cinco modelos de distribuição foram aplicados e os resultados são definidos em percentagem do volume total de tráfego.

Tabela 3.2 - Exemplos de aplicação de modelos de distribuição. Adaptado: (PTV Visum Manual, 2020)

	Número	R	Kirchhoff	Logit	Box-Box	Lohse
1	1	5	94 %	78 %	86 %	100 %
	2	10	6 %	22 %	14 %	0 %
2	1	105	55 %	78 %	62 %	51 %
	2	110	45 %	22 %	38 %	49 %
3	1	50	94 %	100 %	100 %	100 %
	2	100	6 %	0 %	0 %	0 %

Como se verifica nas situações 1 e 3, o modelo de *Kirchhoff* faz a mesma atribuição entre os percursos por apresentarem as mesmas proporções, ao contrário do modelo *Logit* que dá uma maior importância à diferença entre o valor das impedâncias. Sendo a maior desvantagem do modelo *Kirchhoff* a execução em situações de grande disparidade de impedância, mantendo a mesma proporção, como acontece na situação 3 da Tabela 3.2, em que é expectável que a totalidade dos utilizadores utilize o percurso 1. Ainda assim destaca-se como o mais prático e mais próximo da realidade.

Pelo que a função da impedância utilizada para este estudo faz uso de parâmetros relativamente elevados, instigando impedância com ordens de grandeza também elevados, o uso do modelo que preza a proporção, ao invés da diferença entre valores, torna o modelo de *Kirchhoff* o mais adequado.

A fórmula da utilidade é definida por:

$$U_i = R_i^\beta \quad (3.10)$$

Considerado o valor de $\beta = 4$.

Depois de definidas as percentagens referentes a cada percurso, são calculados os volumes finais que ainda sofrem um processo de “suavização” dos volumes através do Método de Médias Sucessivas (*Method of Successive Averages – MSA*).

Este modelo não tem solução única, porém, quando o número de iterações chega ao seu limite máximo, ou a sua condição de finalização é atingida antes de chegar a esse ponto, o erro introduzido é tão reduzido que esta variação não tem influência considerável nos resultados.

3.4.4. MODELO DE EQUILÍBRIO LOHSE

O método de equilíbrio *Lohse* atribui aos utilizadores da rede um “processo de aprendizagem”. O primeiro passo é a aplicação do método do “tudo-ou-nada”, de seguida é aplicada um processo

iterativo em que os condutores incluem consecutivamente informação sobre o estado da rede, que é absorvida durante a sua última viagem ou iteração e é aplicada na próxima viagem.

O algoritmo do modelo é estruturado segundo a Figura 3.9.

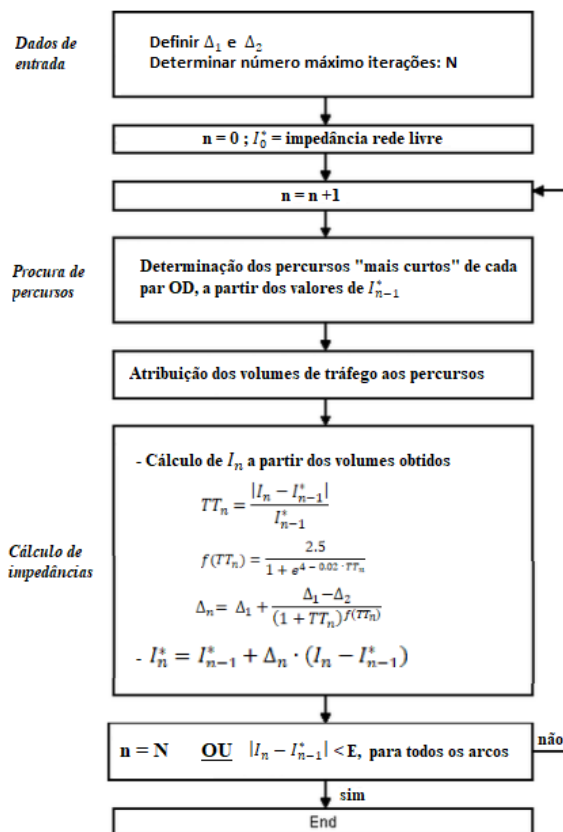


Figura 3.9 - Algoritmo do modelo de equilíbrio Lohse. Adaptado de: (PTV Visum Manual, 2020)

Na primeira iteração do algoritmo, são calculados todos os valores de impedância dos arcos considerando a rede livre, sendo caracterizados pela variável I_0^* .

Com os valores atribuídos aos arcos I_0^* é executada a atribuição do modelo “tudo ou nada” à rede. Com os volumes de tráfego inseridos, realiza-se um novo cálculo dos valores da impedância dos elementos a partir da função designada. Caracterizam-se estes valores pela variável I_1 .

A partir da primeira atribuição de tráfego é introduzida informação sobre o estado da rede aos condutores, incorporando assim um processo de aprendizagem em cada iteração. A metodologia utilizada é através da estimação de um valor atualizado de impedância, representada pela variável I_1^* , que será usada como valor inicial de impedância para a afetação da próxima iteração. Este processo pressupõe o cálculo do fator de aprendizagem Δ .

De uma forma geral, na iteração n , o valor final I_n^* é calculado a partir da fórmula:

$$I_n^* = I_{n-1}^* + \Delta_n \cdot (I_n - I_{n-1}^*) \tag{3.11}$$

Considerando os cálculos adicionais:

$$\Delta_n = \Delta_1 + \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{(1 + TT_n)^{f(TT_n)}} \quad (3.12)$$

$$TT_n = \frac{|I_n - I_{n-1}^*|}{I_{n-1}^*} \quad (3.13)$$

$$f(TT_n) = \frac{2.5}{1 + e^{4 - 0.02 \cdot TT_n}} \quad (3.14)$$

Onde Δ_1 ; Δ_2 são parâmetros a definir pelo utilizador que representam os limites inferiores e superiores do fator de aprendizagem e que são predefinidos pelos valores [0.15; 0.5] respetivamente.

Este modelo trabalha com a condição de um máximo de 40 iterações que se considera suficiente para que um modelo produza resultados estáveis e realísticos. Consequentemente, o aumento de iterações necessárias para este tipo de modelo de equilíbrio, dá aso a uma procura de um maior número de percursos alternativos, o que resulta em maiores tempos de processamento.

3.4.5. MODELO BI-CONJUGAÇÃO DE *FRANK WOLFE*

O método da bi-conjugação de *Frank Wolfe* parte do desenvolvimento do método clássico de *Frank Wolf*. O seu funcionamento parte dos princípios de equilíbrio e o algoritmo de funcionamento, apresentado na Figura 3.10, bem como no modelo de equilíbrio *Lohse*, se difere no número de núcleos utilizados, de modo que os tempos de execução pudessem ser significativamente reduzidos através da utilização de melhor hardware.

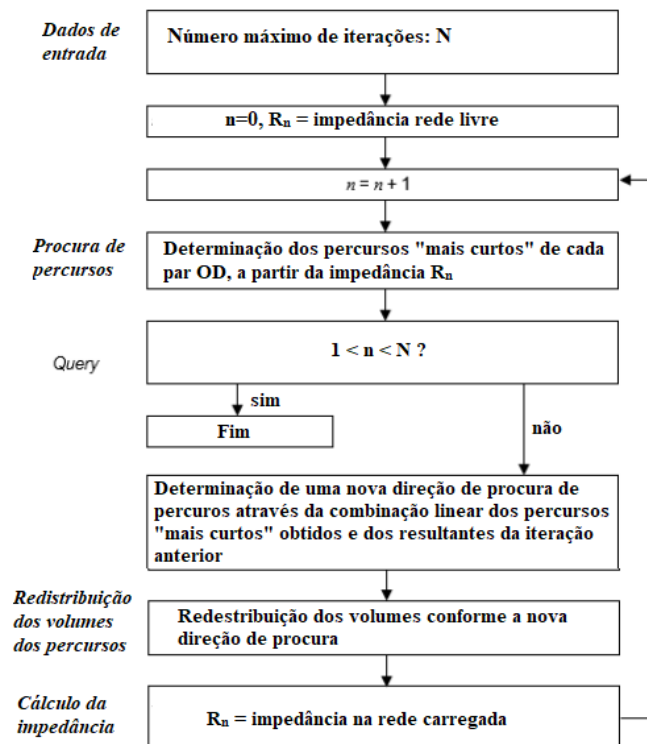


Figura 3.10 - Algoritmo de funcionamento do modelo bi-conjugado *Frank-Wolfe*. Adaptado de: (PTV Visum Manual, 2020)

3.4.6. MODELO DE EQUILÍBRIO LUCE

O modelo do equilíbrio do utilizador com custo linear (LUCE) surge com o intuito de diminuir o tempo de convergência dos algoritmos dos modelos de equilíbrio. Neste contexto, este modelo contribui com um avanço considerável na prática da modelação, atingindo um processo de convergência de 10 a 100 vezes mais rápido do que qualquer outro algoritmo relativamente recente, evidenciando-se um maior impacto em redes de maior dimensão.

A forma como o método funciona é a partir da deslocação de fluxos que satisfazem a redução do custo total da rede, a partir da exploração das derivadas das funções de custo dos arcos.

Para a compreensão do funcionamento do modelo, na Figura 3.11 é apresentado um exemplo para uma simples rede onde um par O/D, com a procura total definida por “D”, é ligada por dois percursos com as funções de custo $c_1(f_1)$ e $c_2(f_2)$, referentes aos percursos 1 e 2, respetivamente.

Para uma distribuição igual entre estes dois percursos, definido por f' , é visível a grande discrepância de custos, o custo do percurso 1 significativamente menor ao percurso 2, o que numa aplicação da metodologia “tudo-ou-nada” resultaria na atribuição total a este percurso.

A situação de equilíbrio verifica-se na interseção das duas funções de custos, definida em f^* . Porém, na abordagem do modelo LUCE, efetua-se a derivação das funções de custo, transformando-se em funções lineares, e na interseção destas novas funções encontra-se o ponto de equilíbrio e , que é eficientemente próximo do ponto f^* . Deste modo, o modelo converge igualmente em equilíbrio com um menor tempo de processamento (Gentile, 2014).

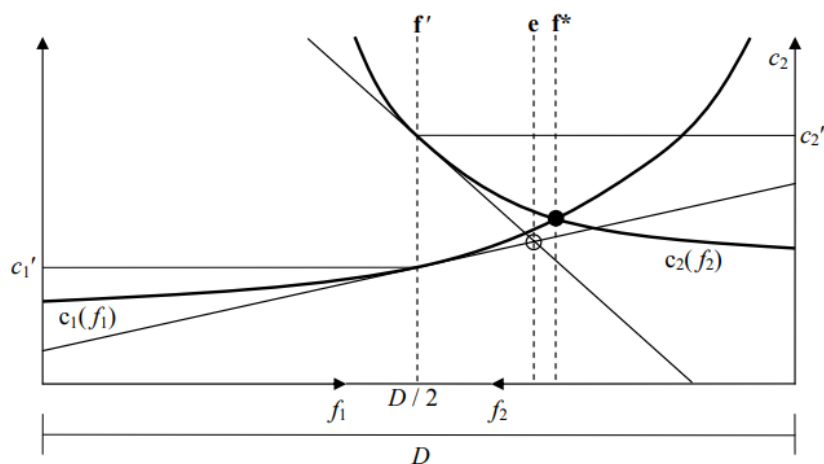


Figura 3.11 - Equilíbrio do utilizador com custo linear. Fonte: (Gentile, 2014)

3.4.7. MODELO ICA

O modelo ICA (*Intersection Capacity Analysis*) é uma variante do modelo de equilíbrio que se destaca dos restantes pela contabilização nos atrasos nos nós da rede.

A modelação realística da impedância dos nós, pressupondo a modelação detalhada dos nós de forma a identificar corretamente os conflitos existentes nos movimentos de mudança de direção.

Nos termos do *VISUM*, a geometria dos nós e a definição do sistema de controlo existente são *inputs* necessários e importantes nos nós, para a correta aplicação destes modelos.

O modelo define então um valor de impedância para os nós na rede, no entanto só para os definidos pelo utilizador, que são aqueles em que se define um tipo de controlo de tráfego.

Numa primeira instância, o modelo de equilíbrio é utilizado como primeira solução dos valores dos volumes atribuídos aos arcos, a partir das funções *VDF* definidas inicialmente. O modelo também define a capacidade dos movimentos de mudança de direção assim com os tempos de atraso no mesmo, dependentes da prioridade que é definida pelos sistemas de controlo, a partir de funções *VDF* próprias a estes elementos que são constantemente re-calibradas pelo modelo, havendo assim interações iterativas entre estas funções.

Na Figura 3.12 estão representados os tipos de controlo de tráfego nas interseções, disponíveis no *VISUM*. Todos estes atuam de maneira diferente e atribuem diferentes tempos de espera e atraso aos vários movimentos, podendo assim ser caracterizados por:

- Interseção não controlada (*uncontrolled*);
- Interseção semaforizada, (signalized);
- Interseção com rotunda (roundabout);
- Interseção prioritária regulada por sinalização, nas vias secundárias (*two-way stop*);
- Interseção prioritária regulada por sinalização, em todas as vias (*all-way stop*);
- Interseção prioritária, nas vias secundárias (*two-way yield*).

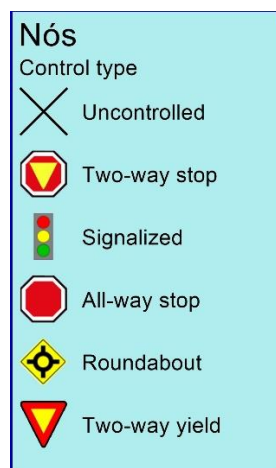


Figura 3.12 - Tipos de controlo de tráfego em interseções no (*PTV Visum Manual, 2020*)

Este modelo utiliza também o cálculo do fenómeno de “bloqueamento” (*blocking back*), que assegura que os volumes existentes são realistas e não há o carregamento excessivo dos movimentos de mudança de direção.

Este procedimento estima o comprimento das filas de espera e os tempos de atraso, em redes sobressaturadas. A forma como atua este procedimento define-se por num percurso, o tráfego desloca-se de arco em arco até encontrar uma restrição relativa à capacidade do arco ou movimento de mudança de direção, onde introduz um tempo de espera.

3.4.8. MODELOS DINÂMICOS

A grande diferença entre os modelos estáticos e os modelos dinâmicos é a variabilidade da procura no tempo.

Primeiramente, é definido um período de análise que se define pelo período de tempo em que a procura vai ser progressivamente carregada na malha viária. A duração deste período pode decorrer ao longo de um dia, tal como pode ter a duração de vários dias. Como já foi referido no subcapítulo 3.2., a capacidade das vias irá ser definida para um período de análise de 1 hora, assim como a procura definida na matriz O/D. Assim, foi estabelecido o período de análise das 8:00 às 9:00 horas.

Seguidamente, é necessário definir a duração dos intervalos de tempo em que este período vai ser dividido. A cada intervalo de tempo pode ser atribuído um “peso” ou carga, que pode ser modificado para atribuir maior tráfego a intervalos de tempo específicos, para permitir a criação de fenómenos de “hora de ponta”. Consoante o número de intervalos de tempo e os seus respetivos “pesos”, é atribuída aos mesmo uma percentagem da procura total, na medida que a sua soma resulta na procura total definida pela matriz O/D.

Para o estudo em questão, um dos cenários é definido com intervalos de 15 minutos, tendo todos o mesmo peso. Tendo que o período de análise é 1 hora, cada intervalo de tempo irá deter 25 % da procura total que irá ser carregada nesse período, como se verifica no exemplo da Figura 3.13.

Number	From-day	FromTime	To day	ToTime	Weight	Share	Percentages total
1	1	08:00:00	1	08:15:00	1.000	25%	25%
2	1	08:15:00	1	08:30:00	1.000	25%	50%
3	1	08:30:00	1	08:45:00	1.000	25%	75%
4	1	08:45:00	1	09:00:00	1.000	25%	100%

Figura 3.13 - Parâmetro referente à variável tempo do (*PTV Visum Manual*, 2020)

A percentagem de procura que é atribuída à rede é um fator que influencia significativamente o comportamento dos modelos dinâmicos, pois define a quantidade de tráfego que circula nas vias existentes. Uma percentagem elevada significa um maior congestionamento nos arcos em detrimento de uma percentagem reduzida que pode permitir a circulação em regime praticamente livre. Este processo induz os utilizadores a diferentes processos de escolha de percursos.

Para uma maior diferenciação de resultados são definidos três cenários de análise distintos:

1. Período das 8:00 às 9:00 com intervalos de 5 minutos, significando parcelas de carregamento de 8%;
2. Período das 8:00 às 9:00 com intervalos de 10 minutos, significando parcelas de carregamento de 17%;

3. Período das 8:00 às 9:00 com intervalos de 15 minutos, significando parcelas de carregamento de 25%.

Para cada modelo dinâmico seguinte, estes três cenários vão ser aplicados.

3.4.8.1. Modelo dinâmico do equilíbrio do utilizador

Neste modelo, como há uma variação temporal, todas as variáveis do modelo são determinadas em função do tempo de duração do período de análise definido. Como as variáveis dos modelos estáticos são predefinidas para a duração de uma hora e o período de análise definido para todos os modelos dinâmicos é também uma hora, não há a alteração dos valores das variáveis.

A principal diferença entre o método dinâmico do equilíbrio do utilizador (*Dynamic User Equilibrium* - DUE) e o método estático do equilíbrio do utilizador, relaciona-se com a possibilidade de mudanças temporais de desempenho da rede, como a formação e dispersão de filas de espera devido à sobressaturação dos arcos da rede. Assim, permite uma melhor simulação de rede com efeitos de constantes mudanças no congestionamento, levando a uma variação de escolha de percurso. Porém, o princípio de equilíbrio é igualmente aplicado em cada intervalo de análise.

Um dos parâmetros a definir é a função do diagrama fundamental de DUE, que é definido para todos os arcos da rede. O *VISUM* proporciona dois tipos de funções: a função parabólica-trapezoidal e a função trapezoidal. Para redes urbanas é recomendado o uso da função trapezoidal, que irá ser definido para todos os arcos das redes, e está representado na Figura 3.14.

Esta função relaciona a concentração do arco, localizado no eixo das abcissas, e o volume, ou fluxo, de tráfego atribuído ao mesmo, localizado no eixo das ordenadas. Baseado no diagrama é possível observar dois tipos diferentes de comportamento:

- A condição de fluxo “hipocrítico” corresponde ao tráfego em regime livre ou tráfego ligeiramente congestionado. Sob esta condição, se a concentração no arco aumenta o fluxo, aumenta também linearmente.
- A condição de fluxo “hipercrítico” corresponde a tráfego em regimes congestionados. Nesta zona, há a ocorrência de criação de filas de espera, bem como fenómenos de “para-arranca”. Sob esta condição, quando a saturação do arco aumenta, o fluxo diminui.

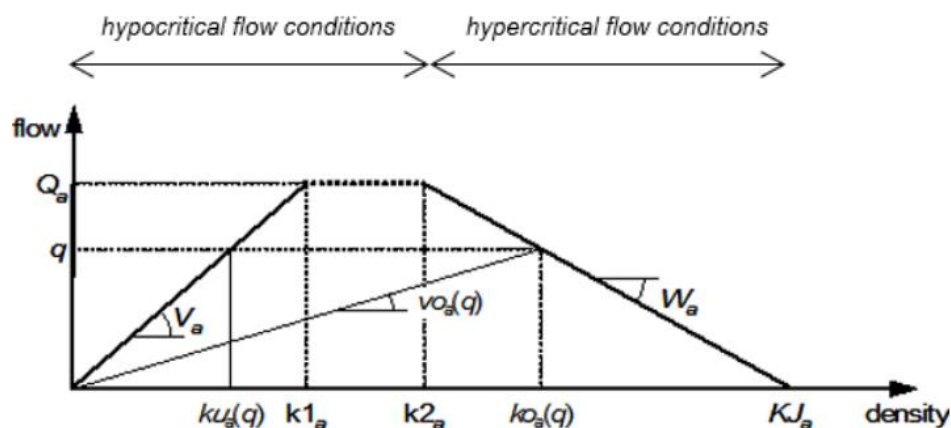


Figura 3.14 - Diagrama fundamental trapezoidal. Adaptado de: (PTV Visum Manual, 2020)

3.4.8.2. Modelo dinâmico estocástico

Da mesma forma como se procede no modelo estático estocástico, no modelo dinâmico estocástico (Dynamic Stochastic - DS), o processo da introdução de variabilidade de escolha de percursos é idêntica e apresenta o mesmo algoritmo de funcionamento.

Também quanto à matriz de procura, a partir da definição do período de análise e da duração dos intervalos faz a sua divisão e o carregamento parcelar. Este modelo destaca-se por permitir a introdução de variáveis temporais nos elementos da rede, como os arcos e nós.

3.4.8.3. Modelo dinâmico baseado na simulação

Na aplicação do modelo dinâmico baseado na simulação, (*Simulation-based dynamic assignment* - SBA), a modelação da rede deve cumprir certos requisitos para que o modelo seja executado, com especial atenção na codificação dos vários elementos da rede, como os arcos e nós.

Uma das principais características do modelo é o cálculo da capacidade dos arcos, que usa uma fórmula própria para o cálculo, considerando irrelevante a variável que é introduzida como dado de entrada. A variável da capacidade é calculada pela equação (3.15):

$$Capacidade = \frac{3600}{SBA.Reac.time + \frac{SBA.Eff.Veic}{v_0}} \quad (3.15)$$

Onde

- *SBA.Reac.time* – Distância de segurança entre veículos, em segundos;
- *SBA.Eff.Veic* – Soma da distância de imobilização e comprimento do veículo, em metros;
- v_0 – Velocidade em regime livre.

A distância de segurança entre veículos é predefinida pelo programa por 1,2 segundos e a soma da distância de imobilização e comprimento do veículo é 7 metros. Na utilização do modelo, estas variáveis podem ser alteradas, porém vão ser mantidos estes valores predefinidos.

Quanto ao volume de procura, ao contrário dos restantes modelos dinâmicos, é introduzido na rede por meio de um simulador, significando que são introduzidos e monitorizados os veículos individuais em circulação, permitindo assim a formação e dispersão das filas de espera.

Este procedimento é adequado para redes de média e grande dimensão e a procura deve ser também adequada para este tipo de aplicação. O controlo e geometria de interseções é um parâmetro que deve ser definido de acordo com as características reais da rede para a obtenção de resultados consistentes.

4

CASOS DE ESTUDO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1. PREÂMBULO

Neste capítulo, irão ser apresentadas e discutidas as duas redes rodoviárias para a aplicação dos modelos de afetação de tráfego, uma primeira fictícia, desenvolvida com o propósito do estudo da dissertação, e uma segunda representativa de uma rede real.

Nos primeiros subcapítulos são apresentados os dois cenários, com a caracterização das suas representações no *VISUM*; as características principais dos elementos da rede; as matrizes origem-destino; o controlo de tráfego nas interseções e é definido e apresentado um par de zonas origem-destino em cada cenário, em que se especificam os percursos associados para a posterior análise.

De seguida, são caracterizados os indicadores de desempenho que são utilizados para a análise de resultados e acompanham no estudo do funcionamento dos modelos.

Por fim, são apresentados e discutidos os resultados dos modelos para ambas as redes, sendo que são diferenciados entre modelos estáticos e modelos dinâmicos. São realizados dois tipos de estudos: o primeiro referente aos indicadores de desempenho nos arcos das redes, medidos não individualmente, mas como um conjunto; o segundo referente à observação da atribuição entre os percursos das zonas definidas para cada rede.

É importante salientar que a análise dos modelos dinâmicos é realizada, comparando os valores referentes ao período de análise como um todo, e não por intervalo de tempo, tendo em conta que não é definido nenhum intervalo “crítico”, que se diferencie dos restantes. Inclusive a análise de todos os intervalos tornaria o processo de difícil e demorada execução.

4.2. CENÁRIO 1 – REDE FICTÍCIA

Para o primeiro caso de estudo, foi configurada uma rede viária simples que não é baseada em nenhum sistema real, mas que retrata um cenário fictício que permita avaliar o sistema de escolha de percursos dos diferentes modelos analisados. Foi então elaborada com base na premissa de recriar o dilema de uso de uma estrada variante mais extensa, mas que permita a circulação a maior velocidade e com capacidade para correntes de tráfego maiores ou uma estrada mais curta, com menor capacidade e que pressuponha a maior utilização e a consequente circulação de maior fluxo de tráfego, pela ligação a zonas populacionais que produzam a atração de tráfego.

Esta rede é, então, dividida em dois tipos hierárquicos de vias. Como se verifica na Figura 4.1, localizado na parte inferior da rede há um eixo de estrada que faz a ligação entre todas as zonas presentes na rede, designado conforme as suas características como um eixo urbano estruturante e um eixo complementar que funciona como uma variante que faz a ligação entre as zonas X e Y.

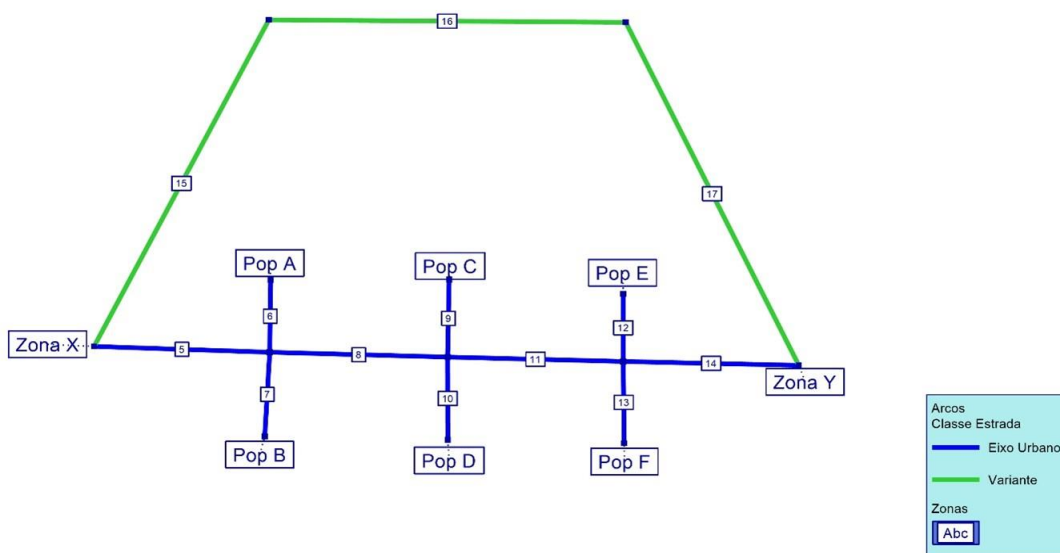


Figura 4.1 - Representação no VISUM da rede fictícia.

Estes dois eixos de estrada têm características distintas no que toca ao seu comprimento, velocidade base e capacidade. No anexo A.2, estão retratados todos os arcos que compõem estas vias, com a caracterização das variáveis referidas.

No que toca ao controlo de tráfego das interseções, foram inseridas interseções prioritárias de nível reguladas por sinalização, nas interseções relativas ao eixo urbano, representadas na Figura 4.2.

Estes cruzamentos, que nesta rede são compostas por quatro ramos “em cruz”: dois fazem a ligação às populações, ortogonais ao eixo urbano; e dois que fazem a ligação às zonas X e Y, estabelecidos ao longo do eixo urbano.

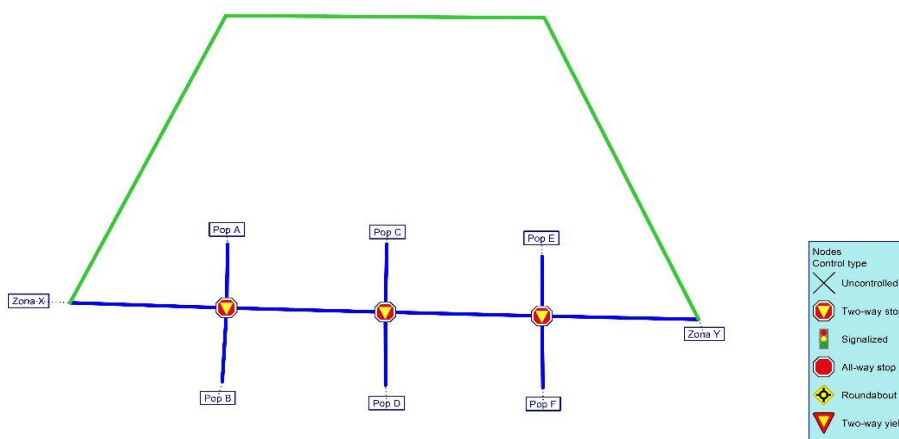


Figura 4.2 – Controlo de tráfego na zona fictícia.

O fluxo prioritário da interseção é definido no eixo que é carregado com a porção maioritária do tráfego. Consoante a matriz de procura de tráfego, é facilmente identificável que o maior fluxo circula da zona X para a zona Y. Assim, os movimentos em frente e de mudança de direção à direita são hierarquizados como os movimentos prioritários, não sofrendo atrasos consoante o resto dos movimentos.

A procura de tráfego na rede fictícia é representada na matriz origem-destino à mesma associada, como já referido anteriormente. De forma facilitar a leitura das correntes de tráfego, o fluxo foi gerado para seguir um sentido da esquerda para a direita da rede, ou seja, a sua origem tem a sua totalidade na zona X, distribuindo o tráfego maioritário para a zona Y, assim como para as zonas de população de A a F. Na Tabela 4.1 está especificada a matriz, que perfaz um total de 6000 veículos a circular na rede no período de análise em questão. Contudo, todos os arcos são codificados para permitirem a circulação em ambos os sentidos.

Tabela 4.1 - Matriz O/D da rede fictícia

Zona	Destino								
Origem	Soma	Zona X	Zona Y	Pop A	Pop B	Pop C	Pop D	Pop E	Pop F
Zona X	6000		3000	500	500	500	500	500	500

Assim, é perceptível que os percursos que fazem a ligação entre estas zonas são os percursos 1 e 2, referentes às vias de eixo urbano estrutural e variante respetivamente, representados na Figura 4.3.

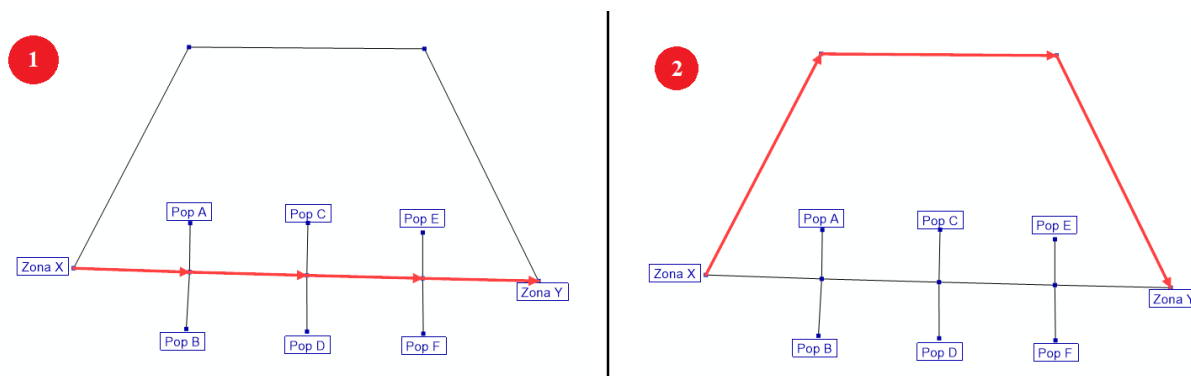


Figura 4.3 - Esquematização dos percursos existentes na rede

Na Tabela 4.2 estão caracterizados os dois percursos alternativos quanto às variáveis que mais impacto têm na tomada de decisão da rota a circular. De notar que no primeiro percurso, a distância a percorrer é mais reduzida, porém com o entrave da circulação a uma menor velocidade, ao contrário do segundo que é mais longo, mas permite velocidades maiores. Em ambos os casos, em cenários de circulação em regime livre, o tempo de percurso tem o mesmo valor.

Tabela 4.2 - Caracterização dos percursos da rede fictícia

Percurso	Comprimento (km)	Capacidade (veículos)	Velocidade base média	Tempo de percurso em regime livre
Eixo Urbano	1 km	3000	50 km/h	00:01:20
Variante	1.6 km	4000	80 km/h	00:01:20

4.3. CENÁRIO 2 – REDE ASPRELA

Esta rede, representativa de uma malha viária real que delimita a zona da Asprela, na cidade do Porto, é composta por 23 zonas, 651 nós e 1694 arcos. Esta elevada quantidade de zonas leva a que a matriz origem-destino seja de grande dimensão, sendo composta por 529 células.

Considerando o comprimento total de todos os elementos da rede em questão, um total de 126,49 quilómetros que traduz o grau de detalhe deste sistema.

A malha viária da rede, modelada em *VISUM*, está representada na Figura 4.4. As vias integradas têm diferentes níveis de hierarquia viária, dentro das quais estão também representadas vias que são exclusivas aos modos de transporte pedonal e público, que para efeitos da dissertação não serão consideradas para o estudo em questão.

Consoante as suas diferentes características, podem ser classificadas pela sua classe (PDM):

- Rede nacional
- Eixo estrutural urbano;
- Eixo complementar urbano;
- Ligação inter-nível.

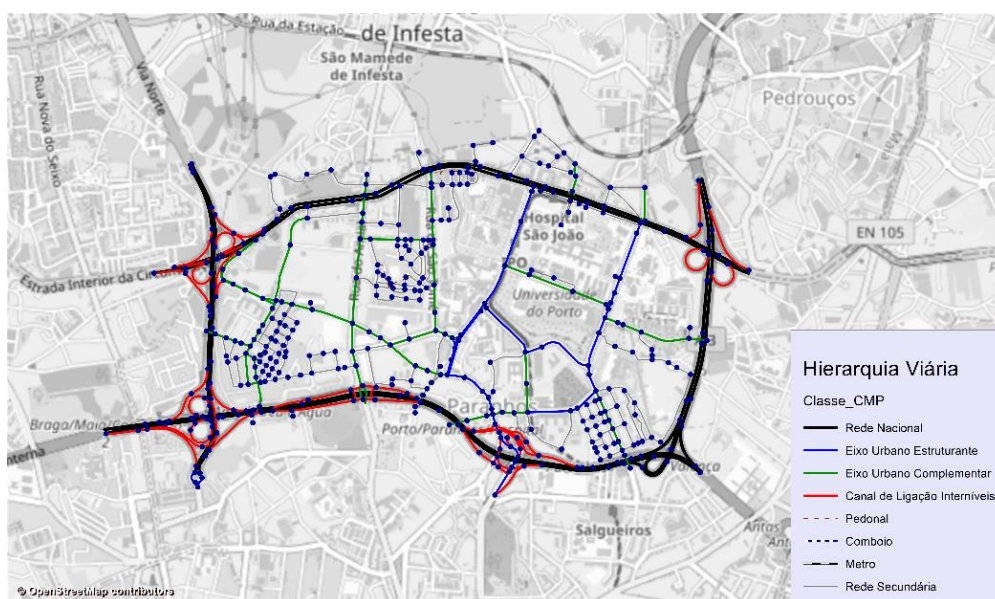


Figura 4.4 - Representação da malha viária da rede Asprela no VISUM

A matriz origem-destino associada à rede está representada no anexo A.1, que pela sua grande dimensão, apenas estão representadas as somas dos veículos que têm origem e destino em cada zona, totalizando 37 763 veículos para o período de análise definido.

Quanto ao controlo nas interseções, a rede pressupõe uma codificação mais complexa comparativamente à rede fictícia. São utilizados os quatro diferentes tipos de controlo de interseção, para que seja introduzida alguma variedade de efeitos nos nós localizam-se sobretudo nas vias de rede nacional, como se pode observar na Figura 4.5.

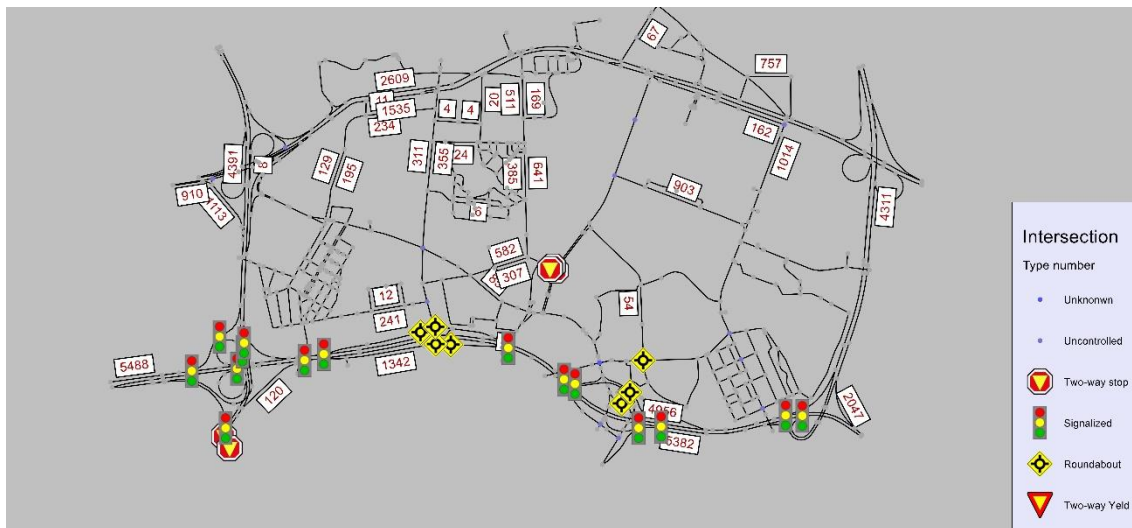


Figura 4.5 - Controlo de interseções na rede Asprela

A rede da Asprela é bastante mais complexa do que no caso da rede fictícia. A existência de um número elevado de pares de zonas, assim como a existência de um número significativamente maior de percursos entre estas pressupõe um processo de escolha de um par origem-destino com características próprias que permitam a adequada análise do processo de afetação.

As zonas principais da rede são representadas pelas suas áreas abrangentes e por um ponto centroide, onde o tráfego é originado e atraído. A ligação deste tráfego à rede, que é composta pelos nós e arcos ligados entre si, é realizada por conectores. Nestas principais zonas é necessária a existência de vários conectores ligados ao centroide, de modo a criar mais pontos de acesso às zonas para uma representação mais fidedigna de uma rede real. Este fenómeno leva ao aumento elevado de percursos inerentes a duas zonas, onde começam e terminam nos diversos pontos de acesso.

Para evitar tal constrangimento, o estudo em questão pressupõe a utilização das zonas exteriores, representadas só pelo seu centroide e por um conector, e consequentemente um só ponto de acesso.

Assim foi definido a ligação entre a Zona Exterior 13 e Zona exterior 15. De facto, existe um infundável número de formas de ligação entre as zonas, considerando todos os arcos da rede, porém o custo de viagem de uma grande percentagem dos percursos torna irrealista a sua utilização. Assim, sobressaem três percursos que são utilizados pelos modelos de afetação estáticos, representados nas figuras Figura 4.6, à Figura 4.8.

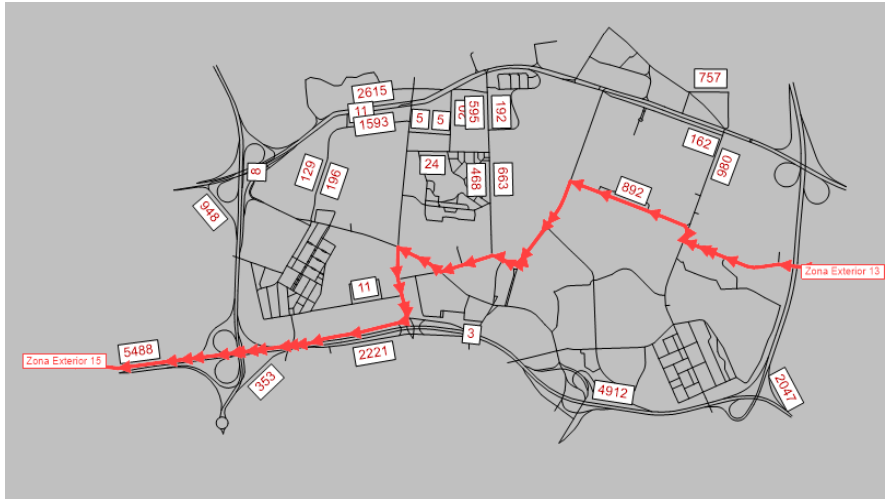


Figura 4.6 - Percurso 1



Figura 4.7 - Percurso 2



Figura 4.8 - Percurso 3

Estes percursos são compostos por arcos com diferentes características, pertencentes a diferentes tipos de estrada com diferentes comprimentos, número de vias assim como velocidades base e tempos de percurso variáveis. Porém, foi realizada uma uniformização dos elementos, de forma a poder analisar e diferenciar as diferentes alternativas. Assim, na Tabela 4.3 apresentam-se as diferentes características dos percursos.

Tabela 4.3 - Caracterização dos percursos entre as Zonas Exteriores 13 e 15

Percurso	Comprimento	Velocidade base média	Tempo de percurso em regime livre
1	3.93 km	50 km/h	00:04:42
2	4.31 km	54 km/h	00:04:47
3	4.29 km	56 km/h	00:04:37

O volume de procura total entre as duas zonas em questão está definido em 107 veículos no período de análise total.

4.4. CARACTERIZAÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO

Uma vez definidas as redes e todos os parâmetros definidos, atuando como dados de entrada ou calibração dos diferentes modelos, é altura de definir os indicadores de desempenho para a análise e comparação da sua afetação.

Na presente dissertação, optou-se por fazer a análise focada nos resultados da variáveis nos arcos, onde os volumes de tráfego são atribuídos, efetuada de forma geral tendo em conta a rede e não arcos em específico. Ou seja, o *VISUM* calcula os valores dos elementos individuais, mas, para a análise final, apenas é tido em conta o valor da soma dos elementos em cada modelo.

Numa segunda fase, são também analisados os indicadores dos percursos, combinação de arcos, dos pares origem-destino.

Os indicadores de desempenho, referentes aos arcos, escolhidos para avaliação foram:

- Tempo total de viagem: corresponde ao tempo despendido por todos os veículos na rede, calculado através da multiplicação do tempo de percurso dos arcos com os volumes atribuídos aos mesmos, medido em horas;
- Saturação de um arco: corresponde à percentagem de utilização de um arco, calculado pelo quociente do volume de tráfego atribuído pela capacidade do arco;
- Comprimento de arco saturado: multiplicação do comprimento do arco pela saturação do mesmo;
- Grau de saturação médio: corresponde a um grau de utilização da rede, calculado pelo quociente da soma dos comprimentos de arco saturados pela soma dos comprimentos dos arcos. Apenas são contabilizados os arcos que têm atribuído tráfego;
- Distância total percorrida: distância percorrida por todos os veículos na rede, medido em km, calculado através da multiplicação do volume de veículos pelo comprimento dos arcos;
- Velocidade média de viagem: média das velocidades de percurso de todos os arcos da rede;

- Quociente de velocidades: média do quociente entre a velocidade de percurso e a velocidade em regime livre de todos os arcos utilizados da rede. De um modo geral, permite avaliar a percentagem de diminuição de velocidade dos veículos na rede;
- Atraso total de viagem: soma do tempo de atraso, em horas, de todos os arcos da rede. Calculado pela multiplicação do volume atribuído ao arco pelo tempo de atraso do percurso do arco (diferença entre o tempo de percurso e o tempo de percurso em regime livre).

4.5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.5.1. ANÁLISE DE ARCOS

4.5.1.1. Cenário 1 – Rede fictícia

Para a rede fictícia, os modelos estáticos foram aplicados para o estudo dos indicadores de desempenho.

Para além da apresentação dos resultados das variáveis atuantes como indicadores de desempenho dos arcos, o VISUM exibe os fluxos de tráfego na rede graficamente. A título de exemplo, na Figura 4.9 expõe-se a representação gráfica da aplicação do modelo de equilíbrio na rede fictícia.

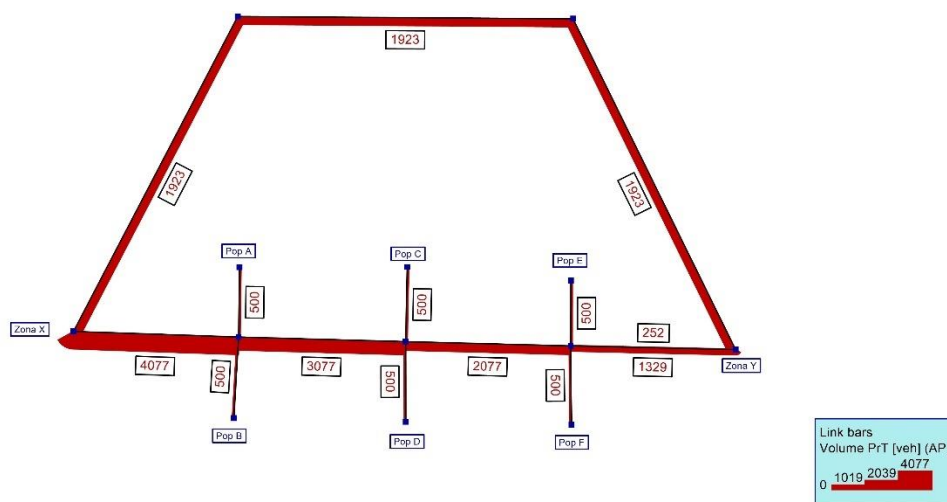


Figura 4.9 - Representação gráfica da afetação do modelo de equilíbrio na rede fictícia

Os resultados das variáveis de desempenho são apresentados na Tabela 4.4, representativos da totalidade dos arcos que foram afetados pelos modelos estáticos.

Tabela 4.4 - Resultados dos modelos estáticos na rede fictícia

Modelos	Distância total percorrida (km)	Tempo total de viagem (horas)	Grau de saturação médio (%)	Quociente de velocidades (%)	Velocidade média (km/h)	Atraso total de viagem (h)
Equilíbrio	6104	159	53	82	47	62
Frank - Wolf	6104	159	53	82	47	62
LUCE	6104	159	53	82	47	62
Lohse	6096	160	53	82	47	63
Estocástico	6121	169	51	83	47	69
Incremental	5453	222	51	81	47	125
ICA	6097	160	53	82	47	63

Através da análise dos resultados existem alguns aspetos a realçar, sucintamente descritos nos parágrafos seguintes.

Quanto à análise de desempenho dos arcos, é possível verificar-se uma grande similaridade nos valores das variáveis de estudos nos modelos de equilíbrio, com uma variação quase insignificante no modelo de equilíbrio *Lohse*.

Quanto ao modelo ICA, com a introdução de atrasos nos nós, era espectável a propagação para os arcos, o que no aspeto geral não se observa. Pela geometria das interseções, verifica-se que o atraso introduzido nos arcos que são considerados não prioritários, não criam impacto notório. Como o modelo de equilíbrio é usado como a solução inicial, por esta razão, a convergência do modelo ICA realiza-se de um modo similar.

Um dos aspetos que ressaltam desta análise são os valores obtidos pelo modelo incremental. A diferença da distância percorrida na rede de aproximadamente 650 quilómetros, 10 % da distância total de percurso quanto ao resto dos modelos, acentuando a atribuição dos percursos mais curtos entre as origens e destino. Verifica-se também um aumento geral significativo dos tempos de percurso e de atraso, que aumenta para o dobro devido à elevada saturação dos percursos mais curtos.

Analisados os modelos de afetação estáticos, procede-se à apresentação dos resultados obtidos pela aplicação dos modelos dinâmicos ao caso de estudo. Os resultados obtidos acerca do desempenho geral da rede fictícia, pela aplicação dos modelos dinâmicos estão representados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Resultados dos modelos dinâmicos na rede fictícia

Modelos	Distância total percorrida (km)	Tempo total de viagem (horas)	Grau de saturação médio (%)	Quociente de velocidades (%)	Velocidade média (km/h)	Atraso total de viagem (h)
DS	4842	337	96	72	36	240
DUE	6641	151	60	82	46	54
SBA (5min)	6853	99	49	100	56	0
SBA (10min)	6859	100	49	100	56	0
SBA (15min)	6845	99	53	100	56	0

Após a aplicação dos modelos, verificou-se que os resultados obtidos nos três períodos de análise do modelo DS tomam valores iguais, não revelando nenhuma alteração com as diferentes percentagens de carregamento da rede. Assim, são apenas apresentados os resultados comuns aos três casos. Neste modelo o indicador que toma grande relevância é a elevada percentagem do grau de saturação médio. Este fenómeno indica uma grande saturação das vias utilizadas, assim como a escolha de um número reduzido de percursos na distribuição do tráfego. Assim, pode-se aferir a introdução de um grande congestionamento das vias em questão, que é corroborado com os elevados valores dos tempos de viagem e tempos de atraso, assim como as menores velocidades de percurso, com a redução de cerca 30 % quanto à velocidade em regime livre.

Da mesma forma que acontece com o modelo DS, no modelo dinâmico do equilíbrio do utilizador, DUE, os resultados referentes aos três períodos de análise são idênticos.

De forma diferente se comportam os modelos SBA quanto aos diferentes períodos de análise. Contudo, nos três cenários as correntes de tráfego circulam à sua velocidade máxima possível e não são introduzidos atrasos na circulação dos veículos em qualquer momento. Com isto, pode-se concluir que, para esta rede, com carregamentos parciais menores do que 25 % da procura total, não são criados nenhuns fenómenos de congestionamento. Os veículos circulam sempre em regime livre, mesmo com a diminuição da capacidade das vias, variável que é calculada pelo modelo ao invés da definida inicialmente e representada em anexo B.1.

Relacionando os modelos estáticos e dinâmicos, realça-se uma aproximação, num cômputo geral, dos resultados dos indicadores gerais do modelo DUE relativamente aos resultados dos modelos estáticos, particularmente os modelos de equilíbrio. Todavia é possível observar uma redução relativa dos tempos de viagem e de atraso, e um aumento da distância total percorrida no modelo DUE, comparativamente aos modelos referidos.

4.5.1.2. Cenário 2 – Rede Asprela

Para a rede da Asprela os modelos estáticos foram igualmente aplicados e os resultados das variáveis de desempenho são apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Resultados dos modelos estáticos na rede Asprela

Modelos	Distância total percorrida (km)	Tempo total de viagem (horas)	Grau saturação médio (%)	Quociente de velocidades (%)	Velocidade média (km/h)	Atraso total de viagem (h)
Equilíbrio	84991	2185	50	88	40	913
Frank - Wolf	85025	2182	50	88	40	910
LUCE	84991	2185	50	88	40	913
Lohse	85029	2185	50	88	40	913
Estocástico	85135	2264	50	88	39	978
Incremental	85013	2235	50	88	40	968
ICA	45952	4196	28	60	25	3443

Numa primeira vista é possível observar uma grande disparidade entre os valores das variáveis do modelo ICA, comparativamente aos restantes modelos. Esta principal diferença verifica-se no tempo de percurso total e nos tempos de atraso, como também a diminuição significativa das velocidades de percurso. A redução de 40 % quanto à velocidade em regime livre reproduz um impacto substancial, quando comparando com as reduções de 13 % dos restantes modelos. A relativa complexidade da rede, com um número considerável de interseções existentes, principalmente de sinais luminosos e rotundas, que introduzem grandes atrasos nos nós, permite a grande disparidade dos tempos de percurso nos arcos da rede.

Porém, pelo facto de a rede não ter sido detalhadamente modelada para este tipo de modelo, nomeadamente no que se refere às interseções, torna a presença de erros inevitável. Este modelo requer um processo de calibração, validação e codificação consideravelmente extenso e, assim, os valores dos tempos de percurso obtidos podem ser considerados elevados. No entanto, no contexto de análise de zonas urbanas, como é o caso desta rede, os atrasos nas interseções são a principal razão para os fenómenos de congestionamento. Assim, pode-se considerar que este modelo atribuí valores para os tempos e velocidades de percurso mais próximos da realidade. Neste tipo de rede, uma velocidade de 25 km/h considera-se mais próximo da realidade do que a média de 40 km/h, obtida nos restantes modelos, considerando que a média da velocidade na rede em regime livre é definida em 43 km/h.

Da mesma forma, como acontece no cenário da rede fictícia, os resultados obtidos pelos modelos de equilíbrio revelam valores nos indicadores de desempenho bastante aproximados, com variações muito reduzidas de atrasos na rede. Porém, por não apresentarem resultados dos indicadores totalmente iguais, evidenciando os diferentes procedimentos de atribuição do tráfego, não sendo, portanto significativamente impactantes numa escala global.

Todavia no modelo estocástico, já é possível identificar a introdução das propriedades de variabilidade, percepções de custos e de conhecimento da própria rede, particular deste tipo de modelo. Principalmente no valor da distância percorrida, onde apresenta um valor máximo comparativamente aos restantes modelos, traduzindo uma atribuição que pode ser realizada

segundo duas hipóteses: por meio de um maior número de percursos, ou por meio de percursos geometricamente mais longos.

Também na questão dos tempos de percurso e de atraso, é possível identificar o aumento de cerca de 79 a 82 horas de aumento do tempo de percurso, sendo que o aumento dos tempos de atraso em 62 a 65 horas, em comparação com os restantes modelos, corrobora o fenómeno de uma maior utilização de elementos da rede.

Para a rede da Asprela, os modelos dinâmicos foram igualmente aplicados e os resultados das variáveis de desempenho são apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Resultados dos modelos dinâmicos na rede Asprela

Modelos	Distância total percorrida (km)	Tempo total de viagem (horas)	Grau saturação médio (%)	Quociente de velocidades (%)	Velocidade média (km/h)	Atraso total de viagem (h)
DUE (5min)	89937	2414	41	90	35	1067
DUE (10min)	89902	2413	44	90	36	1067
DUE (15min)	90503	2426	44	89	36	1066
DS	84997	2281	50	88	40	1014
SBA (5min)	87886	3693	47	80	32	2337
SBA (10min)	87648	3951	47	76	31	2594
SBA (15min)	87849	3924	48	76	31	2564

Quanto aos resultados obtidos pelos modelos dinâmicos na rede Asprela, o modelo dinâmico estocástico, DS, não apresenta diferenciação nos valores das variáveis de desempenho nos três períodos de análise. Da mesma forma como funciona na rede fictícia, a distância percorrida é menor, pela atribuição aos percursos mais curtos. Porém nesta rede mais complexa, havendo mais alternativas disponíveis para a circulação, a saturação não se vai evidenciar tanto e o atraso introduzido nos arcos não se manifesta de uma forma tão expressiva.

Analisando os modelos DUE internamente, observam-se diferenças entre os resultados quando se varia o número de intervalos de análise. Quando a duração dos intervalos é de 15 minutos, estes exibem maiores distâncias percorridas e maiores tempos de viagem, contrastando com a diminuição dos atrasos. A necessidade de atribuir as maiores parcelas de tráfego devido ao menor número de intervalos, leva à utilização de um maior número de percursos, razão pela qual o grau de saturação da rede toma menores percentagens. Nos períodos de análise seguintes, denota-se um maior equilíbrio nestas variáveis de desempenho.

Comparando com os modelos estáticos, o modelo SBA introduz atrasos na rede e tempos totais de viagem que, porém não atingem valores da ordem dos obtidos pelo modelo ICA, se aproximam bastante do mesmo, comparativamente ao resto dos modelos. Um dos indicadores que corrobora este fenómeno é a velocidade média na rede, que também sofre uma relativa redução, atingindo velocidades médias de 31 km/h, aproximando-se dos 25 km/h de velocidade média no modelo ICA.

4.5.2. ANÁLISE DE PERCURSOS

4.5.2.1. Cenário 1 – Rede fictícia

Após a aplicação dos modelos estáticos e dinâmicos e da análise do domínio geral nos arcos, é possível, a partir do *software* VISUM, analisar também o domínio em termos de percurso. Numa primeira instância, é calculada a repartição percentual entre os as rotas utilizadas, apresentadas na Figura 4.10.

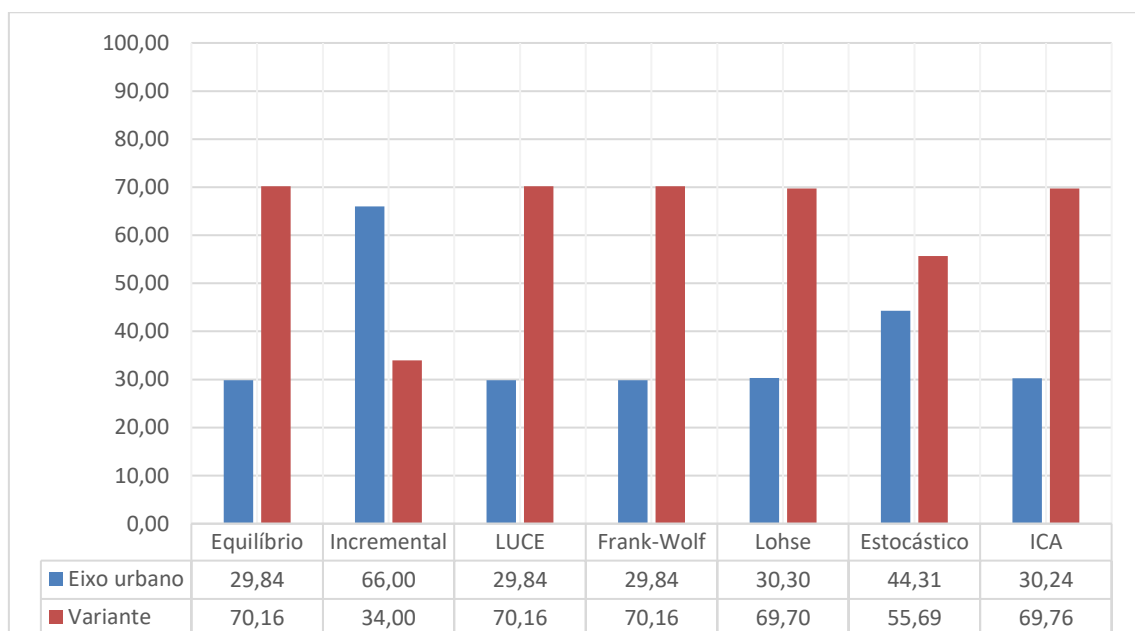


Figura 4.10 - Repartição do tráfego entre as zonas X e Y

Os vários modelos reproduzem soluções diferentes quanto à repartição do volume total pelos dois percursos existentes, explicado pelas suas diferentes características e formas de funcionamento. Porém, particularmente entre os modelos de equilíbrio, denota-se igualdade entre os resultados obtidos.

Note-se que nestes modelos de equilíbrio, é possível identificar o princípio subjacente do equilíbrio de Wardrop. Um dos atributos disponíveis de análise é o valor da impedância seja dos arcos, seja dos percursos. Tendo isto em conta, exposto no anexo C onde estão apresentados os resultados de todos os indicadores de desempenho dos percursos relativos à zona fictícia, podemos verificar que no modelo Equilíbrio, o valor da impedância para ambos os percursos é equivalente, significando que o modelo convergiu numa solução estável. Nos modelos de equilíbrio restantes como o *Frank-Wolf*, *Lohse* e *LUCE* os valores das impedâncias dos percursos não são exatamente iguais, denotando uma pequena variação devido aos seus algoritmos de convergência.

Assim, a maior percentagem de tráfego é atribuída à ligação variante, que se define por 70 % do volume total, conjugado com os 30 % de volume atribuído ao eixo urbano.

O modelo ICA, que introduz os efeitos de atraso nos nós, também apresenta resultados idênticos. Considerando o uso do modelo de equilíbrio na primeira iteração, conclui-se que o atraso relativo

às interseções entre as vias longitudinais e transversais do eixo urbano, não apresentam impacto suficiente para alteração dos valores quanto ao modelo de equilíbrio.

No entanto, é preciso ter em conta que o maior fluxo de tráfego se localiza longitudinalmente ao eixo, a circulação em frente e de mudança de direção à direita têm assim prioridade sobre os movimentos de mudança de direção à esquerda. Esta condicionante introduzida pelo tipo interseção escolhida, prioritárias de nível reguladas por sinalização (“two-way stop”), denota que o atraso na circulação apenas vai ser introduzido nos movimentos de viragens à esquerda, afetando apenas nos arcos que fazem a exclusiva ligação às zonas A,C e E.

Conclui-se que devido à simplicidade das interseções desta rede, a introdução do atraso nos nós, uma das propriedades fundamentais deste modelo não é influenciadora e o modelo reproduz os resultados idênticos aos modelos de equilíbrio.

Quanto ao modelo estocástico, é possível verificar um maior equilíbrio na afetação dos dois percursos comparativamente aos restantes modelos, porém com a tendência de utilização do eixo variante carregado com 56 % do tráfego total, cerca de 1671 veículos, conjugado com os 44 % do eixo urbano, cerca de 1329 veículos.

O modelo incremental destaca-se por configurar a rede com uma afetação oposta aos demais. A forma como o efetua é pela atribuição do tráfego ao percurso mais curto, no eixo urbano, consecutivamente até um ponto em que o custo de viagem se torna maior, ou seja, a impedância que vai progressivamente aumentando se estabeleça com um valor superior ao valor da impedância do percurso alternativo. Nesse ponto crítico, a corrente de tráfego estabiliza em 1980 veículos, 66 % do volume total. Considerando a menor capacidade das vias do eixo urbano e o maior carregamento, explica-se o elevado tempo de percurso subjacente a este modelo. O sentido de afetação é, então, alternado para o eixo da variante, onde é carregado com o volume restante, cerca de 1020 veículos, 44 % do volume total.

A análise de percursos foi apenas realizada entre as zonas X e Y, contudo para a ligação às Zonas “Populacionais” (A a F) praticamente todos os modelos estáticos utilizados apenas utilizam o percurso mais curto referente ao eixo urbano. Contudo, após a análise de execução do modelo estocástico, verificou-se que para viagens com a origem na zona X e destino nas zonas E e F, para além de atribuir tráfego ao percurso comum a todos os modelos, através da faixa de eixo urbano, tal como representado na Figura 4.11, utiliza também um percurso alternativo, através da faixa variante, tal como representado na Figura 4.12.

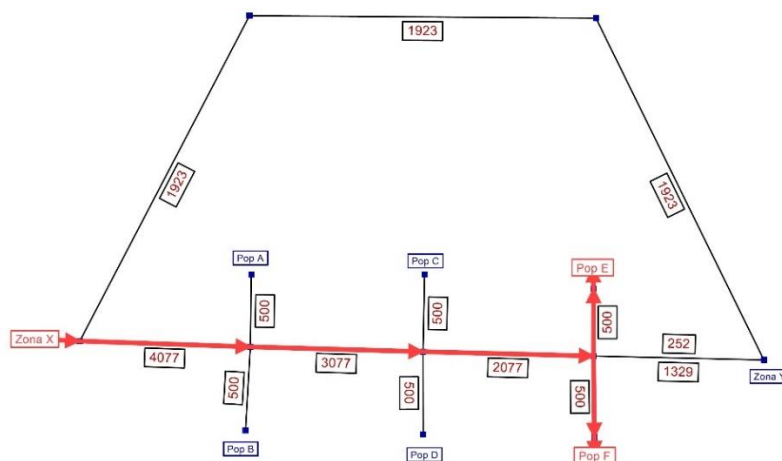


Figura 4.11 - Percurso pelo eixo urbano com destino nas Populações E e F

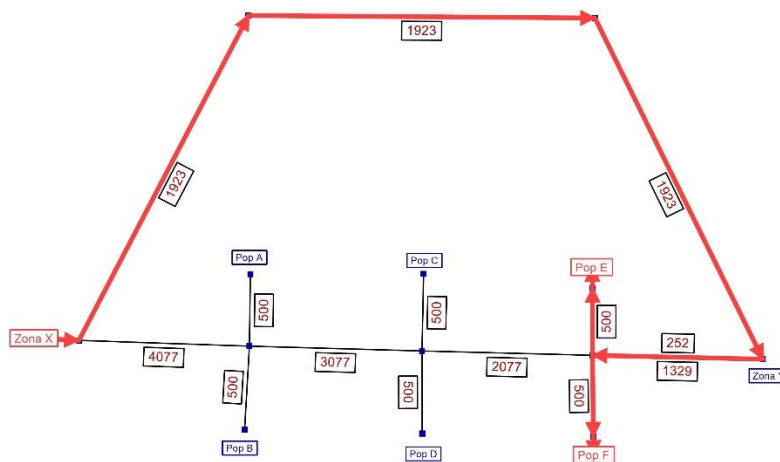


Figura 4.12 - Percurso pela variante com destino nas populações E e F

As características subjacentes a estes dois tipos de percursos estão apresentadas na Tabela 4.8, assim como a atribuição dos volumes e a sua percentagem de repartição quanto ao tráfego que tem destino as zonas em questão, definido na sua totalidade para ambas como 500 veículos.

Tabela 4.8 - Características dos percursos e atribuição dos volumes

Zona origem	Zona Destino	Percurso	Volume (veículos)	Repartição (%)	V ₀ (km/h)	V _{cur} (km/h)	Comprimento (km)
X	População F	Eixo urbano	374	74,7	50	26	0,837
		Variante	126	25,3	71	61	1,937
	População E	Eixo urbano	374	74,9	50	26	0,837
		Variante	126	25,1	71	61	1,937

De facto, um dos percursos, pelo seu comprimento e tempo de percurso sem congestionamento, torna-se objetivamente mais vantajoso para a circulação para as zonas de destino, localizada na faixa de eixo urbano, sendo atribuído aproximadamente 75 % do tráfego por esta rota.

Uma das principais características do algoritmo do modelo é a introdução de uma variabilidade na escolha de percurso, assim como a maior procura de rotas alternativas na circulação entre zonas, mesmo com maiores valores de impedância. Este fenómeno, em conjunto com a maior atribuição de veículos ao longo das vias de eixo urbano, 46 % ao contrário dos 30 % nos restantes modelos de equilíbrio, dá aso à introdução de maiores tempos de atrasos nestes arcos e a opção de um percurso mais longo acaba por ser mais viável.

Assim, é atribuído 25 % do volume ao percurso, que circula pela faixa variante, que pressupõe mais do que o dobro de distância percorrida, mas que no fundo o seu tempo de percurso acaba por ser menor. Deste modo, este percurso acaba por eventualmente ser vantajoso para os utilizadores que tenham a preferência por uma viagem mais longa, mas mais rápida e com a circulação a uma maior velocidade.

Da mesma forma, na Figura 4.13 apresenta-se a repartição do volume de procura pelos percursos definidos entre as zonas X e Y, agora com a aplicação dos modelos dinâmicos.

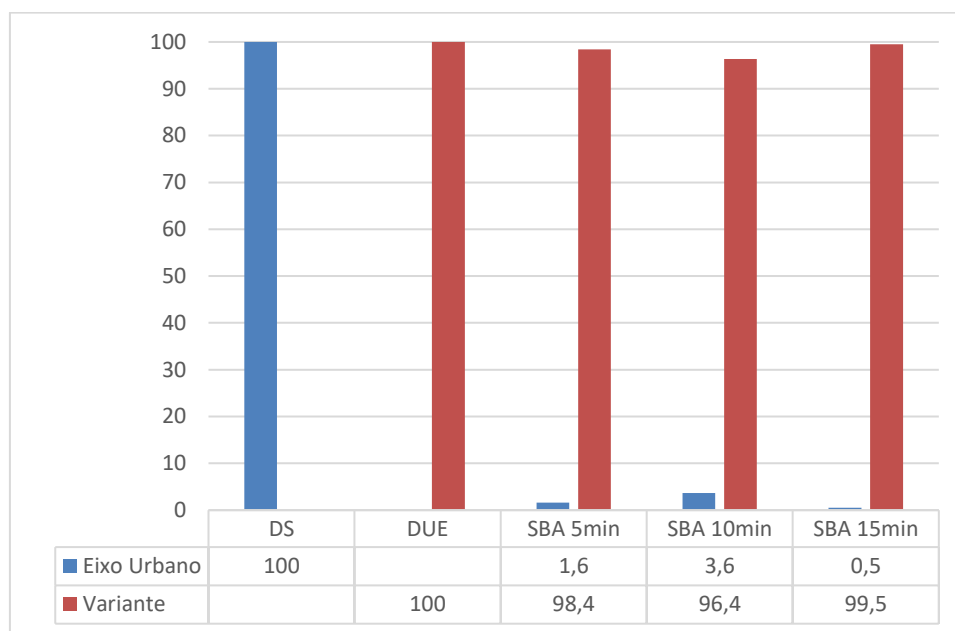


Figura 4.13 - Repartição do tráfego na rede fictícia a partir de modelos dinâmicos

Analisando os resultados obtidos é possível observar um contraste na escolha de percursos entre os modelos DUE e DS, em que em todos os seus intervalos de análise, atribuem o tráfego na sua totalidade à variante e ao eixo urbano, respetivamente. O modelo DS, faz a atribuição ao percurso mais curto enquanto o DUE utiliza o eixo urbano exclusivamente para a circulação para as zonas populacionais e a variante para a atribuição à zona Y.

Da mesma forma como acontece no modelo estático estocástico, no modelo SBA, a atribuição para as zonas populacionais é realizada através de um percurso mais longo com a utilização da via variante. A repartição do fluxo de tráfego para estas zonas encontra-se no anexo B.2, é possível confirmar os valores acrescidos das distâncias total percorrida derivado deste modelo de simulação, pela utilização de percursos bastante longos.

Para a presente rede, os modelos dinâmicos tendem a fazer a atribuição, quase na sua totalidade, a um dos percursos existentes, enquanto nos modelos estáticos denota-se um maior equilíbrio de atribuição pelos dois eixos. Realça-se que nos modelos estáticos, um dos percursos é sempre carregado com pelo menos 30% do tráfego total, nos modelos dinâmicos o percurso alternativo é carregado no máximo com 3,6 % do tráfego total.

4.5.2.2. Cenário 2 - Rede Asprela

Aplicando os modelos de afetação estáticos na rede Asprela, os valores da procura total são divididos percentualmente entre os percursos apresentados no subcapítulo 4.2, representados na Figura 4.14.

É necessário ter em conta, no entanto, que nos arcos que integram os percursos também circulam veículos que são distribuídos para outras zonas, influenciando diretamente os valores da impedância e consequentemente os tempos de percurso.

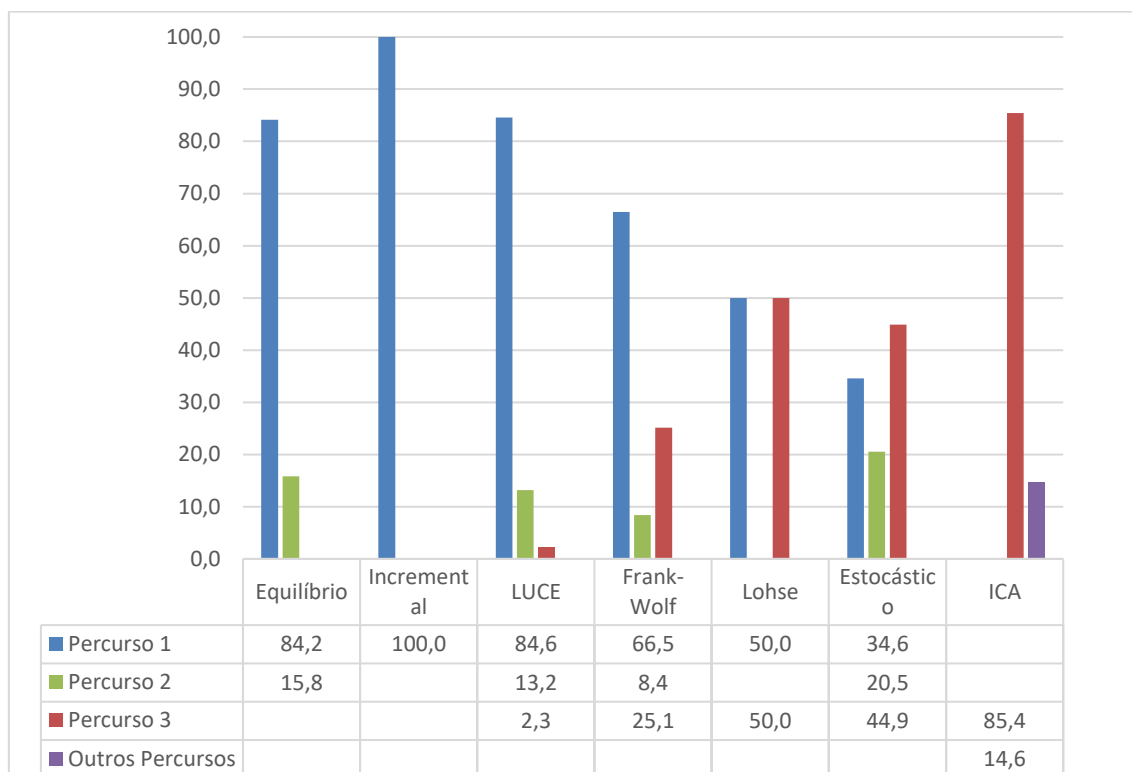


Figura 4.14 - Repartição do tráfego na rede Asprela a partir dos modelos estáticos

Após a análise dos resultados obtidos, pode-se concluir que no modelo estocástico, existe um relativo equilíbrio na distribuição de volume pelas três principais alternativas de deslocamento entre as duas zonas.

Entre os modelos de equilíbrio determinísticos, verifica-se uma grande semelhança de resultados, excetuando o modelo de equilíbrio *Lohse*, que reparte igualmente o tráfego pelo percurso 1 e 3. O modelo incremental destaca-se por atribuir o volume total a uma só rota, sobressaindo sobre as outras possibilidades por ter o menor comprimento de via.

Fora destes resultados inclui-se o modelo ICA, que se diferencia sob os modelos estáticos por repartir também por percursos alternativos alheios aos apresentados.

Da mesma forma, a repartição efetuada pelos modelos dinâmicos na rede da Asprela é apresentada na Figura 4.15.

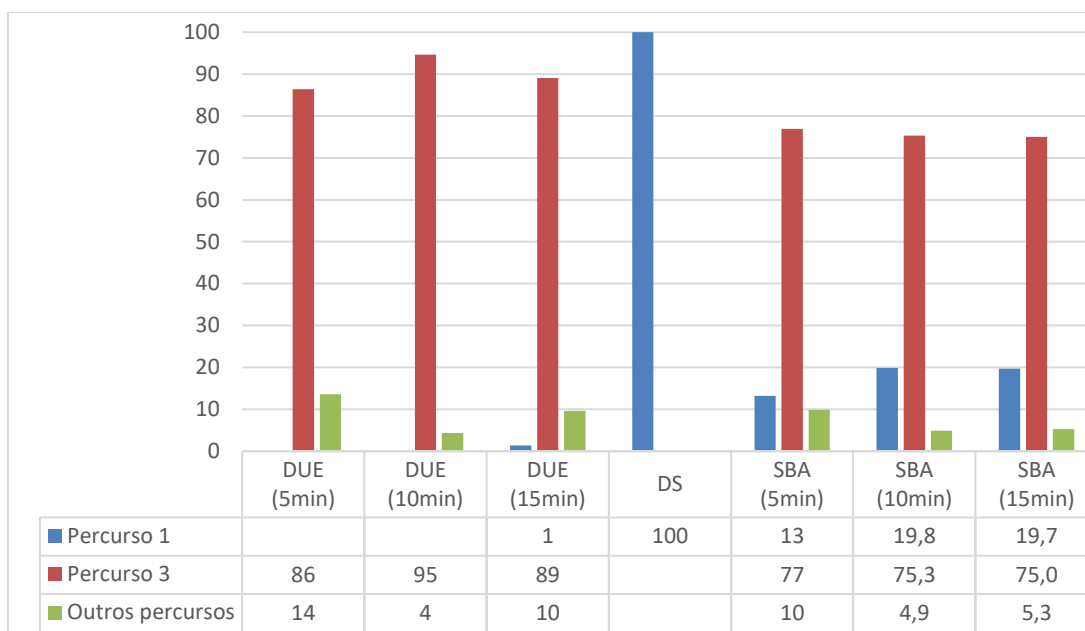


Figura 4.15 - Repartição do tráfego na rede Asprela a partir dos modelos dinâmicos

Analisados os resultados obtidos, um dos aspetos que é importante realçar é a distribuição do tráfego entre os diferentes períodos de análise dos modelos DUE e SBA. O percurso que é atribuído com maior fluxo rodoviário é o percurso 3, que se destaca dos restantes pela possibilidade de concluir o trajeto em menor tempo, em regime livre de circulação.

O modelo DS, da mesma forma como acontece na rede fictícia, faz a atribuição total ao percurso mais curto.

Uma das principais tendências nos modelos dinâmicos, já mencionada anteriormente, é referente à convergência do tráfego num menor número de percursos com a maior parcialização da matriz de procura. Os resultados obtidos nesta rede vêm comprovar este fenómeno, verificando-se principalmente nos modelos DUE, como se pode verificar na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Diferenciação número de percursos DUE

Modelo	Número de intervalos	Carregamento parcial (%)	Número de percursos
DUE (5min)	12	8	2
DUE (10min)	6	17	3
DUE (15min)	4	25	4

5

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES GERAIS

A presente dissertação teve como objetivo o estudo e avaliação dos modelos de afetação de tráfego. Foram aplicados 7 tipos de modelos, dentro destes 4 de equilíbrio e 3 modelos dinâmicos, a duas redes viárias. De notar que, sem a presença de dados reais de contagens de tráfego, a avaliação dos modelos quanto à sua exatidão de previsão de comportamento dos utilizadores torna-se complicada pela sua grande imprevisibilidade.

Porém, a partir da análise dos resultados dos indicadores dos arcos e percursos das redes, obtidos através da ferramenta *VISUM*, é possível retirar algumas conclusões e avaliá-las quanto ao seu desempenho geral.

Começando com os modelos de equilíbrio estáticos, não se verificaram variações significativas nos resultados entre as suas quatro variações, seja em termos dos indicadores globais de estudo de rede, seja na sua atribuição pelos percursos. Contudo, quanto aos tempos de percurso e de atraso, estes apresentam os valores mais reduzidos, assim como menores reduções das velocidades de percurso. Assim, podendo não ser os modelos mais exatos nas estimações reais do comportamento dos fluxos de tráfego, revelam-se como modelos úteis no estudo da otimização de redes e percursos, numa perspetiva global.

Quanto ao modelo incremental, o número de iterações que utiliza é um fator importante a ter em conta na utilização do mesmo. Da mesma forma que nos modelos dinâmicos, a divisão da matriz de origem-destino tem um impacto grande na forma como é parcialmente carregada a rede. A utilização de um maior número de iterações resulta numa maior repartição dos volumes de tráfego, resultando num maior equilíbrio nas correntes de tráfego. A utilização de um número menor de iterações significa a introdução de maiores volumes nos arcos e, conseqüentemente, a indução de elevados tempos de atraso pela elevada saturação dos percursos mais curtos. Contudo, na estimação do comportamento de uma rede, deve ter-se em conta o contexto da mesma. Assim, qualquer número de iterações definido pode ser apropriado em certos cenários específicos. A calibração deste parâmetro, portanto, vê-se como um passo importante na utilização deste modelo.

Num cenário real é expectável que, em redes com variados percursos com a mesma origem e destino e custos generalizados semelhantes, exista uma distribuição relativamente homogénea pelos demais. O modelo estocástico toma este fenómeno como uma das suas principais vantagens, pela sua capacidade de não se restringir à atribuição maioritária a percursos com um custo menor que, por vezes, tem uma variação quase insignificante quantos aos percursos alternativos. Isto verifica-se, principalmente, nos resultados obtidos e analisados nos percursos da zona Asprela, mas também na zona fictícia que é consideravelmente mais simples.

Como já referido, os atrasos nas interseções são um dos principais fatores de origem de efeitos de congestionamento, principalmente em zonas urbanas. O modelo ICA destaca-se entre os demais

por permitir a introdução destes atrasos na modelação de tráfego, o que resulta na estimação mais correta das velocidades e tempos de percurso, como observado nos resultados obtidos, o que permite uma maior aproximação à realidade. No entanto, este modelo acarreta um esforço redobrado e maior pormenorização na modelação das interseções.

Apesar de não ser o foco no estudo desta dissertação, verifica-se que a principal vantagem dos modelos dinâmicos recai na possibilidade de incorporação de uma maior importância nos horários de ponta na definição do período de análise, que não se torna possível nos modelos estáticos.

Contudo, são denotadas dificuldades na utilização dos modelos dinâmicos, particularmente na fase de divisão da matriz origem-destino em matrizes parcelares, que pressupõe a definição dos intervalos de tempo em que o período de análise é repartido. A procura é introduzida na matriz antes de chegar ao passo da atribuição, em número de veículos no formato de número inteiro. Nesse caso, por vezes o carregamento de uma percentagem do tráfego à rede induz a que não sejam alocados valores inteiros de veículos. Na realidade, não existem partes de veículos, apenas o veículo em si, portanto caso a definição dos intervalos de análise não seja calibrada e validada há a possibilidade de introdução de erros consideráveis nestes modelos.

Porém, numa análise macroscópica, os valores dos volumes de tráfego não pressupõem um elevado rigor neste campo ao contrário dos modelos microscópicos, pelo que ganha mais importância na análise das tendências das correntes de tráfego.

Quanto aos resultados obtidos pelo modelo dinâmico estocástico, estas não corresponderam ao esperado, pelo que se denota uma diferença grande na sua forma de atribuição quando comparado com o modelo estático estocástico.

Por fim, a velocidade de processamento foi um dos aspetos que não teve um amplo impacto no decorrer da utilização do *VISUM*, devido à relativa reduzida complexidade das redes de estudo. Não obstante, observaram-se oscilações no tempo de processamento dos modelos de equilíbrio na ordem de segundos devido aos seus diferentes algoritmos de convergência. Contudo, em redes mais extensas pode ser um fator a ter em conta na escolha do modelo a utilizar. Todavia, nos modelos dinâmicos, particularmente no modelo dinâmico de simulação, SBA, o tempo de execução para estas redes chega a prolongar-se durante vários minutos.

5.2. TRABALHOS FUTUROS

É notório as vantagens que a modelação pode trazer ao planeamento dos transportes. No entanto, o trabalho realizado comprova que ainda há espaço para o aprofundamento deste campo e as ferramentas existentes exibem um potencial grande para os mais diversos estudos.

Com a facilidade que se tem, nos dias de hoje, de aceder a dados pormenorizados e de qualidade do tráfego, sugere-se, numa futura continuação do trabalho, a utilização de dados de contagem de tráfego reais associados a redes reais e a comparação com os resultados estimados pelos modelos existentes, através de análises estatísticas, para a avaliação dos modelos quanto à sua aproximação à realidade.

Seria relevante também o estudo mais detalhado de vários parâmetros como a impedância, introduzindo na função variáveis como as portagens, a utilização de diferentes funções *VDF*, bem como a introdução de veículos pesados nos modelos. Quanto aos modos de transporte disponíveis, um estudo com potencial no que toca à modelação seria a incorporação do transporte público, pedonal e bicicleta em conjunto com o transporte individual.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, B. (2012). *The Traditional Four Steps Transportation Modeling Using Simplified Transport Network: A Case Study of Dhaka City, Bangladesh*. www.setscholars.org
- Bliemer, M., Raadsen, M., & De, E. (2013). *WORKING PAPER ITLS-WP-13-16 Requirements for traffic assignment models for strategic transport planning : A critical INSTITUTE of TRANSPORT and LOGISTICS STUDIES The Australian Key Centre in Transport and Logistics Management The University of Sydney*.
- Calvert, S., Minderhoud, M., Taale, H., Wilmink, I., & Knoop, V. L. (2016). TrafficQuest report: Traffic assignment and simulation models. *State-of-the-Art Background Document*. Published by TrafficQuest Centre for Expertise on Traffic Management, DELFT, Netherlands.
- Cascetta, E. (2001). *Algorithms for Traffic Assignment to Transportation Networks*. 0, 435–483. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6873-2_7
- Circula Seguro. (2022). <https://www.circulaseguro.pt/perante-um-congestionamento-de-transito-quem-stressa-mais-a-mulher-ou-o-homem-2/>
- DAGANZO, C. F., & SHEFFI, Y. (1977). On Stochastic Models of Traffic Assignment. *Transportation Science*, 11(3), 253–274. <http://www.jstor.org/stable/25767878>
- Davis, G. A., & Xiong, H. (2007). Access to Destinations: Travel Time Estimation on Arterials. *Access to Destinations Study*, 83p. <http://www.cts.umn.edu/Publications/ResearchReports/pdfdownload.p1?id=818%5Cnhttp://www.lrrb.org/PDF/200735.pdf>
- Duarte, M. dos R. (2013). *Caracterização do desempenho das redes rodoviárias com base em modelos de afetação de tráfego*. <http://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/5365>
- Gentile, G. (2014). Local User Cost Equilibrium: a bush-based algorithm for traffic assignment. *Transportmetrica A: Transport Science*, 10(1), 15–54. <https://doi.org/10.1080/18128602.2012.691911>
- Giglio, D., & Sacco, N. (2014). A control system for the individual route guidance in traffic flow networks. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 19(3), 948–956. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-za-1003.02303>
- Hu, T. Y., Tong, C. C., Liao, T. Y., & Chen, L. W. (2018). Dynamic route choice behaviour and simulation-based dynamic traffic assignment model for mixed traffic flows. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(2), 813–822. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1025-8>
- Kucharski, R. (2014). *Cracow University of Technology [MASTER THESIS] Designing a Visum based tool to defend the thesis : The static assignment transport models rely on assumptions*. May.
- Lee, E. S., & Oduor, P. G. (2015). Using multi-attribute decision factors for a modified all-or-nothing traffic assignment. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(2), 883–

899. <https://doi.org/10.3390/ijgi4020883>
- Mahpour, A., Mamdoohi, A., & Hakimelahi, A. (2020). A heuristic technique for traffic assignment with variable step size and number of iterations. *Transportation Research Procedia*, 48(2018), 2569–2579. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.254>
- Martin, W. A., & A.McGuckin, N. (1998). *Report 365 Travel Estimation Techniques for Urban Planning NATIONAL ACADEMY PRESS*. <http://www.nas.edu/trb/index.html>
- National Research Council. (2000). Highway Capacity Manual. In *National Research Council, Washington, DC*.
- Ortúzar, J. de D., & Willumsen, L. G. (2011). Modelling Transport. In *Modelling Transport*. <https://doi.org/10.1002/9781119993308>
- Outram, V. E., & Thompson, E. (1978). Driver's perceived cost in route choice. *Proceedings-PTRC Annual Meeting, London*, 226–257.
- Patriksson, M. (1994). The Traffic Assignment Problem: Models and Methods. *Annals of Physics*, 54(2), xii, 223 p. <http://www.mendeley.com/research/no-title-avail/%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:the+traffic+assignment+problem+-+models+and+methods#0>
- Piątkowski, B., & Maciejewski, M. (2013). Comparison of traffic assignment in visum and transport simulation in MATSim. *Transport Problems*, 8(2), 113–120.
- Poudyal, R., Loskot, P., & Parajuli, R. (2020). *SONEUK Conf2020. June*.
- PTV Visum Manual*. (2020).
- Rojo, M. (2020). Evaluation of traffic assignment models through simulation. *Sustainability (Switzerland)*, 12(14), 1–39. <https://doi.org/10.3390/su12145536>
- Sheffi, Y. (1984). Urban transportation networks analysis. *Urban Transportation Networks : Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, 2–26.
- Tavares, J. P. M. P. (2003). *Aplicabilidade e Robustez de Modelos de Afetação de Tráfego em Redes Urbanas*.
- Tsekeris, T., & Tsekeris, C. (2011). Demand forecasting in transport: Overview and modeling advances. *Ekonomika Istrazivanja*, 24(1), 82–94. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2011.11517446>
- WARDROP, J. G. (1952). Road Paper. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1(3), 325–362. <https://doi.org/10.1680/ipeds.1952.11259>

ANEXOS

ANEXO A.1

Quadro 1 - Matriz O/D da zona Asprela

Origem			Destino		
Nó	Zona	Soma	Nó	Zona	Soma
61	Amial	1684	61	Amial	2361
62	S, Tomás	494	62	S, Tomás	2587
63	Pólo Universitário	668	63	Pólo Universitário	1048
64	Hospital S, João	595	64	Hospital S, João	1669
110	A3/A4	5765	110	A3/A4	5635
111	Arroteia	2271	111	Arroteia	566
112	S, Mamede Infesta	1430	112	S, Mamede Infesta	853
113	Via Norte	5501	113	Via Norte	4867
1000510	Zona Exterior 1	157	1000510	Zona Exterior 1	220
1000528	Zona Exterior 2	0	1000528	Zona Exterior 2	494
1000532	Zona Exterior 3	531	1000532	Zona Exterior 3	702
1001212	Zona Exterior 4	410	1001212	Zona Exterior 4	0
1002443	Zona Exterior 5	707	1002443	Zona Exterior 5	325
1002445	Zona Exterior 6	1472	1002445	Zona Exterior 6	1019
1002624	Zona Exterior 7	990	1002624	Zona Exterior 7	1208
1048470	Zona Exterior 8	318	1048470	Zona Exterior 8	367
1049809	Zona Exterior 9	0	1049809	Zona Exterior 9	369
1078717	Zona Exterior 10	410	1078717	Zona Exterior 10	440
1078718	Zona Exterior 11	1498	1078718	Zona Exterior 11	1303
1078719	Zona Exterior 12	1702	1078719	Zona Exterior 12	1108
1078720	Zona Exterior 13	737	1078720	Zona Exterior 13	90
1078721	Zona Exterior 14	5601	1078721	Zona Exterior 14	5044
1078722	Zona Exterior 15	4822	1078722	Zona Exterior 15	5488
	TOTAL	37763		TOTAL	37763

ANEXO A.2

Quadro 2 - Caracterização dos arcos da zona fictícia

Arco	Comprimento (km)	Velocidade máxima (km/h)	Capacidade (veículos)	Tipo via
5	0,250	50	3000	Eixo Urbano
6	0,150	50	3000	Eixo Urbano
7	0,122	50	3000	Eixo Urbano
8	0,250	50	3000	Eixo Urbano
9	0,113	50	3000	Eixo Urbano
10	0,121	50	3000	Eixo Urbano
11	0,250	50	3000	Eixo Urbano
12	0,098	50	3000	Eixo Urbano
13	0,119	50	3000	Eixo Urbano
14	0,250	50	3000	Eixo Urbano
15	0,536	80	4000	Variante
16	0,508	80	4000	Variante
17	0,556	80	4000	Variante

ANEXO B.1

Quadro 3 - Comparação entre as capacidades iniciais e capacidades definidas pelo SBA

Arco	Tipo de Via	Comprimento (km)	Capacidade (veículos)	Capacidade definida pelo SBA (veículos)	Volume tráfego (veículos)
5	Eixo urbano	0,250	3000	2113	2835
6	Eixo urbano	0,105	3000	2113	500
7	Eixo urbano	0,122	3000	2113	500
8	Eixo urbano	0,250	3000	2113	1835
9	Eixo urbano	0,113	3000	2113	500
10	Eixo urbano	0,121	3000	2113	500
11	Eixo urbano	0,250	3000	2113	849
11	Eixo urbano	0,250	3000	2113	13
12	Eixo urbano	0,098	3000	2113	500
13	Eixo urbano	0,119	3000	2113	500
14	Eixo urbano	0,250	3000	2113	212
14	Eixo urbano	0,250	3000	2113	48
15	Variante	0,536	4000	2376	3165
16	Variante	0,508	4000	2376	3165
17	Variante	0,556	4000	2376	3165

ANEXO B.2

O modelo SBA faz a atribuição para as zonas populacionais não só pelas vias de eixo urbano, mas também pela variante. Na Figura 7.1 estão representados os percursos para as zonas em questão pelo eixo variante e nas Figuras 7.2 e 7.3 está representada a sua repartição quanto às três aplicações do modelo.

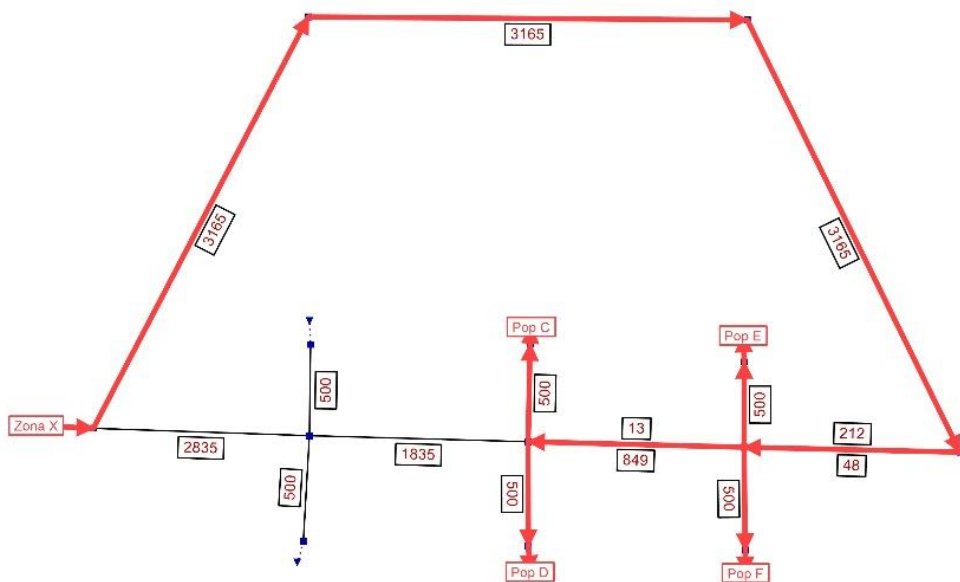


Figura 7.1 – Repartição

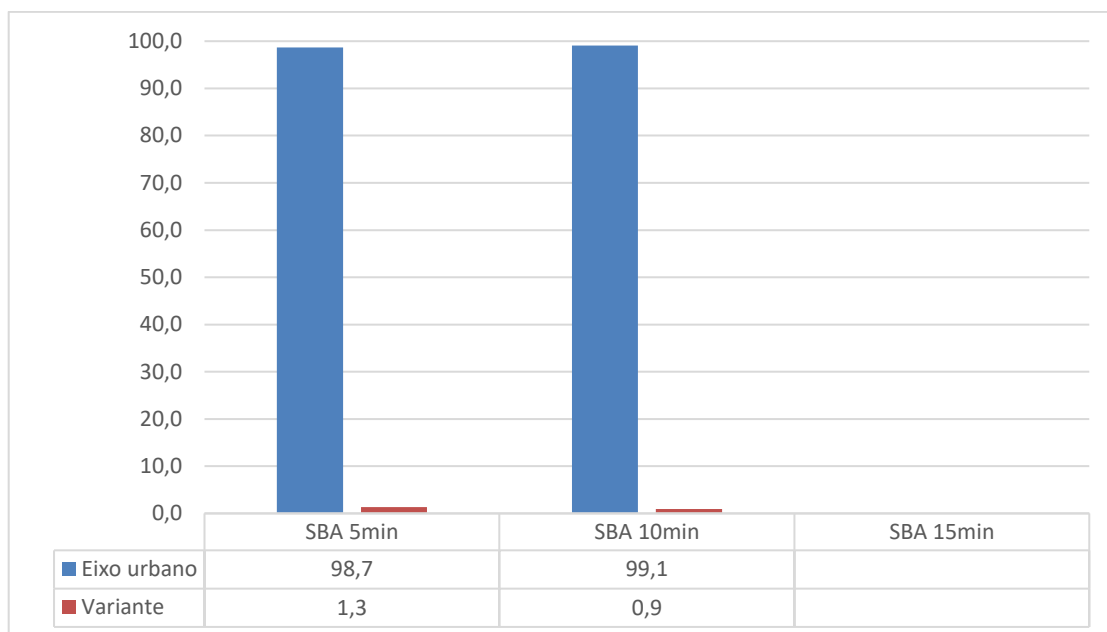


Figura 7.2 - Repartição do volume para as zonas Populacionais C e D

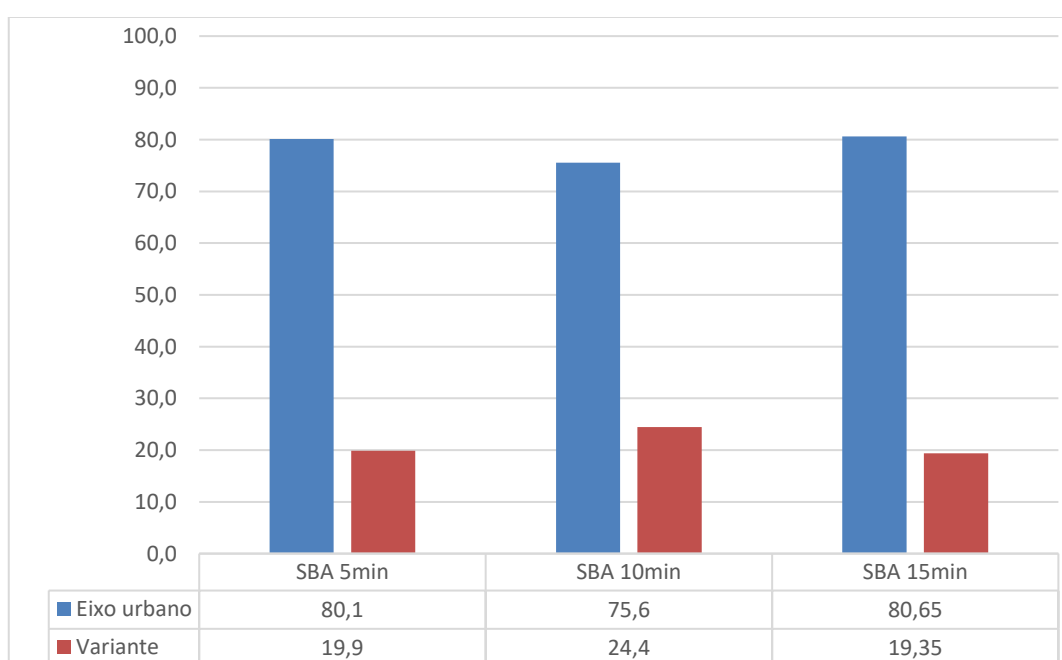


Figura 7.3 - Repartição do volume para as zonas Populacionais E e F

ANEXO C

Quadro 4 - Resultados dos percursos da zona fictícia dos modelos estáticos

	Da zona:	Para a zona:	Classe	Volume (veículo)	Repartição (%)	Tempo de viagem (h)	Atraso total (h)	V ₀ (km/h)	V _{cur} (km/h)	Impedância	Comprimento
Equilíbrio	X	Y	Eixo urbano	895	30	34	14	50	29	337065	1,000
	X	Y	Variante	2105	70	58	12	77	61	337065	1,600
Incremental	X	Y	Eixo urbano	1980	66	103	59	50	21	422068	1,000
	X	Y	Variante	1020	34	24	1	77	72	311642	1,600
Luce	X	Y	Eixo urbano	895	30	34	14	50	29	337064	1,000
	X	Y	Variante	2105	70	58	12	77	61	337065	1,600
Frank Wolf	X	Y	Eixo urbano	895	30	34	14	50	29	337064	1,000
	X	Y	Variante	2105	70	58	12	77	61	337065	1,600
Lohse	X	Y	Eixo urbano	909	30	35	14	50	29	337962	1,000
	X	Y	Variante	2091	70	58	12	77	62	336624	1,600
Estocástico	X	Y	Eixo urbano	1329	44	53	24	50	28	351168	1,000
	X	Y	Variante	1671	56	45	8	77	64	331562	1,600
	X	Pop F	Eixo urbano	374	75	13	6	50	26	308603	0,837
	X	Pop F	Variante	126	25	4	1	71	61	405072	1,937
	X	Pop E	Eixo urbano	374	75	13	6	50	26	306202	0,837
	X	Pop E	Variante	126	25	4	1	71	61	402671	1,937
ICA	X	Y	Eixo urbano	907	30	34	14	50	29	337846	1,000
	X	Y	Variante	2093	70	58	12	77	62	336680	1,600